

Цена 15 руб.

В.К. Попов . ЭЛЕКТРОПРИВОД

ПРОФ. В. К. ПОПОВ

ЭЛЕКТРОПРИВОД

МАШГИЗ 1946

Проф. В. К. ПОПОВ,
доктор технических наук

Электропривод

ПОСОБИЕ ДЛЯ МЕХАНИКОВ
И ТЕХНОЛОГОВ

М Т М • СССР
ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Ленинград • 1946 • Москва

В книге дается краткий обзор истории развития электропривода и излагаются основные понятия об электроприводе. Рассматриваются механические характеристики различных типов электродвигателей и даются общие основания рационального выбора типа электропривода. Излагается вопрос определения мощности двигателя для электропривода.

Книга рассчитана на инженеров и техников электротехнических специальностей, а также предназначена в качестве учебного пособия для электротехнических вузов и факультетов.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Автоматизированный привод является основным механизмирующим и автоматизирующим звеном промышленных предприятий. Степень его совершенства во многих случаях определяет производительность рабочих машин и качество выпускаемой продукции или качество операций.

Инженерам и техникам неэлектрикам приходится весьма близко сталкиваться с вопросами электропривода, в силу чего необходимо знать основные особенности его работы. Настоящее пособие и ставит своей целью помочь им в этом.

В книге рассматриваются главнейшие механические свойства электродвигателей, характеристики типичной автоматической и неавтоматической аппаратуры, включая и ионно-электронную, и их выбор, с учетом последних достижений в этой области. В книге приводятся также некоторый материал по вопросам эксплуатации электроприводов.

Книга предназначена главным образом для лиц, работающих в области машиностроения, в том числе и в проектно-конструкторских бюро, но она может быть использована и студентами неэлектриками при изучении ими вопросов электропривода.

Автор надеется, что книга будет до некоторой степени способствовать дальнейшему развитию в СССР приводов лучшего качества и наиболее целесообразной эксплуатации электроприводов в производстве.

Проф. В. Попов

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Развитие электропривода от трансмиссионного до автоматизированного одиночного и многодвигательного	7
Глава II. Основные сведения	15
1. Определение понятия „электропривод“ [15]. 2. Последовательность проектирования электроприводов [17]	
Глава III. Классификация и выбор электродвигателей по способу их защиты от окружающей среды	18
3. Классификация способов защиты промышленных двигателей от окружающей среды [18]. 4. Выбор типа электродвигателей в зависимости от характера окружающей среды [21]	
Глава IV. Механические свойства двигателей постоянного тока	24
5. Роль механических характеристик электродвигателей в электроприводе [24]. 6. Вращающий момент электродвигателей постоянного тока [25]. 7. Различные возможные режимы работы шунтовой машины постоянного тока [26]. 8. Введение относительных величин в расчет механических характеристик [29]. 9. Двигательные механические характеристики шунтовых двигателей постоянного тока и их расчет [31]. 10. Тормозные характеристики шунтовых двигателей и их расчет [34]. 11. Механические свойства серийных двигателей постоянного тока [36]. 12. Механические свойства компаундных двигателей постоянного тока [40]. 13. Влияние колебаний напряжения сети на характеристики двигателей постоянного тока [42]. 14. Регулирование скорости двигателей постоянного тока [43]. 15. Механические характеристики шунтовых двигателей при регулировании скорости током возбуждения [44]. 16. Графическое изображение механических характеристик для двух направлений вращения. [45]. 17. Система Леонарда [46]. 18. Квадратичная система Леонарда и система Леонарда — Ильгнера [51]. 19. Система Леонарда с трехмоточным генератором [52]. 20. Система Леонарда с серийным возбуждением [53]. 21. Система Леонарда с ротородем [55]. 22. Система Леонарда с амплином [58]. 23. Система Леонарда с регулоском [61]. 24. Ионный привод постоянного тока [61]	
Глава V. Механические свойства двигателей переменного тока	62
25. Механические свойства асинхронных двигателей [62]. 26. Механические характеристики асинхронных двигателей [65]. 27. Асинхронные короткозамкнутые двигатели Бушера и с глубоким пазом [69]. 28. Тормозные характеристики асинхронных двигателей [72]. 29. Регулирование скорости асинхронных двигателей [74]. 30. Синхронные двигатели [78]. 31. Основные типы промышленных коллекторных двигателей переменного тока и их применение [80]. 32. Карликовые двигатели, микродвигатели и высокочастотные двигатели [82]	
Глава VI. Выбор электрического типа двигателя для привода	84
33. Выбор для привода электрического типа нерегулируемого двигателя [84]. 34. Основные положения по выбору электроприводов с регулируемой скоростью [90]. 35. Некоторые особенности выбора рода тока привода при напряженном повторно-кратковременном режиме работы [92]. 36. Ориентировочные указания по выбору рода тока для приводов в различных отраслях промышленности [94]	

Глава VII. Поддержание постоянства скорости и синхронизация электроприводов	94
37. Значение вопроса и поддержание постоянства скорости регулируемых приводов постоянного тока [94]. 38. Синхронизация хода электроприводов [97]. 39. Самосинны [99]. 40. Схема поддержания постоянства скорости двигателей с угольными регуляторами и самосиннами [100]. 41. Современные возможности непрерывного регулирования [101]	
Глава VIII. Основы динамики электропривода	102
42. Деление режимов работы электроприводов по длительности непрерывной нагрузки [102]. 43. Подразделение режимов работы приводов по характеру статической нагрузки и по классам машин по характеру статической нагрузки [104]. 44. Подразделение рабочих движений электропривода [107]. 45. Сравнение статических моментов к валу двигателя [109]. 46. Приведение статических вращательного движения к одной оси [109]. 47. Приведение поступательного движения к вращательному [112]. 48. Особенности приведения статических усилий и маховых масс при наличии кривошипной передачи [113]. 49. Вопросы учета полных потерь в передачах [115]. 50. Решение уравнений движения привода для пуска и торможения [115]. 51. Потери энергии в цепи электродвигателей при пуске и практическое значение этого вопроса [117]. 52. Значение вопроса о пусковых и тормозных потерях для короткозамкнутых двигателей [119]. 53. Выбор номинального числа оборотов в минуту двигателя и выбор передаточного числа от двигателя к механизму [120]. 54. Подразделение переходных режимов электропривода [123]. 55. Механические переходные режимы электропривода с шунтовой характеристикой при постоянном статическом моменте [124]. 56. Работа электропривода с шунтовой характеристикой с маховиком при пиковой нагрузке. [129]. 57. Решение уравнений механических переходных процессов в случае серийных и компаундных двигателей постоянного тока. [131]. 58. Методика решения задач механических переходных режимов при $M_m = f[\eta]$ и $M_m = \varphi[L]$ [133]. 59. Механические переходные режимы при переменном статическом моменте и при переменном маховом моменте агрегата [134]. 60. Электромеханические переходные режимы в системе Леонарда [135]. 61. Пусковые и тормозные механические процессы короткозамкнутых асинхронных двигателей [137]	
Глава IX. Выбор мощности электродвигателей	138
62. Факторы, определяющие номинальную и перегрузочную мощность электродвигателей [138]. 63. Нагревание электродвигателей [139]. 64. Предельные допускаемые превышения температуры частей двигателя [143]. 65. Значения мгновенных перегрузочных мощностей электродвигателей [145]. 66. Общие основы выбора мощности двигателя и выбор мощности двигателя при продолжительной неизменной нагрузке [146]. 67. Выбор мощности двигателя по нагреву при любой нагрузке методом эквивалентного тока [147]. 68. Метод выбора мощности двигателя по средним потерям [150]. 69. Методы эквивалентного момента и мощности [151]. 70. Выбор мощности двигателя при кратковременной работе [152]. 71. Выбор мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме работы [153]. 72. Определение допустимого числа включений в час короткозамкнутых двигателей при повторно-кратковременном режиме работы [156]	
Глава X. Виды управления электроприводом	157
73. Роль аппаратуры управления в электроприводе и процессы, подлежащие управлению [157]. 74. Основные подразделения автоматического управления приводом [158]. 75. Основная номенклатура аппаратуры управления [158]	

Глава XI. Неавтоматическое управление электроприводами	159
78. Основные операции по управлению [159]. 79. Плавкие предохранители [159]. 80. Пакетные выключатели [160]. 81. Реостаты для управления электродвигателями [161]. 82. Контроллеры [163]. 83. Контроллерные схемы и диаграммы [163]. 84. Сопротивления в схемах двигателей [168]. 85. Тормозные приспособления [163].	
Глава XII. Автоматическое управление двигателями и автоматическая аппаратура управления	172
86. Шунтовые контакторы [172]. 87. Серийные контакторы [174]. 88. Контактры с защелкой [175]. 89. Основные понятия о реле [176]. 90. Защитные реле [176]. 91. Электромагнитные реле управления — основные и промежуточные [177]. 92. Реле времени [179]. 93. Реле для учета механических параметров и счетные реле [182]. 94. Тайм-такторы [184]. 95. Различные командоаппараты [184]. 96. Электромагнитные муфты [188]. 97. Купроксидные и селеновые выпрямители [189]. 98. Изображения элементов схем автоматического управления приводом [190]. 99. Основная структура схем автоматизированного электропривода и контроллерные диаграммы [190]. 100. Типичные операции схем автоматизированного электропривода [194]. 101. Основные принципы автоматического управления пуском и торможением электродвигателей [196]. 102. Магнитные пускатели для короткозамкнутых электродвигателей [196]. 103. Принцип обратной электродвижущей силы [198]. 104. Принцип ограничения тока [199]. 105. Принцип независимой выдержки времени [201]. 106. Принцип зависимой от тока выдержки времени [202]. 107. Частотный принцип [202]. 108. Примерная схема автоматизированного электропривода с кнопочным управлением [204]. 109. Полуавтоматическое управление электроприводами с командоконтроллерами [206]. 110. Программное управление и регулирование [209].	
Глава XIII. Ионно-электронное управление электроприводами	210
111. Преимущества и недостатки ионно-электронной автоматики в электроприводе [210]. 112. Термоэлектронные вакуумные лампы [210]. 113. Характеристики трехэлектродной лампы [211]. 114. Некоторые типичные применения электронных ламп в электроприводе [214]. 115. Ионные аппараты, применяемые в электроприводе [215]. 116. Управление зажиганием тиратрона [216]. 117. Принципиальные схемы ионного привода постоянного тока [218]. 118. Механические характеристики ионного привода постоянного тока [219]. 119. Недостатки ионного электропривода [222]. 120. Ионный привод типа „тайм-контроль“ или „мотороль“ [222]. 121. Применение для привода инверторов и ртутных выпрямителей [222]. 122. Фотоэлементы и их применение [223].	
Глава XIV. Основные мероприятия по поддержанию исправности и по ремонту электроприводов	226
123. Общие замечания [226]. 124. Основные профилактические мероприятия по поддержанию электродвигателей в порядке [226]. 125. Систематический контроль [227]. 126. Основные типичные неисправности двигателей и их причины [227]. 127. Основные мероприятия по уходу за аппаратами управления в автоматических схемах [230]. 128. Некоторые типичные неисправности основных автоматических схем приводов постоянного тока [231]. 129. Основные мероприятия по экономии электроэнергии в электроприводах [232].	
Литература	234

Глава I

Развитие электропривода от трансмиссионного до автоматизированного одиночного и многодвигательного

Высокая производительность промышленных предприятий при невысокой стоимости продукции возможна лишь при механическом, а не ручном приводе исполнительных механизмов. Первые простейшие способы механизации рабочих процессов были применены еще в древние времена, когда движущей силой служило падение воды или просто ее естественное течение. Так, за 3000 лет до нашей эры на реках Ян-Цзы-Цзын в Китае, Ефрат в Малой Азии, Нил в Африке на устоях, вбитых в дно реки, были установлены пловучие водяные колеса. Эти колеса явились старейшими предками современных мельниц. Водяные колеса были занесены в Рим во времена Юлия Цезаря и уже могли использоваться для подъема грузов воротом, соединенным с водоналивным колесом. Широкое распространение в Европе водяные мельницы получили лишь с начала XVII века. Тогда они стали применяться для приведения в движение маслобоек, круподерок, дробилок, для изготовления дубильных веществ в обувном деле, для резки металла, для токарных и сверлильных станков и т. д. В XVIII веке, с переходом промышленности от кустарного способа производства к капиталистическому, почти каждая из существовавших тогда фабрик, приводилась в движение водяным колесом, причем фабрики строились исключительно по берегам рек. В этих условиях, одно водяное колесо через канатные и ременные передачи приводило все механизмы данной фабрики.

Паровая машина, изобретенная в конце XVIII века сначала нашим соотечественником Ползуновым, а затем англичанином Джемсом Уаттом, произвела мощный переворот в технике. Вместо водяных колес механизмы фабрик стали вращаться паровыми машинами, причем опять-таки в основном каждая фабрика обслуживалась одной такой машиной. При этом представлялась возможность располагать фабрики вдали от рек. Таково было состояние техники привода рабочих машин в начале XIX века.

В середине XIX века были изобретены первые электродвигатели. Первый реальный электропривод был применен в 1838 г. в Петербурге

академиком Якоби для катера, развившего на Неве максимальную скорость 2,5 км в час. Двигатель катера питался от первичных гальванических элементов.

Управление электродвигателями, обслуживание их для целей промышленности оказалось много удобнее, чем управление водяными колесами и паровыми машинами. При этом сразу же стал вырисовываться ряд больших преимуществ электропривода. При воде и паре было почти невозможно устанавливать для отдельных станков отдельные небольшие паровые машины или водяные колеса. Оказывалось неизбежным использование общего трансмиссионного привода для всех машин одной фабрики от одной паровой машины с большим количеством шкивов, канатов и ремней. В этих передачах терялась значительная часть механической энергии, которая в случае рационального ее использования могла бы дать при той же рабочей силе большее количество продуктов. Устройство же отдельных котельных для обслуживания разных частей промышленного предприятия было мало экономичным, так как паровые котлы и паровые машины малой мощности работали крайне невыгодно, расходуя много топлива.

Применение электричества дало возможность уже в конце XIX века успешно и довольно экономично передавать электрическую энергию по проводам. Оказалось выгодным производить электрическую энергию в больших количествах в определенных местах, чаще в месте расположения топлива или водных ресурсов и передавать ее отсюда к потребителю. На тепловых электрических станциях стали применять паровую турбину — новый, более экономичный, чем паровая машина, тип теплового двигателя. Стоимость электрической энергии от такой централи оказывалась меньше, чем энергии, вырабатываемой на небольшой заводской электростанции. Большую роль в получении дешевой электрической энергии сыграли гидроэлектрические станции с новыми типами водяных двигателей — гидравлическими турбинами. Эксплуатация мощных теплоэлектрических и гидроэлектрических станций оказалась более выгодной, чем выработка энергии по мелким кокегаркам.

Электрификация, экономя топливо, удешевляла стоимость энергии вообще, и она быстро завоевала в технике права гражданства. Новые фабрики и заводы стали отказываться от устройства собственных кокегарок, предпочитая использовать для привода рабочих машин более дешевую электрическую энергию. Паровые машины и другие типы механических двигателей стали заменяться электродвигателями. Правда, введение нового промежуточного звена между первичным двигателем и рабочей машиной — электродвигателя — вначале вызывало у многих недоумение по причинам кажущегося удорожания оборудования, его усложнения и возникновения потерь энергии при передаче ее на значительное расстояние по проводам.

В самом начале электрификации промпредприятий существовала та же система приведения в движение рабочих машин фабрик и заводов, что и при общем паровом приводе. Один крупный электродвигатель через ременные и канатные передачи приводил в действие обычно все механизмы фабрики. При этом попрежнему терялось много энергии на трение в шкивах, канатах и ремнях трансмиссий. Измерения показали, что получится большой выигрыш в энергии, если распределение энергии

чисто механическим путем через шкивы, ремни и канаты заменить электрическим распределением. В этом случае вместо одного электродвигателя необходимо применить группу электродвигателей, из которых каждый вращал бы уже небольшую часть рабочих машин. В результате общий трансмиссионный привод фабрики от одного двигателя был заменен так называемым крупногрупповым приводом с большим числом электродвигателей. Энергия к этим двигателям, а стало быть и к соответствующим цехам фабрики стала подаваться частично уже не через канаты, ремни и шкивы, а электрическими проводами.

Механические трансмиссии на фабриках и заводах при этом еще остались, но они разукрупнились. Разукрупнение это произошло довольно быстро и закончилось в последних годах XIX века.

На отдельных, преимущественно перемещающихся транспортных машинах-кранах уже в этот период были применены отдельные двигатели для каждого механизма. Так, нормальный мостовой кран имел уже три электродвигателя: один — для лебедки подъема груза, второй — для перемещения тележки, третий — для перемещения моста. Крупногрупповой электрический привод стал дробиться на мелкогрупповой, при котором один двигатель начал вращать уже небольшое число рабочих машин. В начале XX века отдельные новые фабрики, в первую очередь текстильные, перешли целиком на применение одиночного привода, при котором каждая рабочая машина вращалась отдельным электродвигателем. Такое решение вопроса в текстильной промышленности вначале было вызвано стремлением получить большую чистоту помещений, избавиться от грязи и капающего из подшипников трансмиссий масла, а также желанием иметь лучшее освещение помещений при отсутствии трансмиссий. В условиях текстильного производства эти факторы имели существенное значение. Вопросы уменьшения потерь в трансмиссиях мелкогруппового привода при принятии решения о применении одиночного привода имели меньшее значение. Однако опыт применения одиночного привода в текстильной промышленности выявил новое непредполагавшееся ранее обстоятельство. Одиночный привод, благодаря возможности в каждый данный момент времени обеспечить наиболее подходящие для каждой рабочей машины скорости вращения, показал повышение производительности предприятий с одиночным приводом по сравнению с предприятиями, имевшими групповой. С тех пор одиночный привод вошел во все новые текстильные фабрики и стал распространяться также в предприятиях других отраслей промышленности. Электрическое оборудование предприятий при одиночном приводе получалось, естественно, дороже, чем при групповом, так как вместо одного мощного двигателя с одним аппаратом управления и одним комплектом проводов нужно было устанавливать множество мелких двигателей, каждый с соответствующим аппаратом управления и соответствующими проводами. Это вначале отпугивало многих предпринимателей. Пропаганду электриков за одиночный привод многие производственники воспринимали как стремление электротехнических фирм увеличить свой товарный оборот.

Однако произведенные подсчеты показали, что полная стоимость оборудования предприятия при одиночном приводе оказывается не дороже, чем при групповом. Сравнение стоимости, в том и другом

случае, нужно производить с учетом всего механического и электрического оборудования. В случае трансмиссионного привода в него входят трансмиссии, ремни и крупные электродвигатели. При одиночном приводе необходимо большее число двигателей, аппаратов управления и проводов. В свою очередь при трансмиссионном приводе из-за необходимости тщательного крепления трансмиссий и во избежание дрожания фабричные здания получают значительно тяжелее, чем при одиночном приводе. В итоге, капитальные затраты на предприятие при обоих типах привода оказываются практически одинаковыми. Эксплуатационные же расходы при одиночном приводе меньше, чем при групповом, прежде всего за счет повышения производительности предприятия и уменьшения расхода электрической энергии, вследствие исчезновения потерь в длинных, непрерывно вращающихся, трансмиссиях.

Преимущества одиночного привода перед групповым могут быть выражены следующим образом:

- 1) возможность работать при наивыгоднейших скоростях, что позволяет повышать производительность рабочих машин, а следовательно, ведет к уменьшению их числа;
 - 2) пуск в ход, регулирование скорости и изменение направления вращения производятся значительно быстрее;
 - 3) отсутствие трансмиссионных потерь;
 - 4) возможность избежать вращения вхолостую;
 - 5) отсутствие перерывов в производстве из-за обрывов трансмиссионного ремня, так как порча одиночного двигателя выводит из строя только одну рабочую машину, а не всю группу;
 - 6) возможность размещения рабочих машин в зависимости от хода фабриката, в то время как при групповом приводе приходится считаться с расположением трансмиссий;
 - 7) возможность проектировать более легкие, а стало быть, и более дешевые здания, так как не приходится думать об укреплениях трансмиссий;
 - 8) легкое обслуживание рабочих машин кранами;
 - 9) лучшее освещение рабочих машин и отсутствие теней от трансмиссий;
 - 10) большая чистота помещений, вследствие меньшего количества пыли и отсутствия трансмиссионных подшипников, из которых обычно падает масло;
 - 11) возможность, при применении простейших и дешевых устройств, создать надлежащие ограждения, предупреждающие несчастные случаи.
- В ряде современных производств лишь одиночный привод может обеспечить необходимое высокое качество продукта. Таким образом, в современной практике, за ничтожными исключениями, лишь одиночный электрический привод является наиболее эффективным и наиболее современным типом привода рабочих машин.

К настоящему времени электродвигатель, внедрившись глубоко в цеха, оказал сильное влияние не только на распределение энергии в цехах, но и на структуру самих рабочих механизмов. В ряде случаев оказалось техничеки и экономически целесообразным изъять ряд отдельных промежуточных передач из самих рабочих машин, перенести

функции, выполнявшиеся ими, на электродвигатель. Тем самым источник двигательной силы приблизился к исполнительному органу производственной машины. Эти возможности сильно выявились в металлообрабатывающих станках. В силу обработки на одном и том же станке деталей различных размеров и из различных материалов ряд станков должен работать при различных скоростях. В старых станках это достигалось применением ступенчатых шкивов и коробок скоростей. Применение двигателей с регулируемой скоростью дает возможность перенести функции регулировки скорости на электродвигатель.

Рис. 1 показывает, как выглядит коробка скоростей токарного станка для 18 скоростей на шпинделе: при нерегулируемом одиночном приводе — 8 пар переключаемых зубчатых колес (а); при двухскоростном асинхронном двигателе с переключением полюсов — 6 пар переключаемых зубчатых колес (б); при широко регулируемом двигателе постоянного тока — 3 пары переключаемых зубчатых колес (в). В ряде металлообрабатывающих станков оказалось целесообразным разделить механические движения, применив для каждого движения отдельный двигатель. Рис. 2 показывает постепенное развитие электропривода радиально-сверлильного станка.

Таким образом, техника пришла к целесообразности применения на ряде рабочих машин не одиночного, а многодвигательного привода, при котором отдельные звенья одной и той же рабочей машины приводятся отдельными электродвигателями. Имеются мощные металло-

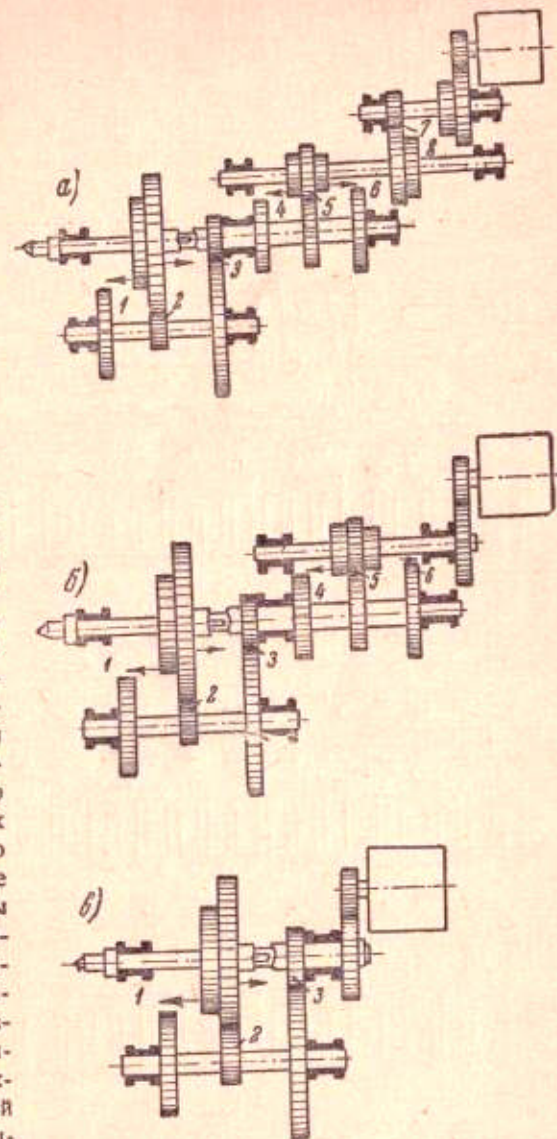


Рис. 1. Коробка скоростей токарного станка при разных типах привода.

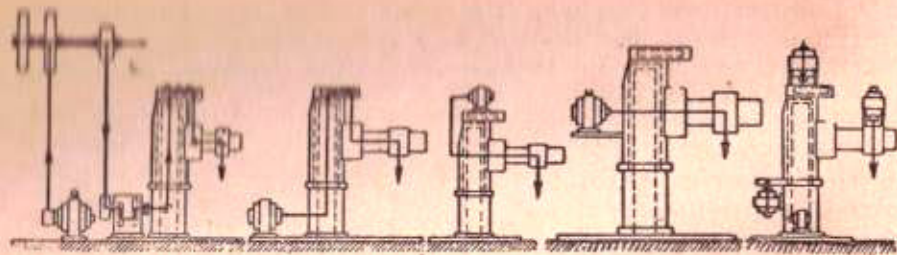


Рис. 2. Развитие электропривода радиально-сверлильного станка.

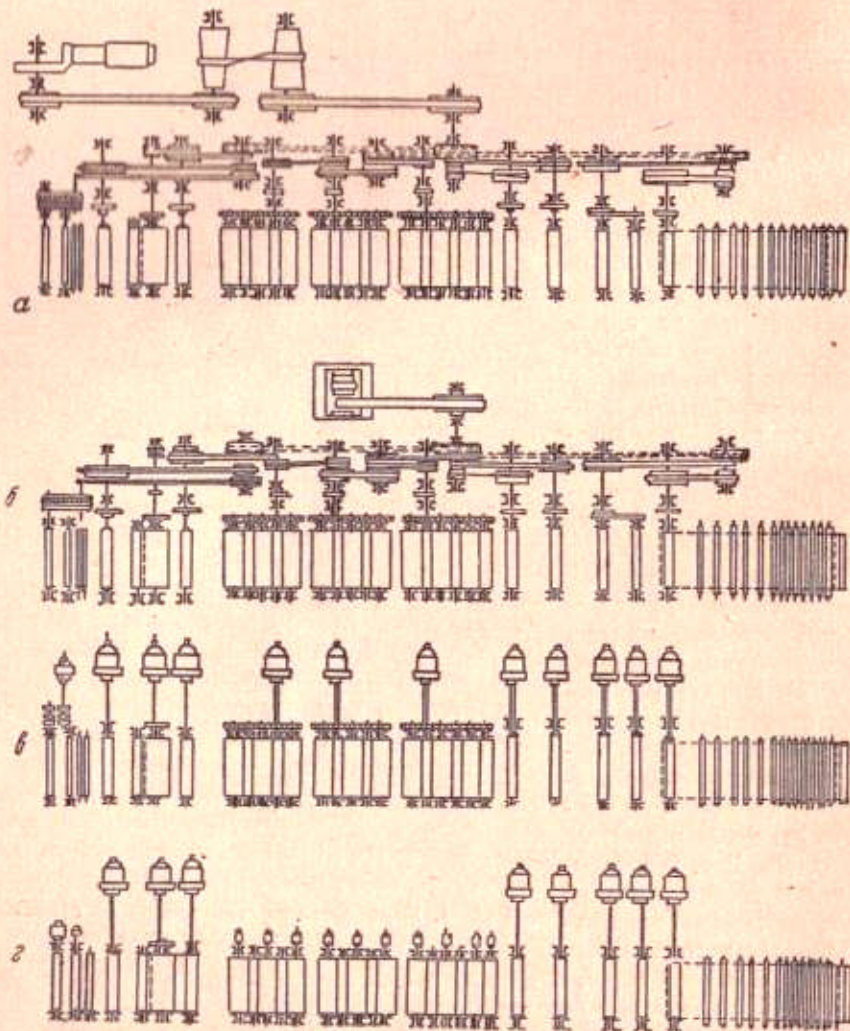


Рис. 3. Развитие электропривода бумагоделательной машины.

режущие станки, обслуживаемые 37 электродвигателями. Рис. 3 показывает развитие электропривода бумагоделательной машины. Регулируемый одиночный привод постоянного тока (б) дал возможность выбросить из бумагоделательной машины регулирующую коническую передачу (а), необходимую при паровой машине для регулировки скорости. Многодвигательный привод (в) позволил отказаться в этой машине от многочисленных передач. Самый последний тип многодвигательной бумагоделательной машины с приводом каждого сушильного цилиндра от отдельного двигателя (средняя часть рис. 3, в) дает возможность дальнейшего отказа от ряда зубчатых передач. В зависимости от типа рабочей машины, одиночный и многодвигательный приводы являются наиболее совершенными типами привода. К числу таких же совершенных, хотя и относительно редко возможных, типов привода следует отнести привод таких исполнительных механизмов, в которых электродвигатель тесно сливается с ними в единое неделимое целое. Так, в двигателях-роликах, применяемых в металлургической промышлен-

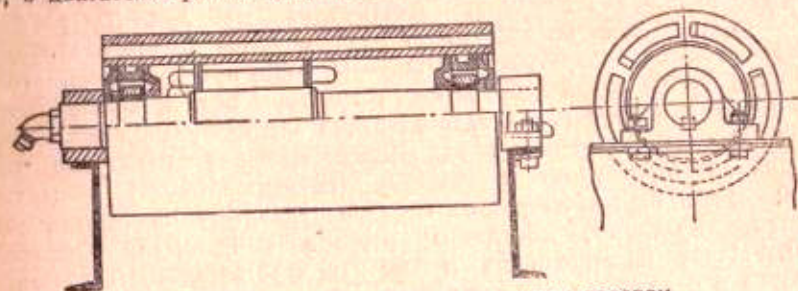


Рис. 4. Двигатель-ролик с наружным ротором.

ности и служащих для перемещения прокатываемого металла (рис. 4), сам ролик, перемещающий металл, является ротором (наружным) асинхронного двигателя. Неподвижная статорная обмотка этого двигателя располагается внутри.

Изложенное выше показывает, что электрификация рабочих машин-орудий оказала революционизирующее влияние не только на кинематику самих рабочих машин, структуру производственных цехов, но и на конструкцию электродвигателей. Наряду с применением двигателей так называемых „общего пользования“, пришлось создать серии специальных типов электродвигателей—крановых, прокатных, металлургических, текстильных, фланцевых и шпиндельных для металлорежущих станков и т. д. При этом промышленная практика идет, с одной стороны, по пути дальнейшего повышения мощностей в таких исполнительных механизмах, как прокатные станы, бумагоделательные машины, шахтные подъемники и т. д.; с другой стороны, для целей современного привода различных механизмов используются карликовые двигатели (мощностью от 100 до 1 *вт*) и микродвигатели (мощностью меньше 1 *вт*). На современном мощном самолете устанавливается до 100—150 электродвигателей. В технике, наряду с двигателями мощностью в несколько десятков тысяч киловатт (привод насосов, вентиляторов в аэродинамической трубе), встречаются двигатели с мощностью в $3 \cdot 10^{-6}$ *квт* (для привода механизмов электрических часов)

В силу существенного влияния электропривода на структуру цехов и кинематику рабочих механизмов, проектирование электропривода начинается теперь обычно с самой стадии производства рабочих машин. Именно на этом этапе должны быть тщательно оценены все даваемые автоматизированным электроприводом возможности упрощения кинематических связей исполнительных механизмов. Только при этих условиях можно получить наибольший эффект в отношении производительности предприятий, качества и себестоимости продукции.

Так как автоматизация производства несет с собой огромные технико-экономические преимущества, то в подавляющем большинстве случаев современный привод управляется автоматически или полуавтоматически посредством простейших контактных приспособлений—кнопок, рычажков, простых и легких переключающих командоаппаратов и т. п. Впервые полуавтоматическое управление электроприводом было использовано в США еще в девяти годах прошлого столетия на металлургических заводах. Широкое применение автоматизация электропривода стала находить у нас в СССР за последние десять-пятнадцать лет. За эти годы появилось огромное количество различных видов полуавтоматической и автоматической аппаратуры (контакты, реле, путевые выключатели), различные типы командоаппаратов, регуляторы и т. д. Большую роль в автоматизации вообще и в автоматизации электропривода в частности играют сильно развившиеся за последнее время различные типы электронных (пустотных) и ионных (газонаполненных) аппаратов, как-то: электронные выпрямительные и усилительные лампы, фотоэлементы, тиратроны, игнитроны, ртутные выпрямители, неоновые лампы. Малая инерционность и высокая чувствительность указанных аппаратов в ряде случаев дают возможность лучшего решения задач автоматизации, чем чисто электромагнитная контактно-релейная автоматика.

Автоматизированный электропривод теперь широко использует три вида автоматических аппаратов:

- 1) электромагнитную контактно-релейную автоматику прерывистого действия;
- 2) электрические-машины—регуляторы непрерывного действия;
- 3) ионно-электронные аппараты непрерывного действия.

Совместное комбинирование свойств двигателей и соответствующей различной аппаратуры дает возможность удовлетворить почти всем требованиям, которые ставятся производством. При этом автоматизированный привод стал основным механизующим и автоматизирующим звеном большинства промышленных предприятий. В ряде случаев от полуавтоматического управления отдельными механизмами теперь переходят к комплексному управлению огромными производственными агрегатами, увязанными в единую автоматическую систему. Это дает огромные преимущества. Так, один из специальных станков, созданных у нас за годы Великой Отечественной войны, а именно шпиндельный горизонтальный станок для одновременной обработки всех клапанных гнезд в медном блоке авиамоторов по полуавтоматическому циклу, обслуживаемый одним рабочим, заменил 30 универсальных радиально-сверлильных станков, требовавших при нормальном обслуживании 30 рабочих.

Появились целые автоматизированные поточные линии в машиностроении.

Характерным примером комплексной автоматизации в металлообработке является производство головок цилиндров для авиационных моторов на заводе „Райт“ в США. Соответствующая система состоит из 73 автоматов, комбинирующихся в составе двух комплексных агрегатов с использованием автоматического контроля и управления. При этом автоматизация дала исключительные выгоды. В то время как до оборудования такой комплексной системы брак на авиамоторы был 49⁰/₀, после ее введения он снизился до 2—3⁰/₀. У нас в СССР современный электропривод получил исключительно широкое развитие преимущественно в годы двух первых сталинских пятилеток и за годы Великой Отечественной войны. Тем самым осуществлялись выдвинутые в 1920 г. В. И. Лениным лозунги при разработке плана Государственной Комиссии по электрификации России „Коммунизм—это есть Советская власть плюс электрификация всей страны“.¹ План электрификации В. И. Ленин называл второй программой партии. В этих указаниях Ленина выявлялось исключительно важное значение механизации, достигаемое в промышленных предприятиях, прежде всего, посредством их электрификации.

Еще в начальный период индустриализации страны тов. Сталин подчеркнул исключительное значение механизации производства: „Механизация процессов труда является той новой для нас и решающей силой, без которой невозможно выдержать ни наших темпов, ни новых масштабов производства“.² В результате у нас в СССР были созданы сложные автоматизированные электроприводы. В качестве характерных примеров можно привести оборудование пяти автоматических насосных станций канал Москва—Волга, сложные автоматизированные системы загрузки доменной печи, из которых каждая включает до 17 двигателей и 500 аппаратов управления, многодвигательный привод бумагоделательной машины, включающий 10—20 двигателей с 200—300 различными автоматическими управляющими аппаратами, сложные схемы привода прокатных станков, крупных металлорежущих станков и т. д. Заводом ХЭМЗ было разработано до 600 автоматических станций управления электроприводом. В отношении обеспечения нашей промышленности автоматизированным электроприводом наша техника должна идти на уровне зарубежной. Лишь при этих условиях мы будем создавать наиболее совершенные и высокопроизводительные рабочие машины.

Глава II

Основные сведения

1. Определение понятия „электропривод“

Под электроприводом следует понимать машинное устройство, служащее для приведения в движение рабочих машин и состоящее из трех основных звеньев: 1) электродвигателя (редко — электромагнита), 2) аппа-

¹ В. И. Ленин, Соч., т. XXVI, стр. 46.

² И. В. Сталин, Вопросы ленинизма, изд. X, стр. 450

ратуры для управления двигателем (в современной практике чаще всего автоматической) и 3) механических передач от двигателя к рабочей машине. Вместе с рабочей машиной (исполнительным механизмом) электропривод образует сложное машинное устройство, которое может быть названо электрифицированным, а в случае применения автоматики — и автоматизированным производственным агрегатом. Комплексная электромеханическая схема подобного сложного агрегата с многодвигательным приводом показана на рис. 5. Для успешного ведения производственного процесса всякий рациональный электропривод исполнительного механизма должен обеспечить следующие условия:

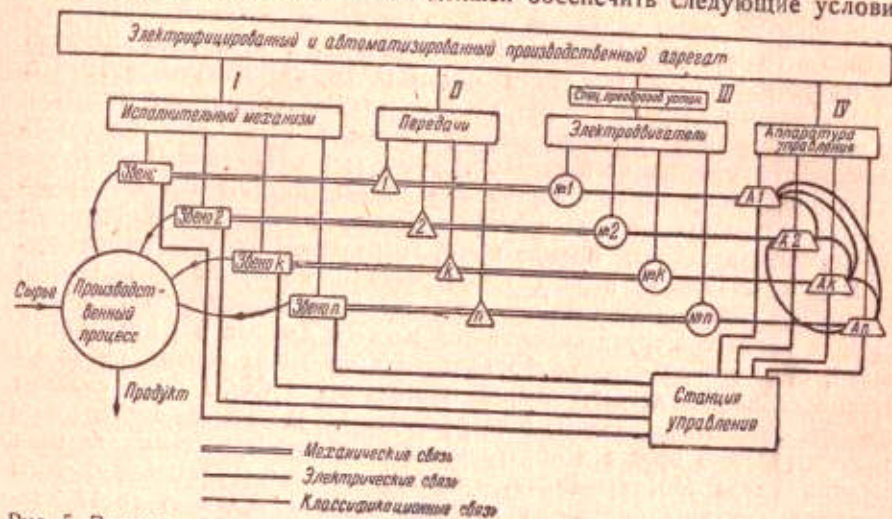


Рис. 5. Электромеханическая схема электрифицированного производственного агрегата.

- 1) высокую производительность агрегата, т. е. наибольшую целесообразную быстроту операций; 2) максимальную точность операций (наилучшее качество продукта); 3) наибольшую плавность операций; 4) устойчивость работы; 5) надежность работы; 6) простоту обслуживания; 7) компактное размещение; 8) наименьший расход энергии; 9) экономичную стоимость.

С точки зрения обеспечения надлежащих динамических режимов электропривода эти свойства характеризуются осуществлением требуемых графиков скорости вращения n , вращающего момента M , силы тока I , пройденного пути L в зависимости от времени.

Первостепенное значение при этом имеют задачи получения наибольшей производительности при высоком качестве продукта. Эти условия наилучшим образом выполняются при тщательном согласовании статических и динамических свойств рабочей машины и электропривода и при соответствующем конструктивном оформлении двигателей и аппаратуры управления. При этом необходимо пользоваться следующими путями и направлениями: 1) тщательным анализом кинематических связей некоторых вновь проектируемых механизмов в целях уменьшения гнезд трения; 2) рациональным выбором передаточного числа

между двигателем и механизмом или его звеньями; 3) рациональным выбором рода тока для привода и случае регулируемых механизмов и механизмов полтарно-кратковременного режима; 4) применением специализированных по производствам (а иногда и по рабочим машинам) конструктивных типов электродвигателей; 5) рациональным подбором мощности двигателей; 6) рациональным подбором механических и электромагнитных параметров двигателей, в особенности при переменном режиме работы; 7) целесообразным выбором принципа схемы управления; 8) тщательным выбором типа аппаратуры управления и регулирования.

2. Последовательность проектирования электроприводов

Рациональное проектирование современного электропривода требует глубокого знакомства с условиями работы исполнительного механизма и его кинематикой. Лишь в этом случае может быть достигнуто наилучшее сочетание статических и динамических свойств исполнительного механизма и двигателя и получена наибольшая производительность рабочего агрегата при высоком качестве продукции или высоком качестве производимых им операций. При этом прежде всего приходится решать вопрос о выборе между двигателями с нерегулируемой или регулируемой скоростью. Этот момент тесно соприкасается с кинематикой рабочей машины и требованиями ее технологического процесса. Одни механизмы могут требовать двигателей с регулируемой скоростью, другие — с нерегулируемой. В зависимости от пределов регулирования скорости и других технологических условий возникает необходимость решения вопроса о выборе рода тока привода — постоянный, переменный трехфазный или смешанные системы. В зависимости от типа двигателя и режима работы механизма приходится соответствующим образом подбирать необходимый комплекс механических (скоростных) характеристик двигателя. Чем сложнее режим работы механизма, тем большее внимание требуется к подбору механических характеристик. Наиболее просто решается вопрос о выборе типа привода для механизмов, работающих при неизменной нагрузке и редко пускаемых в ход. Для механизмов, работающих в напряженном режиме работы с частыми пусками в ход, остановками, переменной нагрузкой, с перегрузками, работающих по специальным графикам скорости, требуется тщательный анализ работы привода. Только в результате такого анализа можно целесообразно выбрать мощность двигателя и необходимый комплекс его характеристик, обеспечивающие нужную производительность механизма и нужное качество работы. При этом приходится обращать особо серьезное внимание на рациональный выбор передаточного числа от двигателя к механизму. Режим работы двигателя и необходимый комплекс механических характеристик тесно связаны с выбором числа и типов аппаратов управления. Намечая комплекс механических характеристик двигателя, уже приходится учитывать возможную аппаратуру управления. Достаточно сказать, что при неавтоматическом и автоматическом управлении число механических характеристик привода берется иным.

В зависимости от условий работы двигателя и аппаратуры в отношении окружающей среды и характера нагрузки приходится решать вопрос

о конструктивном типе двигателя, его защите и вентиляции, о конструктивном типе аппаратуры—открытом, закрытом, герметичном. Можно взять двигатель с механическими характеристиками, вполне подходящими для привода данной рабочей машины, однако применением неподходящей для данного случая аппаратуры управления можно прекрасные свойства двигателя, в отношении достижения высокой производительности механизма, частично свести на-нет.

При практическом решении задач электропривода все перечисленные выше вопросы переплетаются, и в большинстве случаев их приходится рассматривать совместно. Однако в основном их приходится последовательно решать так, как указано выше.

Глава III

Классификация и выбор электродвигателей по способу их защиты от окружающей среды

3. Классификация способов защиты промышленных двигателей от окружающей среды

Основным условием эффективного использования электродвигателей в приводе является надежность работы. Эта надежность должна быть обеспечена в самых разнообразных условиях окружающей среды. В зависимости от условий, в которых работает электродвигатель в промышленном предприятии, часто его приходится защищать от пыли, грязи, дыма, газов, сырости, кислотных паров, высокой температуры и т. д. Совершенно открытые стандартные двигатели могут устанавливаться лишь в абсолютно сухих, чистых, непыльных помещениях, свободных от каких-либо примесей к воздуху, и там, где исключена возможность попадания в двигатель каких-либо посторонних предметов. Во всех остальных случаях во избежание порчи изоляции, уменьшения срока службы и возможных механических повреждений двигатель должен обязательно защищаться от окружающей среды. В случае взрывчатой атмосферы окружающая опасная среда должна быть обязательно защищена от возможных искрообразований в двигателе.

Всякая защита двигателя несколько его удорожает, причем тем больше, чем серьезней и сложней защита. Поэтому во всех случаях практики необходимо применять тот способ защиты, который является наиболее подходящим. Отсюда возникает большое число конструктивных типов электродвигателей, различающихся условиями защиты. Для обеспечения приводом рабочей машины должен быть взят двигатель соответствующей конструкции и защиты. В этом отношении электродвигатели иногда делятся просто по отраслям промышленности. Например, в металлургии применяется металлургический тип, в текстильной промышленности—текстильный и т. д. При конструировании типов двигателей по отраслям промышленности учитывают уже особенности механических характеристик, динамические условия, условия защиты и т. д. Так, например, тяговый электродвигатель, работающий под вагоном трамвая закрытого типа, оказался по конструкции неподходящим для металлур-

гической промышленности, характеризуемой условиями высокой температуры, возможностями больших перегрузок, особенностями ремонта. В свою очередь, металлургический двигатель оказывается непригодным для угольных шахт, опасных по газу, и т. д.

В отношении защиты все электродвигатели могут быть разделены на следующие категории.

I. Открытые машины. Открытой машиной называется такая машина, в которой все вращающиеся и токопроводящие части не имеют специальных защитных приспособлений.

II. Защищенные машины. 1. Защищенной машиной называется такая машина, у которой обмотки и другие части, находящиеся под напряжением или в движении, защищены от случайного прикосновения или проникновения внутрь машины посторонних тел, но таким образом, что свободный обмен воздуха между машиной и окружающей средой не нарушен. Против пыли, влажности и газов, содержащихся в воздухе, машины этого вида не защищены.

2. Защищенной от падения капель сверху (капежа) машиной называется такая, которая, кроме защиты согласно пункту 1, имеет приспособление, исключающее возможность попадания в машину жидкости и грязи сверху.

3. Защищенной от дождя и брызг называется такая машина, которая, кроме защиты согласно пункту 1, имеет приспособления, предохраняющие от проникновения внутрь машины капель и струй любого направления.

III. Закрытые машины. 1. Закрытой машиной называется такая машина, которая не является абсолютно герметической, не имеет никаких других отверстий, кроме отверстий для болтов, скрепляющих отдельные механические части, и для вывода проводов, или же имеет только отверстия, которые защищены крышками, препятствующими проникновению воздуха из машины и окружающее пространство и обратно.

2. Закрытой вентилируемой машиной называется закрытая машина с независимым охлаждением. Охлаждающая среда подводится посредством труб или других аналогичных приспособлений.

3. Герметически закрытой машиной называется машина, имеющая плотно закрытый корпус, не допускающий проникновения влаги внутрь машины при полном погружении в воду в течение 4 часов.

IV. Машины с защитой против взрыва. 1. Машиной с защитой против взрыва называется машина, снабженная специальным кожухом, который может противостоять без повреждения взрывам газа внутри машины и не передает пламени воспламеняющегося газа вне ее, и наоборот.

2. Машиной с защитной противовзрывной оболочкой для колец называется такая (асинхронная) машина, в которой кольца и щетки заключены в специальную оболочку, могущую противостоять взрыву газов внутри ее и препятствующую выбиванию пламени вне ее.

В тех случаях, когда машина не имеет никаких специальных приспособлений для охлаждения, она называется машиной с естественным охлаждением. Если охлаждение машины достигается вентилятором или каким-либо приспособлением, составляющим с вращающей

Классификация электродвигателей по способу защиты от окружающей среды¹

Выполн:	С нормальной изоляцией			С противосырьственной изоляцией		
	с короткозамкнутым ротором	с контактными кольцами	крановые	постоянного тока	крановые	постоянного тока
Открытые	ТАК, АМ МА-220	АМ МА-220	КТО КПД	МП-520 МП-600	АМ МА-220	КТОШ КПД
Защищенные	АД, АДФ ФАД, МА-00 ТС-1, ФТО МКБ[с]-2	МА-200 МКА[с]		МА-500 МА-510 МП-550	ПАДАДФ, ФАД МА-200, АДО АДОФ, ФАДО МКБ[с], ТС-2	МП-500 МП-510 МП-550
Защищенные от дождя и брызг (каплеж)	МКБ[с], гАМ МА-200 МА-220	МКА[с] МА-200 АМ			МКБ[а] МА-200	
Продуваемые	МКБ[п], гАМО МА-200 МА-220	МКА[п], АМО МА-200 МА-220		МП-510 МП-600	МКБ[п], гАМО МА-200 МА-220	МП-510 МП-600
Закрытые	МКБ[к], ФТ МА-140	МКА[к] МА-140	КТК КТ КПД	МП-500 МП-510 МП-550	МКБ[к] ТТ, МА-140	КТК КТШ КПД
Взрывобезопасные	ТАГ, БАО-2 МА-140 МА-170	МА-140		МП-500	ТАГ, БАО-2 МА-140 МА-170	МП-500
Герметические		АЗГ				

¹ Классификация соответствует выпуску машин в СССР к началу Великой Отечественной войны.

частью машины одно целое, она носит название машины с самовентиляцией. В машине с посторонним охлаждением охлаждающая среда подается вентилятором, работающим независимо от машины. Здесь возможны две категории: 1) машины с воздушным охлаждением; 2) машины с замкнутой циркуляцией стали применять углекислоту.

Разработанная Электропромом классификация двигателей, выпускавшихся перед Великой Отечественной войной заводами СССР, по способу защиты от окружающей среды представлена в табл. 1.

4. Выбор типа электродвигателей в зависимости от характера окружающей среды

Разработанные Электропромом указания по выбору способа защиты двигателей, выпускаемых заводами СССР, в зависимости от характера окружающей среды представлены в табл. 2.

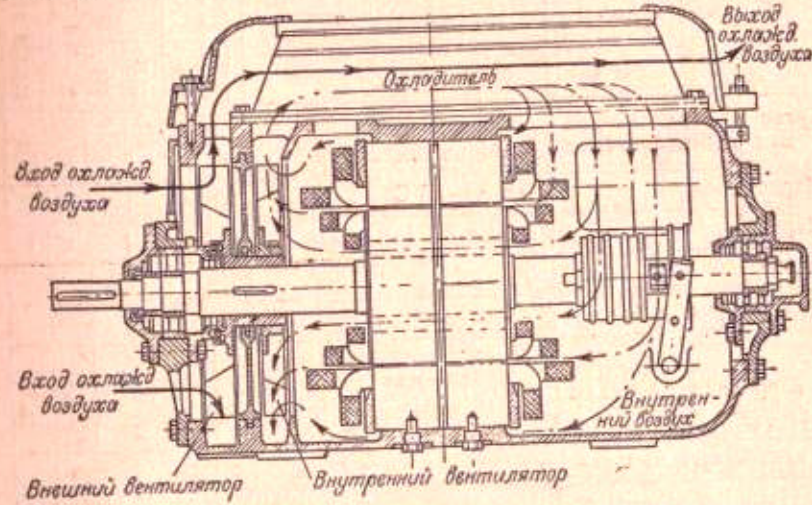


Рис. 6. Схема замкнутой вентиляции закрытого двигателя.

Технические данные, некоторые параметры и габариты двигателей приведены в соответствующих каталогах, выпускаемых Главэнергопромом. Необходимо иметь в виду, что при пользовании для расчетов привода механическими характеристиками двигателей нужно брать эти характеристики обязательно для соответствующего конструктивного типа.

Электромашиностроительные заводы мира усиленно работают в направлении усовершенствования двигателей противосырьственных, противокислотных, газобезопасных, для работы в пыльной среде, бесшумных. Безопасные двигатели имеют наибольшее значение для угольной, коксовой, нефтяной, алюминиевой, магниевой, химической промышленности. В настоящее время закрытые двигатели применяются уже для сравнительно больших мощностей, в частности, с внутренней циркуляцией и охлаждающим кожухом (например до мощности в 1250 квт, 720 об/мин). В отдельных, особо опасных, случаях применяются двигатели, наполненные инертным газом,

Выбор типа электродвигателей в зависимости

от характера окружающей среды

Характеристика помещения и среды		Открытый		Защищенный					
		нормальная изоляция		противосростная изоляция					
		кз	кк	кз	кк				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
По электротехническим правилам и нормам	Дополнительные данные о помещении	ТАКЗ, ГАМ	АМ	ГАМ	АМ	АД, М-2, ТС МА-200, МКБ(с)	МА-200, МКА(с)	АД, АДО, МА-200 МКБ(с)	МА-200, МКА(с)
Сухое отапливаемое или неотапливаемое	Электромашинные Прочие помещения	×	×			×	×		
Жаркое	до 30—35°C	×	×			×	×		
Жаркое	выше 35°C	о	о			о	о		
Сырое				×	×			×	×
Особо сырое								о	
С непроводящей пылью	Пыль, негорючая, легко удаляемая	×	×			×	×		
	Пыль негорючая, тяжело удаляемая							о	
С проводящей пылью		о				о			
Пожароопасное	1 степень Пыль, легко удаляемая								
	2 степень Пыль, тяжело удаляемая								
Взрывоопасное	1 степень								
	2 степень	×							
С едкими парами или газами									
Вне здания	На открытом воздухе								
	Под крышей			о	о			о	о

Характеристика помещения и среды		Закрытый		Закрытый с вентиляцией		Защищенный от капель		Взрывобезопасный		Герметический				
		нормальная изоляция		противосростная изоляция		противосростная изоляция		нормальная изоляция						
		кз	кк	кз	кк	кз	кк	кз	кк					
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
По электротехническим правилам и нормам	Дополнительные данные о помещении	ТАКЗ, ГАМ	АМ	ГАМ	АМ	АД, М-2, ТС МА-200, МКБ(с)	МА-200, МКА(с)	АД, АДО, МА-200 МКБ(с)	МА-200, МКА(с)	ТАК, БАО-2, МА-140 МА-170	МА-140	ТАК, БАО, МА-140, МА-170	МА-140	АЗГ
Сухое отапливаемое или неотапливаемое	Электромашинные Прочие помещения	×	×			×	×							
Жаркое	до 30—35°C	×	×			×	×							
Жаркое	выше 35°C	о	о			о	о	×	×					
Сырое				×	×									
Особо сырое								×	×					
С непроводящей пылью	Пыль, негорючая, легко удаляемая	×	×			×	×							
	Пыль негорючая, тяжело удаляемая													
С проводящей пылью		о				о								
Пожароопасное	1 степень Пыль, легко удаляемая					×	×							
	2 степень Пыль, тяжело удаляемая					о	×							
Взрывоопасное	1 степень									×	×	×	×	×
	2 степень	×								о	о	о	о	о
С едкими парами или газами														
Вне здания	На открытом воздухе													
	Под крышей			о	о			о	о					×

Примечание. × — рекомендуемый о — допускаемый кз — с короткозамкнутым ротором кк — с контактными кольцами

Таблица составлена перед началом Великой Отечественной войны.

например углекислотой. На рис. 6 представлена схема замкнутой вентиляции закрытого двигателя. Охлаждение в нем производится двумя вентиляторами, из которых один расположен внутри машины, а другой — вне закрытого кожуха двигателя. Этот последний вентилятор обдувает корпус двигателя. Оба вентилятора вращаются самим двигателем.

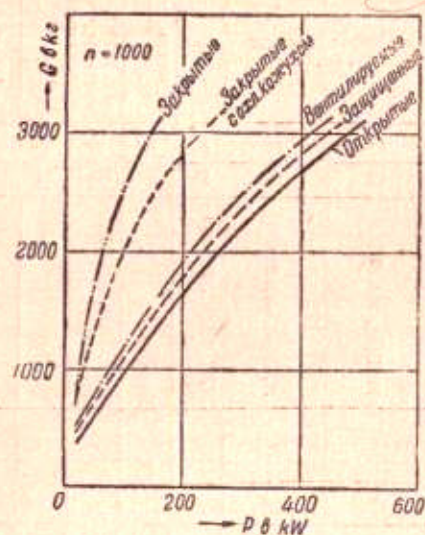


Рис. 7. Соотношение весов двигателей при разных видах конструктивной защиты.

На рис. 7 представлено соотношение весов различных типов асинхронных двигателей малых мощностей на 1000 об/мин. Рисунок показывает, что к закрытому двигателю или двигателю с охлаждаемым кожухом без необходимости прибегать не следует.

Глава IV

Механические свойства двигателей постоянного тока

5 Роль механических характеристик электродвигателей в электроприводе

Механическими характеристиками электродвигателей называются зависимости вращающего момента двигателей M_d от скорости вращения, т. е. от числа оборотов в минуту n . В зависимости от схемы включения двигателя в данный момент времени он работает на той или другой механической характеристике $M_d = f(n)$ или $I = \varphi(n)$. Количество характеристик, которое можно получить от двигателя в конкретном электроприводе, зависит от примененной схемы включения.

Характеристики могут быть выражены или аналитически или графически. Если они получены по точкам, соответствующим неизменной нагрузке двигателя, установившимся режимам, то они носят название статических характеристик. В переходных режимах (пуск в ход, торможение, регулирование) характеристики, носящие название динамиче-

ских, несколько отличаются от статических за счет явлений самоиндукции и взаимной индукции. Графическое представление дается нормально для статических характеристик.

Механические характеристики двигателей определяют собой протекание переходных режимов электрифицированных агрегатов, а следовательно, непосредственно влияют на производительность агрегатов, плавность процессов, качество продукции. Различные рабочие машины предъявляют весьма разнообразные требования к механическим характеристикам двигателей. В ряде случаев лишь специальные комбинации механических характеристик двигателей могут обеспечить подчас чрезвычайно сложные условия протекания работы привода по тому или иному графику. Получаемый в электроприводе комплекс механических характеристик зависит от применяемой схемы включения двигателя, от введенных в нее сопротивлений.

6. Вращающий момент электродвигателей постоянного тока

При приключении двигателя постоянного тока к сети между проводниками якоря с током и возникающим при этом полем полюсов получается взаимодействие, силу которого можно вычислить по закону Био-Савара. На основании этого закона усилие Q , действующее на проводник с током в I ампер, если проводник расположен перпендикулярно магнитным линиям (как то имеет место в машине) с напряжением поля, равным магнитной индукции B

$$Q = \frac{B \cdot l \cdot I}{10} \text{ дин.}$$

Если активная длина проводника якоря, т. е. та, которая находится в магнитном поле в железе якоря, равна l_a , то

$$Q = B \cdot l_a \cdot I \cdot 10^{-1} = B \cdot l_a \cdot \frac{I}{2a} \cdot 10^{-1} \text{ дин,}$$

где I_a — сила тока в проводнике якоря, I — общая сила тока машины, $2a$ — число параллельных ветвей обмотки якоря машины.

Если диаметр окружности якоря D , а число проводников на якоре N , то вращающий момент M двигателя в килограммометрах будет:

$$M_d = Q \cdot \frac{D}{2} \cdot N = B \cdot l_a \cdot \frac{I}{2a} \cdot 10^{-3} \cdot \frac{D}{2} \cdot N \cdot \frac{1}{981 \cdot 1000} = B \cdot l_a \cdot I \cdot N \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2p\tau}{\pi} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{981 \cdot 1000} \cdot \frac{1}{2a},$$

где τ — так называемое полюсное деление, равное $\frac{\pi D}{2p}$, а p — число пар полюсов машины.

Отсюда получаем:

$$M_d = \frac{1}{981 \cdot \pi} \cdot 10^{-3} \cdot B \cdot l_a \cdot \tau \cdot I \cdot N \cdot \frac{p}{2a} \text{ кгм.} \quad (1)$$

Так как произведение $B \cdot l_a \cdot \tau = \Phi$ представляет магнитный поток машины, а произведение $\frac{1}{981 \cdot \pi} \cdot 10^{-3} \cdot N \cdot \frac{p}{2a} = \text{const} = c$ для данной ма-

шины величина постоянная, то вращающий момент двигателя постоянного тока выражается равенством

$$M_d = c \cdot \Phi \cdot I, \quad (2)$$

где Φ — результирующий поток машины из потока полюсов и потока якоря.

Таким образом, вращающий момент, развиваемый двигателем постоянного тока, пропорционален результирующему потоку машины Φ и току якоря I . Двигатель работает с равномерной скоростью лишь тогда, когда развиваемый им полезный момент уравновешен статическим моментом нагрузки M_m .

Если это равенство вращающих моментов электрифицированного рабочего агрегата в какое-либо мгновение не будет соблюдено, то двигатель для достижения равновесия, т. е. равенства $M_d = M_m$, ускорится или замедлится. Переход от одного неустойчивого положения к другому носит название переходного режима. Движение в переходном режиме происходит по известному из механики дифференциальному уравнению

$$M_d - M_m = J \cdot \frac{d\omega}{dt},$$

где J — приведенный к оси двигателя момент инерции всех вращающихся масс агрегата (двигатель — рабочая машина), а ω — угловая скорость двигателя. При уменьшении нагрузки, т. е. M_m , M_d становится больше M_m , $\frac{d\omega}{dt}$ — положительно, двигатель ускоряется, сила тока в нем и момент, развиваемый им, падают, пока не будет достигнуто равенство $M_d = M_m$. При увеличении нагрузки M_d становится меньше M_m , $\frac{d\omega}{dt}$ — отрицательно, двигатель замедляет свой ход. Ток двигателя и момент его при этом повышаются опять до восстановления равновесия между M_d и M_m . Двигатель, согласно свойству саморегулирования, устанавливает автоматически такое число оборотов в минуту n , при котором $M_d = M_m$. Таким образом в двигателе, выполняющем механическую работу, наиболее характерными величинами являются, прежде всего, число оборотов в минуту n и вращающий момент M_d . Связь этих двух величин и представляется механическими характеристиками.

7. Различные возможные режимы работы шунтовой машины постоянного тока

Шунтовая машина постоянного тока в приводе может работать в четырех основных режимах. Пояснение включений машины для всех режимов представлено на рис. 8. Сила протекающего через якорь машины тока I определяется по закону Ома:

$$I = \frac{U - E}{R}, \quad (3)$$

где U — напряжение, приложенное к цепи якоря двигателя, E — индуцированная в двигателе обратная э. д. сила, а R — омическое сопротивление цепи якоря двигателя. Обратная э. д. сила двигателя

$$E = c_1 \cdot n \cdot \Phi, \quad (4)$$

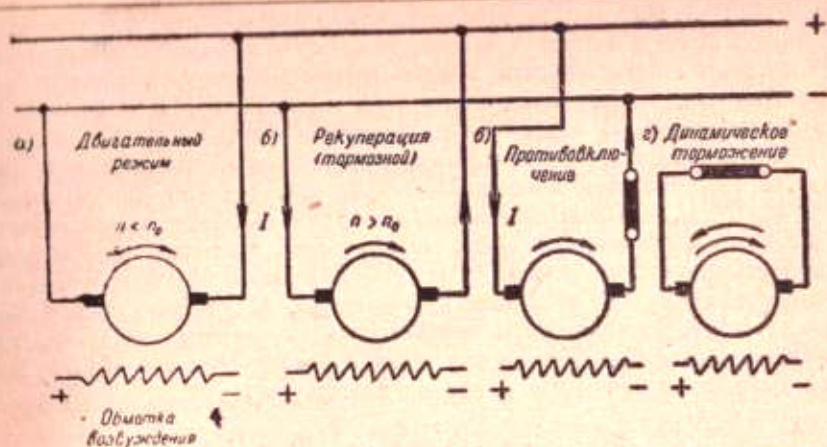


Рис. 8. Схемы включения шунтовой машины при разных режимах ее работы.

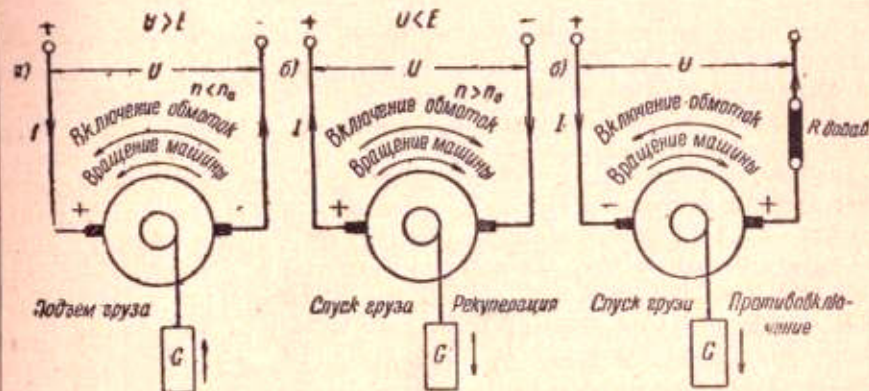


Рис. 9. Работа шунтовой машины на подъемнике в разных режимах.

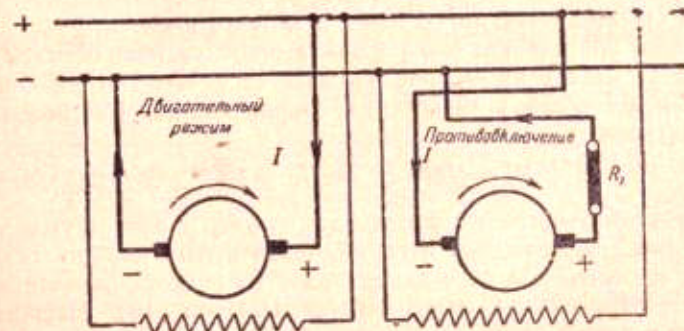


Рис. 10. Переход машины с двигательного режима на режим противовключения.

где Φ — магнитный поток двигателя, а n — число оборотов его якоря в минуту. Если n двигателя таково, что $E < U$, то машина работает двигателем, и ток идет из сети в машину (рис. 8,а и 9,а). Если n будет увеличено так, что E станет больше U , то машина (без изменения направления вращения) начнет работать генератором, посылая ток в сеть (рис. 8,б и 9,б). Это может иметь место, например, при спуске в кране груза. Груз, спускаясь, может вращать машину с такой скоростью, при которой $E > U$. С точки зрения работы привода этот режим является тормозным режимом, так как он не способствует вращению агрегата, а создает тормозный момент. Так как при этом машина возвращает (рекуперирует) в сеть электрическую энергию, получаемую преобразованием от груза, то этот режим называется режимом рекуперативного торможения. Переход из режима двигателя в режим генератора (рекуперации) происходит при числе оборотов в минуту n_0 .

При $E = U$

$$E = c_1 \cdot n_x \cdot \Phi = c_1 \cdot n_0 \cdot \Phi = U,$$

следовательно

$$n_0 = \frac{U}{c_1 \cdot \Phi}. \quad (5)$$

Это число оборотов в минуту n_0 носит название числа оборотов идеального холостого хода. При n_0 сила протекающего через машину тока равна нулю.

Тормозные режимы необходимы в двигателях и для получения быстрой остановки механизма и для быстрого перехода от одного режима к другому. Кроме рекуперативного возможны два других вида торможения: а) торможение противовключением и б) торможение динамическое. При противовключении машина вращается (например грузом) в сторону обратную той, для которой включены ее обмотки. Пояснение дает рис. 9,в. При этом э. д. сила E уже не вычитается из приложенного напряжения U , а суммируется с ним. Сила тока в двигателе

$$I = \frac{U + E}{R}.$$

Подобный режим работы может быть осуществлен лишь при наличии в цепи двигателя особого добавочного сопротивления. Иначе сила тока двигателя станет чрезмерно большой и недопустимой.

В режиме противовключения машина получает мощность как от сети P_1 , так и от механизма P_2 и превращает ее в тепло в обмотке якоря двигателя и введенном в цепь якоря сопротивлении. Потребленная при этом двигателем суммарная мощность

$$P = P_1 + P_2 = UI + EI = I^2 R = I^2 (R_{\text{як.}} + R_{\text{добав.}}).$$

Режим противовключения может быть получен и при отсутствии такой нагрузки, как спускающийся груз. Если нам нужно быстро остановить механизм, то мы можем переключить одну из обмоток двигателя, введя в цепь соответствующее сопротивление R_1 (рис. 10). Машина будет переведена в режим противовключения.

В случае динамического торможения (рис. 8,з) обмотка якоря машины отключается от сети и замыкается на сопротивление. Обмотка возбуждения остается подключенной к сети. При этом машина, получая энер-

гию от механизма обычно за счет его живой силы, работает генератором, отдавая энергию в сопротивление. Указанные три вида электрического торможения принципиально применимы не только в шунтовых двигателях постоянного тока, но и во всех типах электродвигателей постоянного и переменного тока вообще. Только для одних типов оказываются более целесообразными одни режимы торможения, для других — иные.

Электрическое торможение в приводах применяется тогда, когда требуется быстрая и точная остановка. Каждый вид электрического торможения обуславливает особые механические тормозные характеристики. Использование электрического торможения в часто пускаемых в ход приводах вызывает всегда повышение потребной мощности двигателя по сравнению с работой без электрического торможения, так как во время последнего в двигателе выделяются потери.

8. Введение относительных величин в расчет механических характеристик

Расчет механических характеристик двигателей и пользование ими значительно упрощаются, если при этом применить не абсолютные единицы, а относительные. Подобная методика расчета дает возможность легко переносить расчеты с одного какого-либо габарита двигателя на другой того же типа. При этом вращающие моменты двигателя M_d выражаются в долях или процентах от номинального момента двигателя M_N , а число оборотов двигателя n выражается в долях или процентах от числа оборотов в минуту идеального хода n_0 .

Согласно ГОСТ 183—41, „номинальным режимом работы электрической машины называется режим работы при условиях, для которых она предназначена изготовившим ее заводом. Номинальный режим работы характеризуется величинами, обозначенными на заводском щитке машины и называемыми номинальными, как-то: номинальная мощность, номинальное напряжение, номинальный ток, номинальный коэффициент мощности, номинальная скорость вращения, номинальная частота, номинальный ток возбуждения и т. д.“ Термин „номинальный“ может применяться и к величинам, не указанным на заводском щитке машины, но относящимся к номинальному режиму работы, например: номинальный момент вращения, номинальный коэффициент полезного действия и т. д.“ „Номинальной мощностью двигателей называется полезная механическая мощность на валу, выраженная в ваттах (W), киловаттах (kW) или мегаваттах (MW).“

Вращающий момент, выраженный в относительных единицах,

$$\mu = \frac{M_d}{M_N}$$

и в процентах

$$\mu^0/0 = \frac{M_d}{M_N} \cdot 100^0/0.$$

Соответственно, число оборотов в минуту, выраженное в относительных единицах,

$$v = \frac{n}{n_0}$$

и в процентах

$$v^0/0 = \frac{n}{n_0} \cdot 100^0/0.$$

Пользование относительными единицами дает существенные преимущества. Так, если несколько шунтовых двигателей постоянного тока имеют одно и то же процентное изменение скорости между идеальным холостым ходом (n_0) и полной нагрузкой (n_N), т. е. $\frac{n_0 - n_N}{n_0} \cdot 100^0/0 = \text{const}$, то механическая характеристика этих двигателей, выраженная в единицах или процентах, представится для всех этих двигателей одной и той же прямой $v^0/0 = f(v^0/0)$.

Вместо числа оборотов в минуту скорость двигателей можно характеризовать скольжением $\sigma = \frac{n_0 - n}{n_0}$.

Скольжение в процентах:

$$\sigma^0/0 = \frac{n_0 - n}{n_0} \cdot 100^0/0 = \left(100 - \frac{n}{n_0} \cdot 100\right)^0/0 = (100 - v^0/0)^0/0.$$

При расчете механических характеристик приходится пользоваться также относительными величинами напряжения, тока и сопротивления.

Под относительным напряжением понимают величину

$$u = \frac{U}{U_N},$$

где U_N — номинальное (паспортное) напряжение на зажимах двигателя.

Напряжение в процентах:

$$u^0/0 = \frac{U}{U_N} \cdot 100^0/0.$$

Относительный ток

$$i_\psi = \frac{I}{I_N}, \text{ а } i_\psi^0/0 = \frac{I}{I_N} \cdot 100^0/0,$$

где I_N — номинальный (паспортный) ток двигателя. Кроме того, в расчеты приходится вводить еще особое понятие о номинальном (фиктивном) сопротивлении машины. Для двигателей постоянного тока всех типов под номинальным сопротивлением понимается такое сопротивление якорной цепи, через которое при номинальном напряжении сети U_N и неподвижном якоре пойдет ток I_N

$$R_N = \frac{U_N}{I_N}.$$

Номинальное сопротивление во много раз больше сопротивления обмотки якоря. Относительное сопротивление

$$\rho = \frac{R}{R_N}$$

и сопротивление в процентах

$$\rho^0/0 = \frac{R}{R_N} \cdot 100^0/0.$$

Приведенные определения относительных величин относятся ко всем двигателям постоянного тока.

9. Двигательные механические характеристики шунтовых двигателей постоянного тока и их расчет

Число оборотов в минуту шунтового двигателя постоянного тока выражается, как известно, равенством:

$$n = \frac{U - I \cdot R}{c_1 \cdot \Phi}. \quad (6)$$

Это равенство получается из условия равновесия напряжения, э. д. силы и омического падения напряжения в главной цепи двигателя.

$$I = \frac{U - E}{R} = \frac{U - c_1 \cdot n \cdot \Phi}{R},$$

где R — сопротивление главной цепи двигателя, состоящее из сопротивлений обмотки якоря и добавочного.

Вращающий момент двигателя

$$M_d = c_2 \cdot I \cdot \Phi. \quad (7)$$

Так как в шунтовом двигателе для каждой характеристики $\Phi = \text{const}$, то $M_d = k_1 \cdot I$, где k_1 — постоянная, равная $c_2 \cdot \Phi$. Подставляя в равенство (7) выражение для I и учитывая, что $U = c_1 \cdot n_0 \cdot \Phi$, получим:

$$M_d = k_1 \cdot \frac{c_1 \cdot n_0 \cdot \Phi - c_1 \cdot n \cdot \Phi}{R} = \alpha - \beta n, \quad (8)$$

где α и β — постоянные, зависящие от параметров машины и сопротивления якорной цепи R и равные

$$\alpha = \frac{k_1 \cdot c_1 \cdot n_0 \cdot \Phi}{R}; \quad \beta = \frac{k_1 \cdot c_1 \cdot \Phi}{R}.$$

Таким образом, все двигательные механические характеристики шунтового двигателя являются прямыми линиями. Семейство таких характеристик при $\Phi = \text{const}$ для разных значений R представлено на рис. 11. Чем больше сопротивление, введенное в цепь якоря двигателя, тем круче идет характеристика. Характеристика без добавочного сопротивления в цепи якоря называется естественной, остальные — искусственными.

Значения коэффициентов α и β могут быть найдены по данным двигателя:

$$\begin{aligned} \text{При } M_d = 0 & \quad n = n_0 \\ \text{При } M_d = M_N & \quad n = n_N \end{aligned}$$

В таком случае после подстановки в равенство (8) получаем:

$$\alpha = \frac{M_N \cdot n_0}{n_0 - n_N}; \quad \beta = \frac{M_N}{n_0 - n_N}.$$

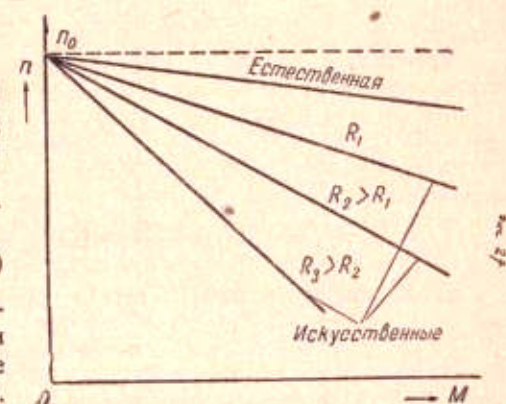


Рис. 11. Двигательные механические характеристики шунтовой машины.

Механическая характеристика двигателя, выраженная в процентах, получится следующим образом:

$$n = \frac{U}{c_1 \Phi} - \frac{IR}{c_1 \Phi} = \frac{U}{c_1 \Phi} - \frac{M \cdot R}{k_1 \cdot c_1 \cdot \Phi} = n_0 - \frac{M \cdot R}{k_1 \cdot c_1 \cdot \Phi};$$

разделив на n_0 , получим:

$$\frac{n}{n_0} \cdot 100\% = \left(\frac{n}{n_0} \cdot 100 - \frac{M \cdot R}{k_1 \cdot c_1 \cdot n_0 \cdot \Phi} \cdot 100 \right) \%,$$

откуда

$$v\% = 100\% - \frac{M \cdot R}{k_1 \cdot c_1 \cdot n_0 \cdot \Phi} \cdot 100\%.$$

Произведем некоторое преобразование со вторым членом правой части, исходя из того, что $U_N = c_1 n_0 \cdot \Phi$,

$$\frac{M \cdot R}{k_1 \cdot U_N} = \frac{M \cdot R}{k_1 \cdot I_N \cdot R_N} = \frac{M}{M_N} \cdot \frac{R}{R_N} = \mu \cdot \rho,$$

получаем:

$$v\% = 100\% - \mu \cdot \rho \cdot 100\% = 100\% - \frac{\mu^0\% \cdot \rho^0\%}{100}. \quad (9)$$

Вводя для шунтового двигателя понятие скольжения σ

$$\sigma = \frac{n_0 - n}{n_0}, \quad (10)$$

можно из (8) получить другое выражение для механической характеристики, а именно $M_d = \alpha \cdot \sigma$. Учитывая равенства (8, 9 и 10), можно написать:

$$\sigma^0\% = 100\% - v^0\%, \quad (11)$$

$$\sigma^0\% = \frac{\mu^0\%}{100} \cdot \rho^0\%. \quad (12)$$

Если мы будем рассматривать точки характеристик двигателя, соответствующие номинальному моменту, т. е. $\mu^0\% = \mu_N^0\% = 100\%$, то для них получим:

$$\sigma^0\% = \rho^0\% \text{ и } v^0\% = (100 - \rho^0\%) \%, \quad (13)$$

т. е. при номинальном моменте скольжение двигателя в процентах равняется сопротивлению главной цепи двигателя в процентах. Эти равенства дают возможность простого расчета механических характеристик двигателей.

Для расчета может быть и использовано равенство (9). Разложим в нем сопротивление якорной цепи $\rho^0\%$ на сопротивление собственно обмотки якоря ρ_d и внешнее добавочное сопротивление ρ_x . Получим:

$$v^0\% = 100\% - \frac{\rho_d^0\% + \rho_x^0\%}{100} \cdot \mu^0\%. \quad (9')$$

Наиболее удобно расчет может быть произведен графически (рис. 12).

Рассматриваемые характеристики являются пусковыми характеристиками двигателя. Они могут быть использованы для регулировки лишь в том случае, если включаемые в цепь якоря сопротивления будут рассчитаны на длительную работу. Пусковые сопротивления, как

известно, на такую работу не рассчитываются. Для расчета пусковых характеристик необходимо задаваться предельными колебаниями момента двигателя при пуске, т. е. предельным изменением величины μ от μ_1 до μ_2 . При мощности двигателей до 100 квт можно обычно принимать наибольший момент μ_1 равным $(1,55 \div 1,45) \cdot \mu_N$, наименьший момент $\mu_2 = (1,11 \div 1,17) \mu_N$.

Далее расчет ведется графически. Двигатель в положении покоя развивает момент μ_1 . Соответствующая μ_1 точка при $v=0$ принадлежит определенной механической характеристике двигателя. Так как, согласно равенству (8) и рис. 11, все характеристики прямые и проходят через

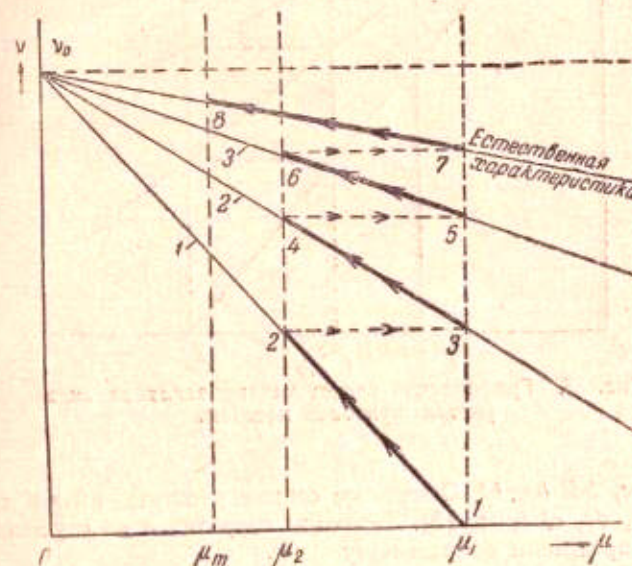


Рис. 12. Механические характеристики шунтового двигателя в относительных единицах.

точку $v = v_0 = 100\%$, то первую характеристику мы можем получить, проводя прямую через точки 100% (v_0) на оси ординат и точку $\mu_1^0\%$ на оси абсцисс. Будучи включен в сеть, двигатель начнет разгоняться по этой характеристике и постепенно повышать скорость, пока не достигнет точки 2, соответствующей $\mu_2^0\%$. По ее достижении двигатель переключается аппаратом управления в точку 3, где $\mu^0\% = \mu_1^0\%$. Так как за время переключения скорость двигателя практически измениться не может, то переход на вторую характеристику происходит по горизонтали. Далее разгон будет идти по второй характеристике до точки 4, соответствующей $\mu^0\% = \mu_2^0\%$. Здесь снова произойдет переключение, и так далее до естественной характеристики, до той ее точки, в которой момент двигателя μ_d будет уравновешен моментом нагрузки μ_m . Согласно равенству (9), при $\mu_d^0\% = 100\%$ сопротивление $\rho^0\% = 100 - v^0\%$. Поэтому вертикальные отрезки ординат в процентах при $\mu = 100\%$ дают непосредственно полные сопротивления отдельных ступеней в процентах и сопротивления отдельных ступеней реостата в цепи якоря в процентах.

Сопротивления отдельных ступеней характеристик (на рис. 13 — четырех) даются соответственно ординатами af , ae , ad , ac , ab , сопротивления же отдельных ступеней пускового реостата, получаемые вычетом из указанных сопротивлений сопротивления обмотки якоря ab , даются

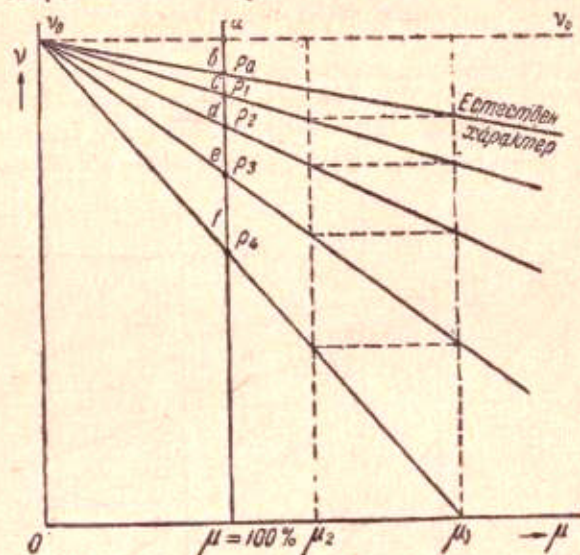


Рис. 13. Графический расчет механических характеристик шунтовой машины.

ординатами bc , bd , be , bf . Отдельные секции реостата имеют сопротивления bc , cd , de , ef (рис. 13). Величины сопротивлений ступеней в омах могут быть определены по равенству

$$R_x = \frac{p_x^0/0}{100} \cdot R_N. \quad (14)$$

10. Тормозные характеристики шунтовых двигателей и их расчет

Весь комплекс механических характеристик шунтового двигателя представлен на рис. 14. В нем первый квадрант охватывает двигательные характеристики, четвертый — характеристики торможения противозключением, второй — характеристики рекуперативного торможения. Из начала координат второго квадранта выходят характеристики динамического торможения. В этом последнем случае при скорости, равной нулю, в машине не индуцируются э. д. силы, и тока в ней не протекает. Чем больше скорость, тем больше ток и больше тормозной момент. Последний также увеличивается с уменьшением введенного в цепь якоря машины добавочного сопротивления. Характеристики рекуперативного торможения являются продолжением двигательных характеристик во втором квадранте, характеристики противозключения — продолжением двигательных характеристик в четвертом квадранте.

Все отличие двигательного режима от рекуперативного заключается в том, что в первом случае $E = c_1 \cdot n \cdot \Phi = U - IR$, и мы получаем

для расчета в относительных единицах равенство (9). Во втором же случае $E = U + IR$, и расчетное равенство по аналогии с (9) получает вид:

$$v^0/0 = 100^0/0 + \frac{E^0/0}{100} \cdot \mu^0/0. \quad (15)$$

Методика расчета сопротивлений для цепи якоря остается та же, что и в двигательном режиме.

В режиме противозключения ток двигателя $I = \frac{U + E}{K}$, т. е., $IR =$

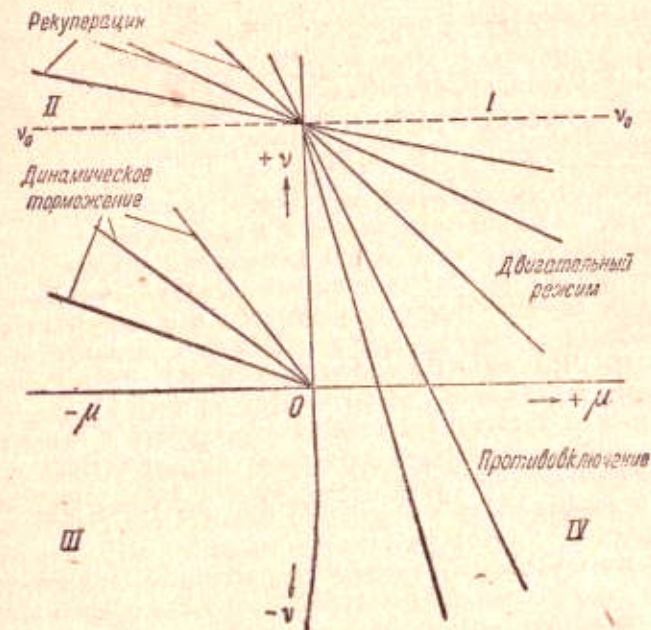


Рис. 14. Комплекс механических характеристик шунтового двигателя постоянного тока.

$= U + E$. Соответственно тормозной момент $M_t = \alpha + \beta \cdot n$. Поэтому расчетные характеристики для этого режима получают вид

$$v^0/0 + 100^0/0 = \frac{E^0/0}{100} \cdot \mu^0/0. \quad (16)$$

Режим противозключения может быть осуществлен лишь при таких сопротивлениях в цепи якоря (больше пусковых), при которых сила тока двигателя не превышает 2—2,5-кратной величины.

При динамическом торможении тормозной момент при $\Phi = \text{const}$

$$M_t = c' \cdot I = c' \cdot \frac{E}{R},$$

где R — сопротивление цепи якоря двигателя. Это сопротивление, включая и сопротивление обмотки якоря двигателя, может быть получено из следующего равенства:

$$\begin{aligned} \rho^0 / \rho &= \frac{R}{R_N} \cdot 100^0 / \rho = \frac{E}{I} \cdot \frac{1}{R_N} \cdot 100^0 / \rho = \\ &= \frac{E}{I} \cdot \frac{1}{R_N} \cdot \frac{I_N \cdot R_N}{U_N} \cdot 100^0 / \rho = \frac{E}{U_N} \cdot \frac{I_N}{I} \cdot 100^0 / \rho = \\ &= \frac{e^0 / \rho}{i_{\phi}^0 / \rho} \cdot 100^0 / \rho, \end{aligned} \quad (17)$$

где e^0 / ρ — э. д. сила машины, выраженная в процентах, а i_{ϕ} — ток якоря, также выраженный в процентах. Так как

$$\begin{aligned} e &= \frac{E}{U_N} = \frac{c_1 \cdot n \cdot \Phi}{c_1 \cdot n_0 \cdot \Phi} = \frac{n}{n_0} = \nu, \text{ т. е. } e^0 / \rho = \nu^0 / \rho, \text{ то} \\ \rho^0 / \rho &= \frac{\nu^0 / \rho}{i_{\phi}^0 / \rho} \cdot 100^0 / \rho. \end{aligned} \quad (18)$$

Основываясь на максимальной допустимой в якоре силе тока, обычно 2—2,5-кратной, и максимальном значении э. д. силы, можно по равенству (18) найти величину сопротивления. В промышленных приводах постоянного тока рекуперативное торможение оказывается возможным принять сравнительно редко, лишь в подъемных установках и в двигателях с регулированием скорости током возбуждения. Последний вариант будет рассмотрен далее. Что же касается выбора между противоякловением и динамическим торможением, то он зависит от целого ряда факторов и прежде всего от требуемой быстроты торможения и точности остановки. Динамическое торможение дает более точную остановку. В свою очередь противоякловение дает более эффективное торможение при одинаковых исходных токах в якоре, что является следствием меньшего изменения момента противоякловения при снижении скорости, в то время как момент динамического торможения постепенно спадает до нуля. В промышленной практике для реверсивных приводов обычно используют противоякловение, для неререверсивных — динамическое торможение из-за большей простоты автоматической схемы управления.

11. Механические свойства серийных двигателей постоянного тока

В серийном двигателе обмотка возбуждения и обмотка якоря соединены последовательно. Вращающий момент серийного двигателя

$$M_d = c \cdot I_a \cdot \Phi_b = c \cdot I_a \cdot f(I_a).$$

Ввиду того, что зависимость между магнитным потоком Φ_b и током возбуждения I_a характеризуется кривой насыщения железа и не может быть представлена аналитически, зависимость эту приходится выражать лишь графически. Точно также не может быть просто аналитически выражена и зависимость для числа оборотов двигателя в минуту

$$n = \frac{U - IR}{c_1 \cdot \Phi_b} = \frac{U - IR}{c_1 \cdot f(I)}$$

Сильное изменение в серийном двигателе потока с нагрузкой вызывает сильное падение скорости двигателя при увеличении нагрузки. При холостом ходе серийный двигатель „разносит“, т. е. его скорость вращения становится выше допустимой по механическим соображениям из-за малого значения магнитного потока. Поэтому серийный двигатель с механизмом через ременную передачу связан быть не может. Характер вращающего момента и скоростной характеристики серийного двигателя делают его наиболее подходящим для работы в различных подъемно-транспортных устройствах — кранах, вспомогательных механизмах металлургических заводов. В практике шунтовую характеристику часто называют жесткой, серийную — мягкой.

В силу невозможности аналитического учета насыщения железа, механические характеристики серийного двигателя в каталогах даются графически. Обычно в каталогах представлены зависимости момента двигателя M_d и скорости вращения n от тока якоря двигателя I для естественной характеристики. Имея последние, можно построить зависимость $M_d = f(n)$. Рис. 15 дает естественные и искусственные характеристики серийного двигателя типа КПД (крановый постоянного тока) завода „Динамо“ для двигательного режима (I квадрант) и режима противоякловения (IV квадрант).

Увеличение добавочного сопротивления, введенного в цепь якоря, вызывает снижение искусственной характеристики. На рис. 16 представлены возможные схемы включения двигателя: a — в двигательном режиме; b — в режиме противоякловения; $г$ — при динамическом торможении и самовозбуждении; $г$ — при динамическом торможении и независимом возбуждении. Перевод двигателя в режим противоякловения может быть получен совершенно плавно (рис. 15). Динамическое торможение при работе машины серийным самовозбужденным генератором получается недостаточно плавным.

Самовозбуждение серийной машины протекает весьма бурно. При малых скоростях, например при спуске груза, машина вообще не возбуждается и не развивает тормозного момента. Бурное самовозбуждение по достижении некоторой скорости вызывает механический удар на исполнительный механизм. Динамическое торможение при самовозбуждении по этим причинам применяются редко. Динамическое торможение с независимым возбуждением (рис. 16, $г$) неэкономично из-за большого расхода энергии в цепи возбуждения, требующей большого тока. Рекуперация энергии в сеть в серийной машине практически невозможна, вследствие неподходящей внешней характеристики $U = f(I)$ серийного генератора. Напряжение в сети постоянного тока (как и в сети переменного тока) всегда поддерживается постоянным. В серийном же генераторе, намагничиваемом током якоря, напряжение сильно меняется в зависимости от нагрузки. Поэтому обычно при использовании серийных двигателей в приводе применяют торможение противоякловением.

Расчет искусственных характеристик серийного двигателя производится по методу так называемой пограничной характеристики. Последняя представляет зависимость между числом оборотов двигателя в минуту и током двигателя при условии равенства нулю сопротивления в цепи якоря двигателя (т. е. с исключением влияния и сопротивления обмоток якоря и возбуждения).

Так называемая пограничная скорость n_g определяется при этом равенством $E = U_N = c_1 \cdot n_g \cdot \Phi$, т. е.

$$n_g = \frac{U_N}{c_1 \Phi}, \quad (19)$$

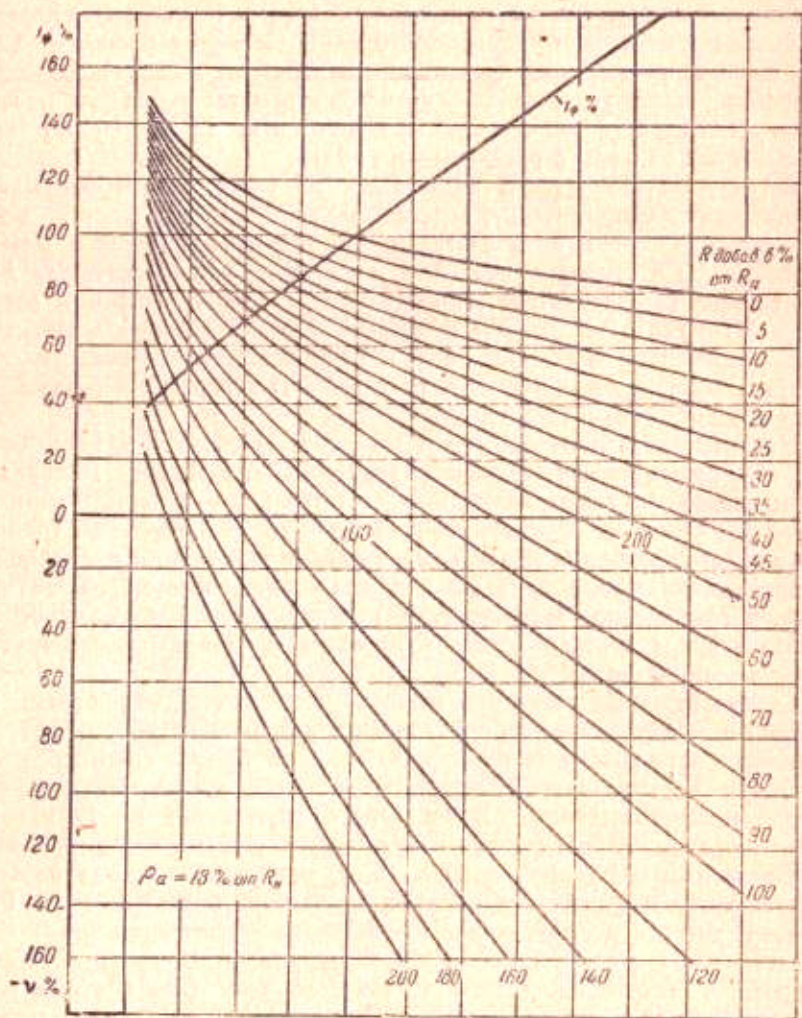


Рис. 15. Естественная и искусственные характеристики серийного двигателя постоянного тока.

так как $IR = 0$. В равенстве (19) Φ — переменный поток двигателя. Так как естественная характеристика при $R \neq 0$ подчиняется равенству

$$n = \frac{U_N - IR_a}{c_1 \cdot \Phi}, \quad (20)$$

то получается следующее соотношение между скоростью пограничной характеристики (19) и естественной характеристикой (20):

$$n_g = n \cdot \frac{U_N}{U_N - IR_a}, \quad (21)$$

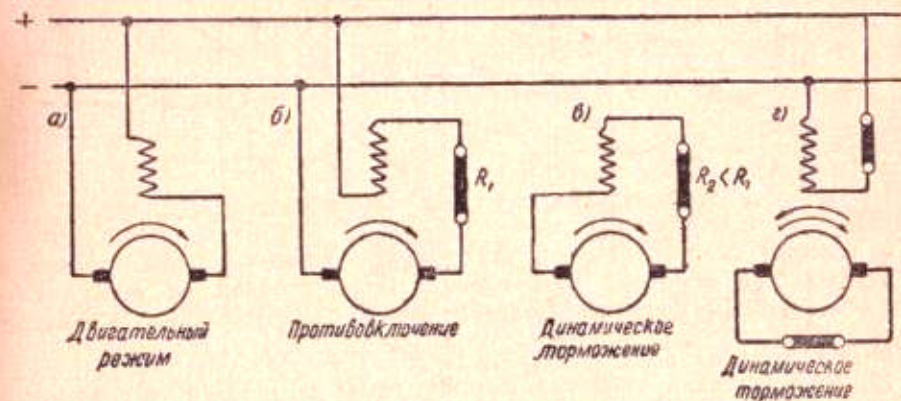


Рис. 16. Возможные схемы включения серийного двигателя.

При введении в цепь якоря добавочного сопротивления R_d число оборотов двигателя в минуту

$$n = \frac{U_N - I(R_a + R_d)}{c_1 \cdot \Phi}. \quad (22)$$

Заменяя из (19) Φ через $\frac{U_N}{c_1 \cdot n_g}$, получим:

$$n = n_g \left[1 - \frac{I(R_a + R_d)}{U_N} \right]. \quad (23)$$

Равенство (23) в соответствии с (9) может быть выражено в относительных единицах или процентах:

$$\begin{aligned} \frac{n}{n_g} &= \frac{n}{n_g} = \\ &= \left(1 - \frac{I \cdot \rho_a}{100 \cdot 100} \right). \quad (24) \end{aligned}$$

Приведенные выражения дают возможность по естественной характеристике построить искусственные характеристики двигателя. Согласно равенству (21) по естественной характеристике строится пограничная (рис. 17), а по пограничной характеристике и равенству (23) или (24) — любая искусственная.

Для получения специальных механических характеристик, требующихся при ползучих скоростях, при более высоких скоростях, чем то дает естественная характеристика, а также для ограничения возможности разноса в подъемно-транспортных устройствах при перемещении груза

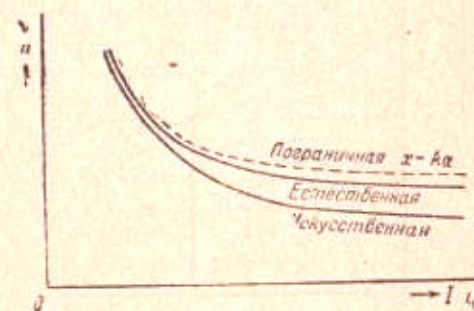


Рис. 17. Естественная, пограничная и искусственная характеристики серийного двигателя.

вниз, в приводах применяются специальные схемы включения серийного двигателя с шунтировкой обмотки якоря или обмотки возбуждения или той и другой совместно. Для повышения скорости двигателя шунтируется обмотка возбуждения, т. е. уменьшается поток двигателя. Для

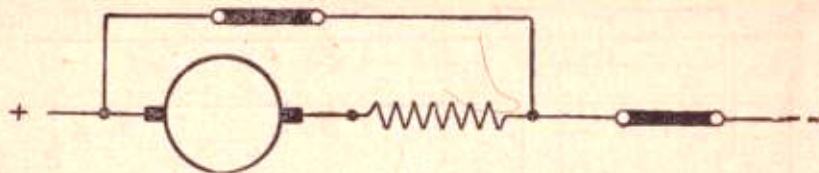


Рис. 1. Специальная схема включения серийной машины.

понижения скорости шунтируется обмотка якоря или обмотка якоря совместно с обмоткой возбуждения. Пример одной из таких схем с обязательным наличием последовательного сопротивления R показан на рис. 18.

12. Механические свойства компаундных двигателей постоянного тока

В отношении механических характеристик компаундный двигатель занимает промежуточное положение между шунтовым и серийным. В нем магнитный поток зависит от главного тока, но в меньшей степени, чем в серийном двигателе. Число оборотов в минуту с увели-

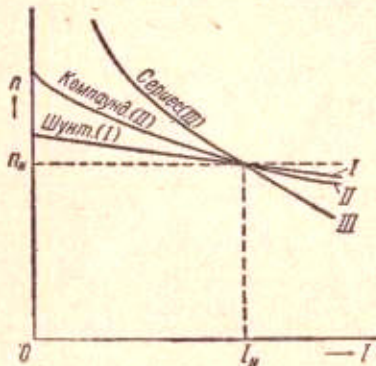


Рис. 19. Зависимость $n=f(I)$ для разных типов двигателей постоянного тока.



Рис. 20. Зависимость $M=f(I)$ для разных типов двигателей постоянного тока.

чением нагрузки снижается меньше, чем в серийном двигателе. Сравнение соответствующих характеристик для трех типов двигателей — шунтового, серийного и компаундного — дано на рис. 19 и 20. Вид характеристик компаундного двигателя зависит от принятого в двигателе соотношения ампервитков серийной и шунтовой обмоток. Чаще всего эти двигатели конструируются так, что ампервитки шунтовой обмотки равны ампервиткам серийной при номинальном токе якоря. Расчет механических характеристик здесь может производиться лишь

графическим путем [Л, 1].¹ Естественные и искусственные характеристики компаундных двигателей типа КПД завода «Динамо» представлены на рис. 21. Для целей торможения в компаундных двигателях используются обычно лишь два режима: 1) противовключение; 2) динамическое

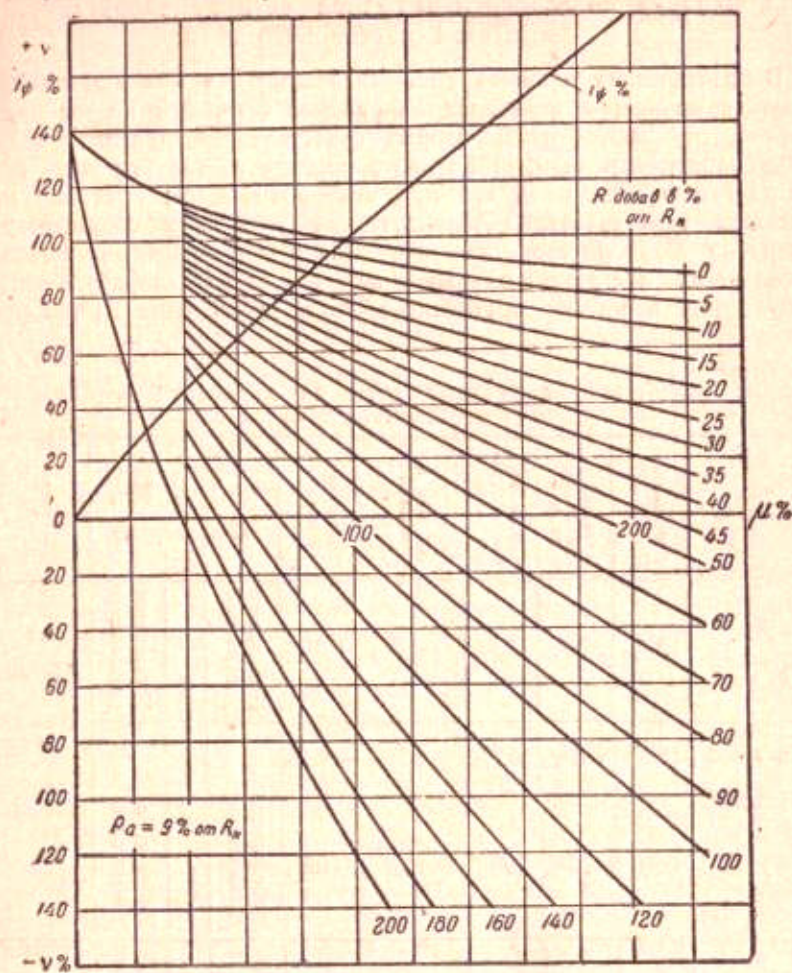


Рис. 21. Естественная и искусственные характеристики компаундного двигателя постоянного тока.

торможение. При применении последнего серийная обмотка обычно выключается из сети.

Рекуперация энергии применяется весьма редко, так как при обычном включении серийной обмотки согласно (в отношении магнитного потока) с шунтовой переход машины с режима двигателя на режим генератора с обратным направлением тока вызывал бы разма-

¹ Ссылки с буквой Л означают номер по библиографии в конце книги.

гичивание машины. Избежать этого размагничивания можно было бы или переключением серийной обмотки или ее выключением из цепи двигателя.

13. Влияние колебаний напряжения сети на характеристики двигателей постоянного тока

В практических условиях работы двигателей в промышленных предприятиях возможны колебания напряжения сети. Эти колебания, естественно, отзываются на некоторых свойствах двигателей. Так, увеличение напряжения сети, при том же моменте на валу снижает главный ток двигателя, — скорость его при этом повышается; пусковой момент двигателя увеличивается. Аналитический учет всех соответствующих изменений затруднителен, так как один и тот же фактор может действовать на двигатель одновременно в разных направлениях. Так, в шунтовом двигателе постоянного тока уменьшение напряжения на

Таблица 3
Влияние колебаний напряжения сети на характеристики двигателей постоянного тока

Тип двигателя	Напряжение U	Пусковой и максим. момент M	Номиналь. число оборотов мин. n	Ток при номинальной нагрузке I	Перегрузочная мощность P	к. п. д.			Нагрев
						полной нагрузки			
Шунтовой	120%	+30%	110%	-17%	+30%	Большое увеличение	Без изменения	Небольшое уменьшение	Для якоря и коллектора — уменьшение, для обмотки возбуждения — увеличение, и обратно
	110%	+15%	105%	-8,5%	+15%				
	90%	-16%	95%	+11,5%	-16%	Небольшое уменьшение	Небольшое увеличение		
Компаундный	120%	+30%	112%	-17%	+30%	Большое увеличение	Без изменения	Небольшое уменьшение	Для якоря и коллектора — уменьшение, для обмотки возбуждения — увеличение, и обратно
	110%	+15%	106%	-8,5%	+15%				
	90%	-16%	94%	+11,5%	-16%	Небольшое уменьшение	Небольшое увеличение		

якоря должно влечь за собой снижение скорости двигателя. Но одновременно происходит уменьшение тока возбуждения, ведущее к некоторому повышению скорости. Степень результирующего изменения скорости двигателя зависит от насыщения машины. В табл. 3 приведена сводка характерных влияний изменения напряжения в различных направлениях для шунтового и компаундного двигателей. Приводимые данные являются некоторыми средними, типичными для промышленных двигателей малой и средней мощности.

14. Регулирование скорости двигателей постоянного тока

Регулирование скорости двигателей постоянного тока можно вести изменением сопротивления в цепи якоря. Так как число оборотов двигателя в минуту

$$n = \frac{U - I_a \cdot (R_a + R_d)}{c \cdot \Phi},$$

то увеличение добавочного сопротивления R_d в цепи якоря вызывает соответствующее снижение скорости двигателя. Однако такой способ регулирования весьма неэкономичен, так как влечет за собой большие потери в этом сопротивлении. В самом деле, распределение мощности в цепи двигателя соответствует равенству

$$UI = EI + I^2 \cdot R_a + I^2 \cdot R_d.$$

При снижении этим способом скорости двигателя, например вдвое, потери в добавочном сопротивлении, равные $I^2 \cdot R_d$, составляют почти 50% от подведенной к двигателю мощности UI . Поэтому такой способ регулирования чрезвычайно неэкономичен. Практически он применяется лишь в крановых и других аналогичных схемах серийных и компаундных двигателей, по своим свойствам зависящих момента от скорости весьма подходящих для подъемно-транспортных устройств. Расчет величины этих сопротивлений может быть выполнен согласно п. 11, однако по габаритам регулировочные сопротивления должны быть значительно больше пусковых, так как первые рассчитываются на длительную работу, а вторые — на кратковременную. При выборе определенных величин сопротивления на определенную силу тока должен быть учтен режим их работы (п. 64).

Значительно более простым и экономичным является регулирование скорости шунтовых и компаундных двигателей постоянного тока изменением тока возбуждения в шунтовой обмотке. Уменьшение тока возбуждения и создаваемого им магнитного потока Φ влечет за собой повышение скорости, так как

$$n = \frac{U - IR}{c \cdot \Phi}.$$

То число оборотов в минуту, которое двигатель развивает при номинальном напряжении при полном магнитном потоке, т. е. при выведенном из цепи возбуждения сопротивлении ротора называется основным или номинальным числом оборотов двигателя. Регулированием тока возбуждения можно получать лишь более высокие скорости. Скорости ниже основной могут быть получены лишь введением

сопротивления в цепи якоря. Для возможности осуществления регулировки скорости током возбуждения двигатель должен быть соответственно рассчитан как в механическом, так и электромагнитном отношении. Нормальными пределами регулирования, т. е. отношением максимальной скорости к основной следует считать цифры 1,5 : 1; 2 : 1; 2,5 : 1 и 3 : 1. Расширение пределов регулирования удорожает двигатель по условиям устойчивости, коммутации, механической прочности. Поэтому регулируемые шунтовые и компаундные двигатели постоянного тока на пределы регулирования больше, чем 4 : 1, нормалью не изготавливаются.

15. Механические характеристики шунтовых двигателей при регулировании скорости током возбуждения

Согласно предыдущему (п. 7), число оборотов в минуту идеального холостого хода $n_0 = \frac{U_N}{c_1 \Phi}$. Так как при регулировании скорости током возбуждения магнитный поток двигателя Φ меняется, то каждому току возбуждения i_x и потоку Φ_x будет соответствовать свое число оборотов в минуту идеального холостого хода $n_{0x} = \frac{U_N}{c_1 \cdot \Phi_x}$.

Естественные механические характеристики шунтового двигателя $n = f(I)$ при различных Φ_x и при отсутствии добавочного

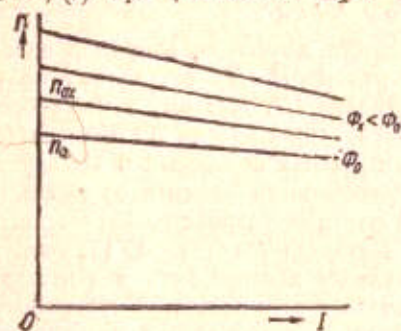


Рис. 22. Механические характеристики шунтового двигателя при регулировке скорости током возбуждения.

сопротивления в цепи якоря даны на рис. 22. Как отмечено выше, эти характеристики могут быть использованы для получения лишь более высоких скоростей двигателей. Приведенные характеристики вообще не параллельны. Так как для всех этих характеристик сопротивление обмотки якоря двигателя одно и то же, то в покое приключенного к сети двигателя, независимо от его потока возбуждения, через якорь проходил бы один и тот же ток $I_k = \frac{U}{R_a}$, равный току короткого замыкания машины. Все приведенные на рис. 22 характеристики должны были бы пересекаться на оси абсцисс в одной общей точке, соответствующей I_k . Этот ток I_k очень велик, недопустим для машины, почему он на рис. 22 и не показан. Приведенные характеристики дают зависимость скорости от тока $n = f(I)$. Переход от них к характеристикам $n = \varphi(M)$ может быть получен лишь пересчетом с учетом действительного значения магнитного потока.

Шунтовые двигатели с регулировкой скорости током возбуждения дают возможность производить торможение рекуперацией энергии с максимальной скорости до основной. Пояснение дает рис. 23, где представлены генераторные (II квадрант) и двигательные характеристики (I квадрант) при разных токах возбуждения. Рекуперация используется

при переходе от высоких скоростей к низким. Если мы изменим в двигателе поток Φ_1 на $\Phi_2 > \Phi_1$, то мы сразу с точки I I характеристики при тех же оборотах в минуту переходим в точку I' II характеристики. Работая на этой характеристике и рекуперировав энергию в сеть, двигатель будет снижать скорости до точки 2. В точке 2 мы должны изменить поток с Φ_2 на $\Phi_3 > \Phi_2$, и двигатель перейдет на III характеристику, и т. д. Переход по характеристикам при рекуперации показан жирными линиями.

Заметим, что одни рабочие машины требуют, чтобы необходимая для них мощность двигателя оставалась одинаковой при разных скоростях в случае регулировки скорости. Подобная регулировка называется регулировкой при постоянной мощности. Другие машины требуют, чтобы

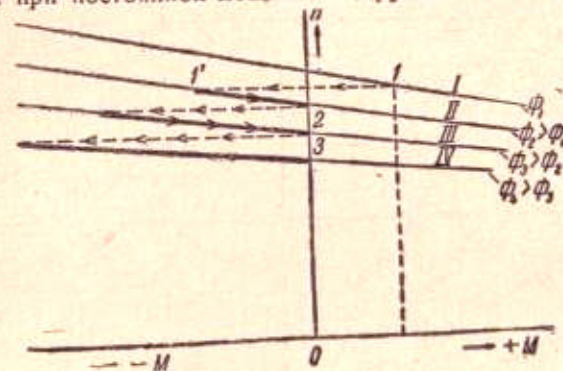


Рис. 23. Переход по механическим характеристикам при рекуперации.

мощность двигателя увеличивалась пропорционально скорости. Такая регулировка называется регулировкой при постоянной мощности. Первому условию удовлетворяют шунтовые двигатели с регулировкой скорости током возбуждения, второму — те же двигатели с регулировкой сопротивлением в цепи якоря.

16. Графическое изображение механических характеристик для двух направлений вращения

Для характеристики схем реверсивных приводов иногда показывают одни и те же характеристики дважды для одного и другого направления вращения двигателя. Подобные характеристики для шунтового двигателя постоянного тока даны на рис. 24. Правая часть охватывает двигательные характеристики (I квадрант) и характеристики торможения противовключением (IV квадрант) для одного направления вращения. Левая часть дает двигательные (III квадрант) и тормозные (II квадрант) характеристики для другого направления вращения. Жирными линиями показан переход по характеристикам во время пуска. Момент меняется от покоя в пределах от μ_1 до μ_2 (п. 9). Переход от одной характеристики к другой происходит по горизонталям, так как за время переключения двигателя его скорость измениться не может. Двигатель разгоняется до тех пор, пока его момент μ_d не уравновесит момент нагрузки

ки n_m . Положим, что мы хотим быстро остановить привод, используя режим торможения прогнвоключением. Тогда с рабочей точки соответственной характеристики 1 мы переключаем двигатель в точку 2 искусственной характеристики 5 другого направления вращения. Ибо мы, для перевода двигателя в режим протвовключения, соединяем его обмотки так, как это необходимо для другого направления вращения. Двигатель начинает снижать свою скорость, работая на характеристике 5. При снижении скорости тормозной момент двигателя постепенно падает. Для наиболее эффективного торможения при некоторой скорости целесообразно

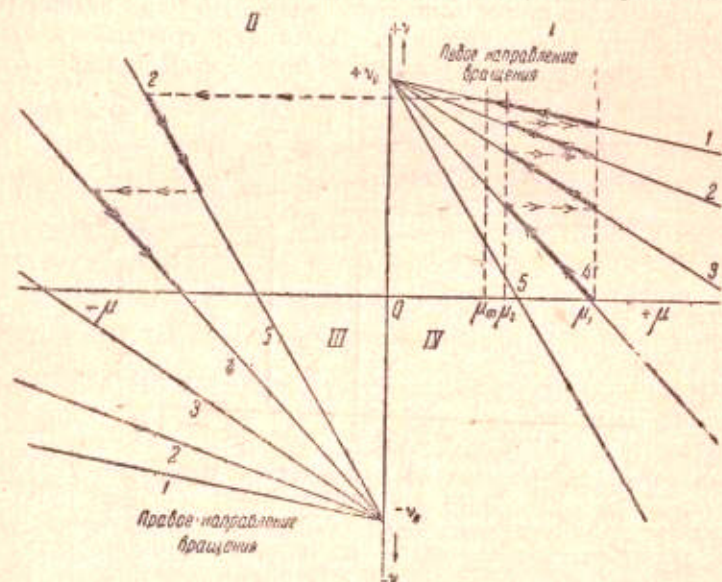


Рис. 24. Комплекс характеристик для реверсивных приводов.

разно перевести двигатель на другую тормозную характеристику (4). Переход показан также жирными линиями.

При достижении нулевой скорости двигатель должен быть отключен от сети. Все эти переключения наилучшим образом могут быть произведены лишь автоматически.

17. Система Леонарда

Целый ряд производственных машин требуют более широкой регулировки скорости, чем то могут дать шунтовые двигатели с регулируемой скоростью током возбуждения. Для этой цели в девяностых годах прошлого столетия была создана система Леонарда. Принципиальная схема Леонарда представлена на рис. 25. В ней двигатель постоянного тока D_1 , приводящий рабочую машину, питается от отдельного генератора G , вращаемого синхронным или асинхронным двигателем D_2 . На вал последних двух машин насаживается также возбуждатель B , подающий ток возбуждения как двигателю, так и питающему его генератору. В данном случае ток возбуждения генератора, а стало быть, и подво-

димое от него к двигателю напряжение мы можем сделать как угодно малым. Так как число оборотов в минуту двигателя постоянного тока определяется равенством

$$n = \frac{U - IR_a}{c\Phi},$$

где U — подводимое к двигателю напряжение, то система Леонарда дает возможность менять скорость двигателя изменением напряжения генератора в весьма широких пределах. Практические пределы регулирования по этому способу ограничиваются соотношением 8:1. При дальнейшем снижении напряжения генератора двигатель начинает работать неустойчиво, вследствие влияния падения напряжения на щетках коллекторов генератора и двигателя. Расширению пределов регулировки препятствует также остаточный магнетизм в полюсах генератора. При токе возбуждения генератора, равном нулю, напряжение на зажимах генератора не равно нулю за счет остаточного магнетизма. Использование широкого

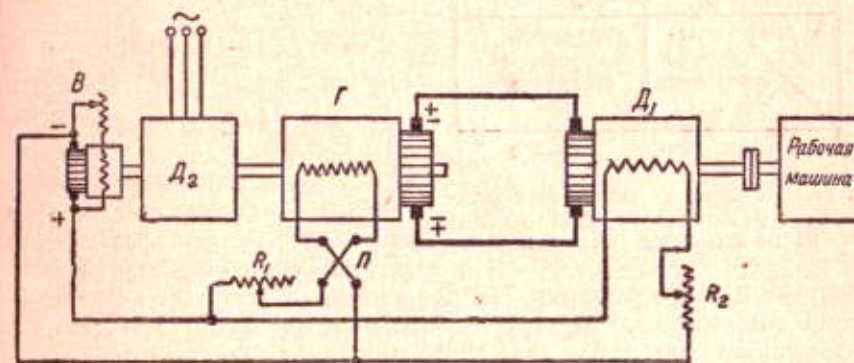


Рис. 25. Схема Леонарда.

изменения напряжения генератора дает возможность обойтись при пуске в ход двигателя без пускового реостата. Щетки генератора и щетки двигателя соединяются при этом непосредственно проводами без всяких промежуточных сопротивлений. При пуске в ход двигателя генератору дается очень малая сила тока возбуждения; напряжение его оказывается таким, что в покое двигателя проходящий через машины ток не превосходит допустимой величины. Постепенно повышая напряжение генератора, мы можем двигатель без толчков тока довести до нормальной скорости. Так как сила тока возбуждения генератора вообще невелика, то число ступеней реостата R_1 может быть сделано весьма большим. В итоге мы получаем возможность очень плавного пуска и очень плавной регулировки скорости.

Система Леонарда дает возможность просто изменить направление вращения двигателя (реверсировать его) изменением полярности генератора посредством переключения направления тока в обмотке возбуждения генератора переключателем P . Пределы регулирования скорости в системе Леонарда расширяют, используя регулировку тока возбуждения двигателя. Эта регулировка ведется после получения на генераторе но-

минального напряжения. Так как регулировку скорости двигателя током возбуждения можно вести в пределах 2,5 : 1, то общие пределы регулирования скорости по системе Леонарда достигают $2,5 \cdot 8 = 20$. При этом, при низких скоростях, до основной скорости двигателя, получаем при номинальном напряжении генератора и максимальном потоке двигателя, последний может работать при постоянном моменте приводимого исполнительного механизма, при регулировании же тока возбуждения двигателя — при постоянной мощности. Пояснение дает рис. 26. При неизменном номинальном токе якоря двигателя и максимальном магнитном его потоке вращающий момент двигателя

$$M_d = c \cdot I_N \Phi_d = \text{const};$$

при регулировании скорости током возбуждения двигателя его вращающий момент

$$M_d = c \cdot I_N \cdot \Phi_d = \\ = c \cdot I_N \cdot \frac{c'}{n} = \text{const} \cdot \frac{1}{n},$$

так как

$$n = \frac{U - I_N R}{c \cdot \Phi_d} = \text{const} \cdot \frac{1}{\Phi_d}.$$

Механические характеристики системы Леонарда представлены на рис. 27, причем правая часть — дает двигательный режим, левая —

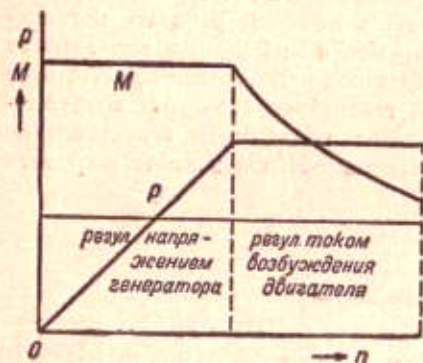


Рис. 26. Изменение допустимых длительно нагрузочного момента и мощности в системе Леонарда.

генераторный, рекуперативный. Так как нормально двигатель имеет независимое возбуждение, то характеристики его одинаковы с таковыми в шунтовом двигателе. Пять (для примера) нижних характеристик соответствуют различным напряжениям генератора и постоянному потоку Φ_d тех двигателя. Верхние три (для примера) получаются при номинальном постоянном напряжении генератора U_N и ослабленном потоке двигателя. Указанный комплекс характеристик дает возможность легко получить рекуперативное торможение до нулевой скорости. Если мы будем сначала ступенями постепенно повышать ток возбуждения двигателя, а затем, дойдя до максимального магнитного потока двигателя постепенно ступенями снижать ток возбуждения генератора, то мы будем осуществлять торможение, переходя по характеристикам так, как показано на рис. 28. При этом торможение получается совершенно плавным. В том случае, когда при управлении по системе Леонарда необходимо получить частые и быстрые реверсы двигателя, приходится прибегать к так называемой форсировке тока возбуждения, так как электромагнитная инерция (самоиндукция) обмотки возбуждения генератора задерживает несколько нарастание тока возбуждения. Переходный процесс в цепи возбуждения подчиняется дифференциальному уравнению вида

$$U = tr + L \cdot \frac{di}{dt},$$

где i — ток возбуждения генератора, r и L — соответственно омическое сопротивление и коэффициент саминдукции обмотки возбуждения, U —

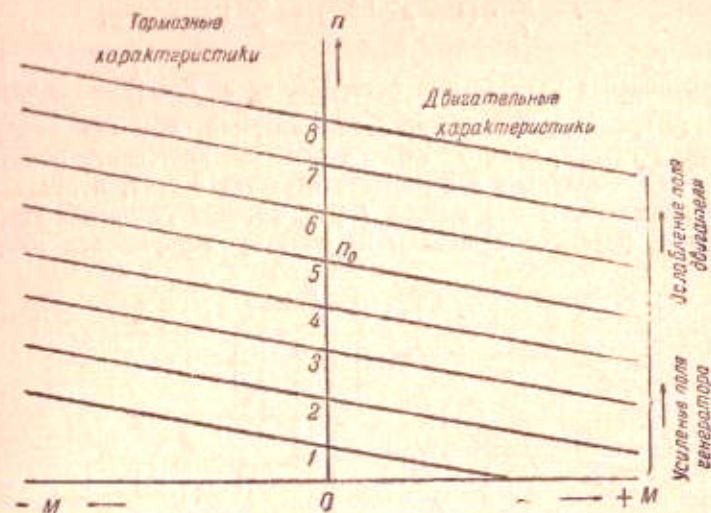


Рис. 27. Механические характеристики в системе Леонарда.

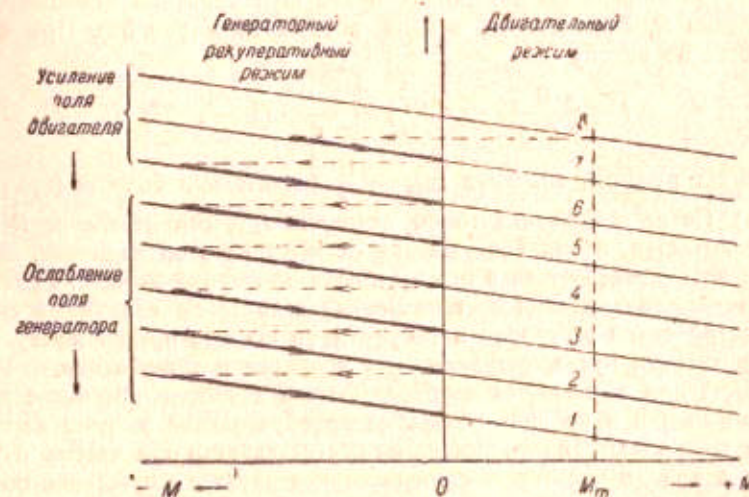


Рис. 28. Осуществление рекуперации в системе Леонарда.

напряжение на зажимах цепи возбуждения. Решение этого дифференциального уравнения дает для тока равенство:

$$i = \frac{U}{r} \cdot (1 - e^{-t/LR}) = \frac{U}{r} (1 - e^{-t/T}),$$

где e — основание натуральных логарифмов, а $T = \frac{L}{R}$ — так называемая постоянная времени электромагнитной инерции обмотки возбуждения или, короче говоря, просто электромагнитная постоянная обмотки возбуждения. Самоиндукция задерживает нарастание тока, и последний растет по экспоненциальной кривой 1 рис. 29. Для ускорения этого нарастания при форсировке подают на обмотку возбуждения напряжение

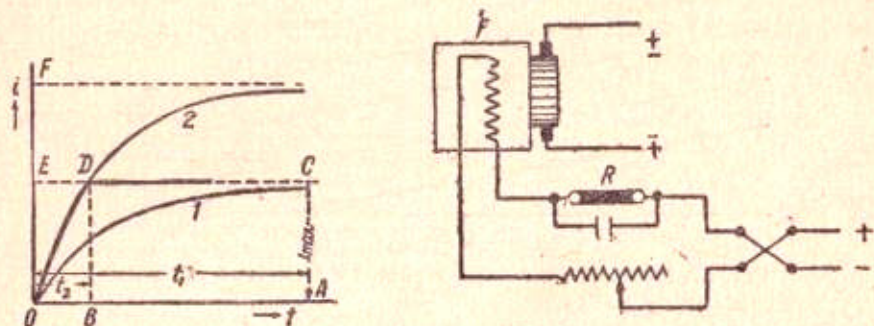


Рис. 29. Нарастание тока возбуждения генератора Леонарда.

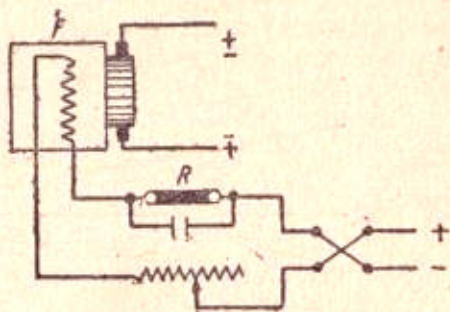


Рис. 30. Включение цепи возбуждения генератора Леонарда.

в 3—4 раза больше нормального, путем шунтирования отдельного сопротивления R , включенного в цепь возбуждения (рис. 30). При $\alpha = 3$ ток растет по закону

$$i = \frac{\alpha \cdot U}{r} (1 - e^{-t/T}) = \frac{3 \cdot U}{r} \cdot (1 - e^{-t/T})$$

и достигает нужного значения $i_{\max} = \frac{U}{r}$ значительно быстрее (кривая 2 рис. 29). После достижения током величины i_{\max} сопротивление R расшунтировывается, и ток возбуждения остается на этой величине. Закон изменения тока возбуждения при этом показан жирной линией на рис. 29.

К настоящему времени система Леонарда является наилучшей системой электрической регулировки скорости по широте пределов регулирования, плавности пуска, регулирования скорости и торможения.

Недостатком ее является необходимость в значительном числе электрических машин и наличие потерь на преобразование энергии из переменного тока в постоянный. Последнее обстоятельство при частых пусках привода в ход до некоторой степени компенсируется отсутствием потерь в пусковых и тормозных сопротивлениях.

Система Леонарда нашла применение для привода реверсивных и неререверсивных станов горячей прокатки, для реверсивных станов и станов тандем холодной прокатки, шахтных подъемников, доменных подъемников, бумагоделательных машин, текстильных отделочных агрега-

тов, металлорежущих станов, требующих глубокой и плавной регулировки скорости, экскаваторов, разводных пролетов, мостов, мощных кранов, лебедок, шпильей, брашпильей, рулей на судах и т. д.

18. Квадратичная система Леонарда и система Леонарда — Ильгнера

В тех случаях, когда приводной двигатель в системе Леонарда имеет большую мощность в несколько сот или тысяч киловатт, ток возбуждения генератора становится значительным и управление реостатами возбуждения при большом числе резервов — тяжелым. Это имеет место, например, в приводе реверсивных прокатных станов. В таких случаях применяется квадратичная система Леонарда (рис. 31). В ней как гене-

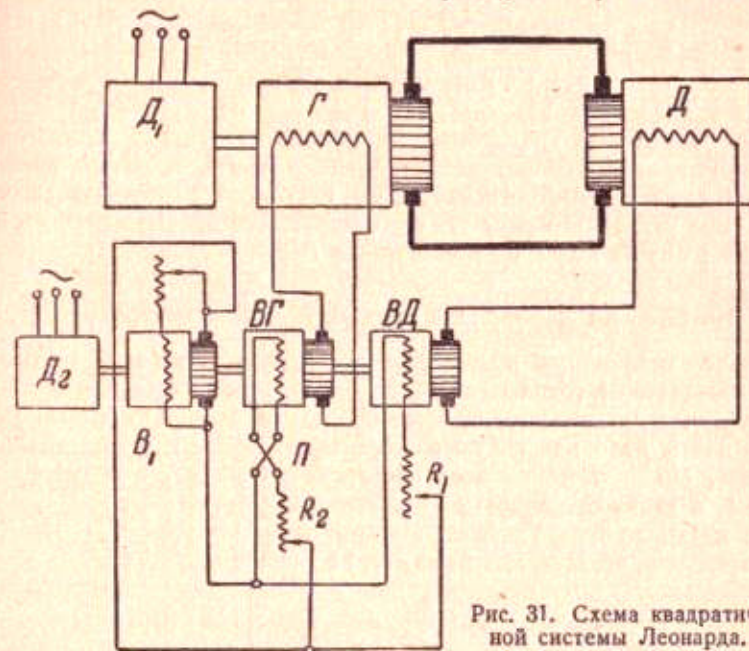


Рис. 31. Схема квадратичной системы Леонарда.

ратор G , так и двигатель D получают по отдельному возбудителю $BГ$ и $BД$. Оба эти возбудителя возбуждаются от первого возбудителя B_1 .

Щетки якорей возбудителей $BГ$ и $BД$ соединяются непосредственно с обмотками возбуждения генератора и двигателя без реостатов и переключателей. Все управление системой перенесено в цепи возбуждения возбудителей $BГ$ и $BД$, где токи меньше. В этих цепях и устанавливаются соответствующие регулирующие приспособления. Возбудительный агрегат из четырех машин $BГ$, $BД$ и B с вращающим их асинхронным двигателем D устанавливается обычно отдельно от главного преобразовательного агрегата Леонарда.

В тех случаях, когда привод имеет большую мощность и характеризуется пиковыми нагрузками, для сглаживания нагрузки на сеть на вал преобразовательного агрегата Леонарда насаживается маховик M . Двигатель преобразовательного агрегата AD применяется при этом асин-

хронный (рис. 32). Подобная система носит название системы Леонарда — Ильгнера. Применяется она почти исключительно для привода мощных реверсивных станков — блуминга, слябинга. Использование

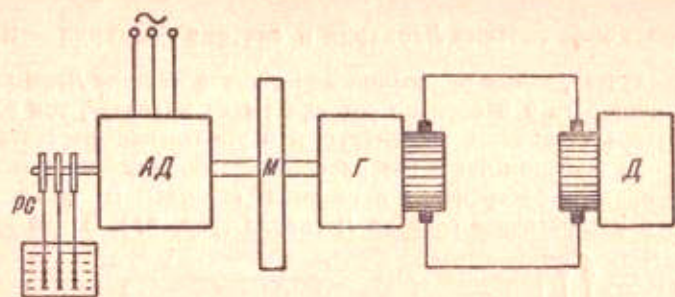


Рис. 32. Система Леонарда — Ильгнера.

маховика достигается снижением скорости асинхронного двигателя посредством изменения сопротивления, введенного в цепь ротора асинхронного двигателя жидкостного реостата. Регулировка реостата автоматическая. Все устройство реостата с регулирующим приспособлением носит название регулятора скольжения РС.

19. Система Леонарда с трехобмоточным генератором

В ряде механизмов, приводимых по системе Леонарда (краны, лебедки, экскаваторы, гребные винты ледокола, вспомогательные механизмы металлургических заводов), желательно до некоторой предельной нагрузки иметь мало меняющуюся скорость двигателя. По достижении этой нагрузки скорость, в целях сохранности механизма, должна падать до нуля. Такие специальные характеристики, представленные на рис. 33

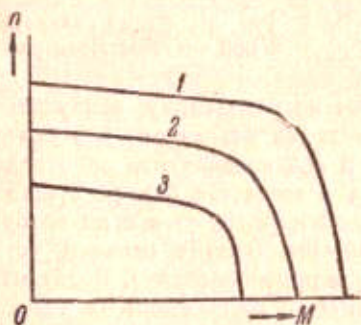


Рис. 33. Экскаваторные характеристики (работа на упор).

достигаются специальной комбинацией на генераторе трех обмоток возбуждения: 1) независимого возбуждения; 2) согласно действующей с ней обмотки самовозбуждения; 3) серийной обмотки, включенной в главную

цепь генератора и действующей навстречу двум указанным обмоткам (рис. 34). При соответствующем расчете ампервитков этих обмоток генератор получает нужную зависимость $U=f(I)$, а так как скорость двигателя пропорциональна напряжению U , то соответствующую механическую характеристику $n=f(I)$ приобретает и питаемый генератором двигатель. Серийная обмотка при большой силе тока якоря машины создает настолько сильное размагничивание полюсов, что при приближении силы тока к некоторой предельной напряжению при малом изменении силы тока падает до нуля. Это достигается соответствующим подбором насыщения машины. Подобная система обеспечивает высокую производительность механизма и его защиту от предельных, могущих возникнуть по технологическим условиям, нагрузок. Всего лишь 8—10 лет назад эта система стала широко внедряться в промышленность. Ныне она заменяется системой с амплидинами (п. 22).

20. Система Леонарда с серийным возбуждением

Повышение стоимости системы Леонарда, по сравнению с другими типами привода, особенно заметно при малых мощностях машины. В этих условиях стоимость отдельного возбудителя составляет существенный процент от стоимости машин. Поэтому в последнее время в регулируемых металлорежущих станках (с мощностью до 5 квт) стали применять систему Леонарда с серийным возбуждением генератора и двигателя без отдельного возбудителя (рис. 35). Так как с ростом тока в цепи машин растет и напряжение генератора по кривой 1 (рис. 36, а) и так как скорость двигателя за счет роста магнитного потока, возбуждаемого тем же главным током, должна была бы меняться по кривой 2 (рис. 36, а), то результирующая скорость серийного двигателя примерно остается постоянной (прямая 3 рис. 36, а). Широкое регулирование скорости двигателя в этом случае достигается шунтированием серийной обмотки возбуждения генератора отдельным реостатом R (рис. 35). В результате механические двигательные характеристики получают вид (рис. 36, б).

При пуске асинхронного двигателя, вращающего генератор Леонарда, получается плавный пуск двигателя, вращающего постоянный ток, приводящего исполнительный механизм. Широкие пределы регулирования и жесткие механические характеристики обеспечиваются лишь в мало насыщенных машинах с относительно малым остаточным магнетизмом. Серийные машины не дают возможности осуществлять рекуперативное торможение. В таком случае для этой цели применяется динамическое торможение двигателя самовозбужденным генератором на отдельное сопротивление R_1 . При этом двигатель отсоединяется от генератора, обмотка возбуждения двигателя соединяется с обмоткой якоря двигателя другими концами, так как для перехода в двигательный режим на генераторный, при том же направлении вращения, в серийной машине нужно переключить взаимное соединение обмоток якоря и возбуждения. Двигатель с переключенными обмотками присоединяется к тормозному сопротивлению (рис. 37). Схема действует эффективно до 1/6 нормальной скорости и дает быструю остановку привода.

В более крупных установках, для целей торможения, применяют специальную тормозную возбудительную обмотку, насаженную на по-

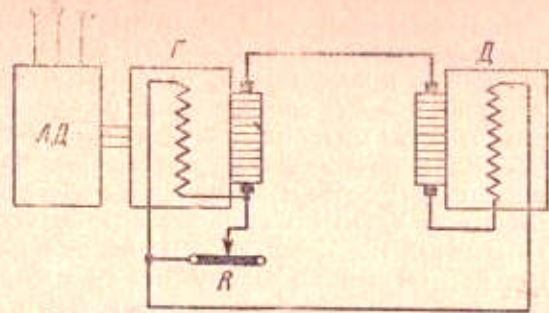


Рис. 35. Система Леонарда с серийным возбуждением машины.

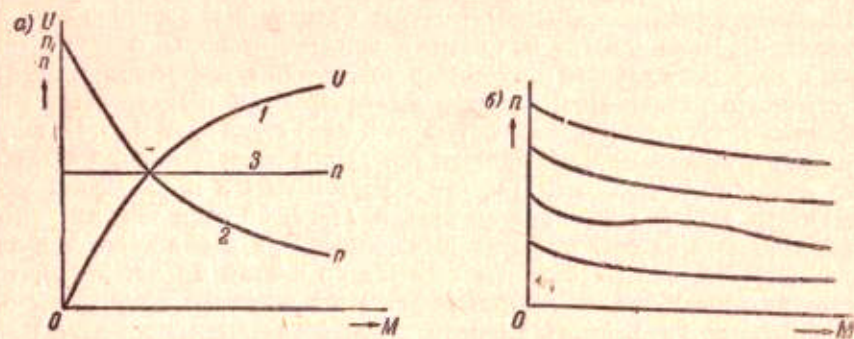


Рис. 36. Механические характеристики для системы рис. 35.

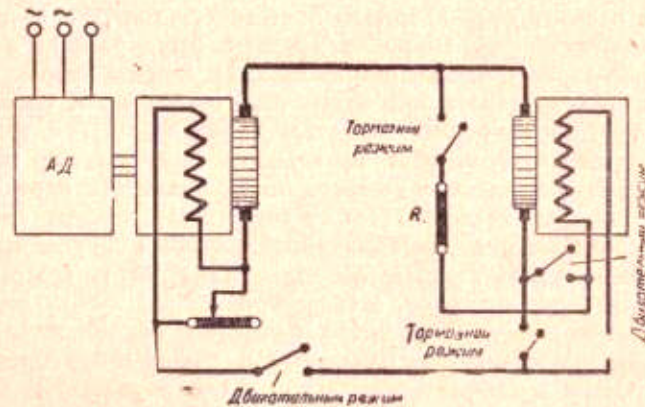


Рис. 37. Тормозная работа двигателя в системе Леонарда с серийным возбуждением.

лоса двигателя и подключаемую параллельно щеткам лишь во время торможения. В целях того же упрощения, при малых мощностях до 1—2 квт применяются варианты системы Леонарда с параллельным включением обмоток генератора и двигателя к их щеткам через сопротивления (с самовозбуждением). Подобная система дает возможность получать пределы регулирования 12:1, из них 3:1 приходится за счет регулирования в цепи возбуждения генератора и 4:1 за счет регулирования сопротивления в цепи возбуждения двигателя.

21. Система Леонарда с роторолем

Ротороль — сокращенное американское наименование системы Леонарда с контролем (control) вращающейся (rotating) машиной.

Эта система предложена фирмой Вестингауз. Она характеризуется применением генератора с несколькими обмотками возбуждения, напо-

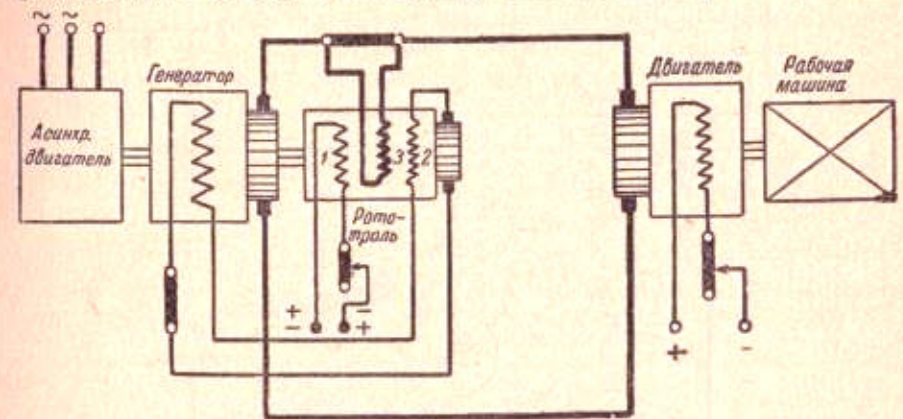


Рис. 38. Система Леонарда с роторолем.

добие генератора Леонарда с тремя обмотками (п. 19). Обычно ротороль не является сам генератором Леонарда, а играет роль возбудителя этого генератора, даже при малых мощностях.

Схема системы Леонарда с роторолем в качестве возбудителя представлена на рис. 38. Ротороль имеет три обмотки возбуждения: обмотку независимого возбуждения 1, для регулировки скорости двигателя и его реверсирования; компаундную обмотку 2 и обмотку 3, ампервитки которой пропорциональны току главного двигателя. Эта последняя обмотка является обмоткой обратной связи тока главного двигателя с током возбуждения генератора, т. е. она учитывает поведение двигателя в отношении силы тока, а стало быть, и вращающего момента.

Система с роторолем в разных видоизменениях дает автоматическое регулирование процесса и вообще может обеспечить любые графики изменения скорости двигателя при пуске, торможении и регулировании, широко варьируемые механические характеристики двигателя, в том числе и типа, даваемого трехобмоточным генератором Леонарда. Система с роторолем должна быть отнесена к современным прогрессивным

системам автоматического непрерывного регулирования процесса с обратной связью.

Одна из специальных схем системы Леонарда с ротороном дает возможность расширить пределы регулирования скорости двигателя до недостижимых ранее в электроприводе пределов, а именно — до предела 125:1 (по американским данным). Подобная схема представлена на рис. 39. Для того, чтобы расширить пределы регулирования скорости двигателя по системе Леонарда, нужно, прежде всего, уничтожить в гене-

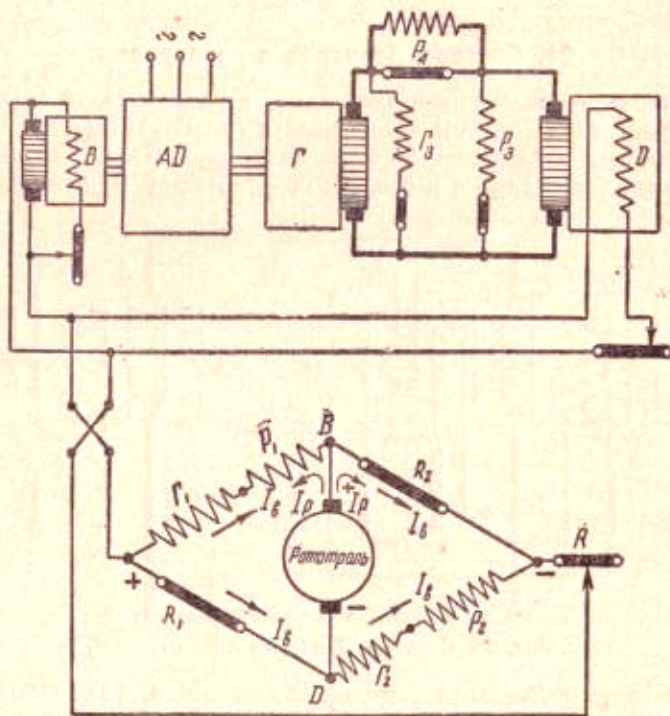


Рис. 39. Система с ротором для очень широкой регулировки скорости.

раторе остаточный магнетизм, который ограничивает нижний предел скорости, так как минимальное число оборотов в минуту двигателя

$$n = \frac{U_{\text{остат}} - IR}{c \Phi};$$

далее необходимо компенсировать в главной цепи машин омическое падение напряжения IR , чтобы исключить влияние нагрузки. Все эти функции совершенно автоматически, и при том непрерывно, выполняет ротор с определенной комбинацией обмоток возбуждения и определенным образом включенный. Генератор Леонарда при этом получает также несколько обмоток возбуждения.

В верхней части рис. 39 жирными линиями представлена главная цепь системы Леонарда с генератором Γ , двигателем исполнительного механизма D , основным возбудителем машин B и приводным асинхрон-

ным двигателем системы Леонарда AD . Цепи возбуждения машин показаны тонкими линиями. Возбудитель B (обычно компаундный) подает ток в обмотку возбуждения двигателя по нормальной схеме. Генератор имеет три обмотки возбуждения Γ_1 , Γ_2 и Γ_3 , первые две — независимого возбуждения, третья, встречная двум первым (дифференциальная), — противовозбуждения. Ротор имеет четыре обмотки возбуждения: P_1 и P_2 — независимого возбуждения, P_3 — подключаемую к напряжению генератора и P_4 — включаемую в главную цепь машины через шунт. Обмотки независимого возбуждения генератора Γ_1 и Γ_2 соединяются последовательно с независимыми обмотками возбуждения ротора P_1 и P_2 и вместе с добавочными сопротивлениями R_1 и R_2 образуют систему уравновешенного моста Витстона. В системе, следующей заданному закону, между узловыми точками моста B и D разность потенциалов равна нулю. Между этими точками и включается якорь ротора.

Обычно ротор монтируется вместе с генератором на продолжении его вала. Комбинация взаимодействия ампервитков возбуждения ротора такова, что при соответствии работы привода с заданным режимом напряжение ротора равно нулю, и он не посылает в обмотки возбуждения генератора никакого тока. При нарушении этого режима ампервитки четырех обмоток ротора не уравновешиваются, на его якоре появляется некоторое напряжение, и ротор посылает добавочный ток I_p в обмотки Γ_1 и Γ_2 генератора и свои обмотки P_1 и P_2 .

Таблица 4

Качественное сравнение некоторых широко регулируемых типов привода (по Леонарду) постоянного тока при малых и средних мощностях привода (по американским данным)

Тип привода	Простота	Стоимость	Пределы изменения		Общие пределы регулирования	Изменение скорости с нагрузкой в % от n_N
			напряжения	тока возбуждения		
Система Леонарда с серийным возбуждением	1	1	10	1	10	4
Система Леонарда с самовозбуждением	2	2	3	4	12	4
Нормальная система Леонарда	3	3	10	4	40	2
Ионный привод ¹	4	4	10	4	40	3
Система Леонарда с ротором	5	5	60	2	120	1

В этих четырех обмотках происходит наложение токов основного возбуждения I_b и тока ротора I_p . В итоге компенсируются влияние остаточного магнетизма и омическое падение напряжения в главной цепи и обеспечивается исключительно широкая регулировка скорости. Более детальное рассмотрение процессов работы системы выходит за пределы данной книги.

¹ Рассмотрение его см. ниже в п. п. 24, 117 и 119.

Рототроль нашел широкое применение для привода строгательных станков, горизонтальных сверлильных станков, подъемников, экскаваторов, скиповых подъемников, бумагоделательных машин и т. д.

Ориентировочное качественное сравнение некоторых вариантов типа привода по Леонарду (цифровыми показателями) дано в табл. 4.

22. Система Леонарда с амплидином

В последние годы в регулируемом приводе постоянного тока нашел исключительное распространение электромагнитный усилитель — амплидин. Появился он, по существу, в итоге соревнования электромагнитного управления электроприводом с ионно-электронным. Как и рототроль, амплидин дает возможность осуществлять непрерывное управление производственными процессами весьма тонкими, в смысле необходимых графиков скоростей, моментов, токов, быстроты операций и т. д.

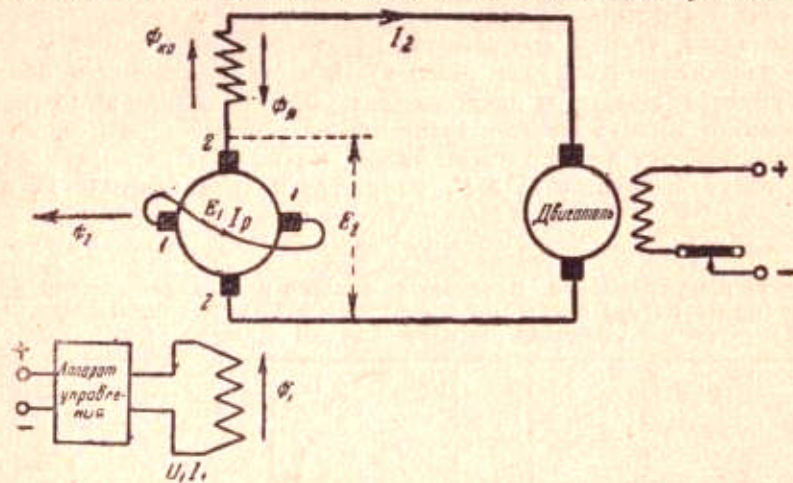


Рис. 40. Питание амплидином двигателя.

Амплидин дает возможность легко осуществлять форсировку возбуждения генератора Леонарда и тем самым повысить скорость протекания переходных процессов привода. В настоящее время амплидин нашел применение чуть ли не во всех случаях, где ранее использовалась система Леонарда. В своем нормальном виде амплидин дает возможность усиливать получаемые им импульсы по мощности в 10 000 раз и более. В США к 1944 г. было выпущено 100 000 амплидинов.

Амплидин (рис. 40) представляет машину постоянного тока с неявно выраженными полюсами возбуждения, с наложенной на них компенсационной обмоткой для компенсации поля якоря, с добавочной замкнутой накоротко парой поперечных щеток на якоре и несколькими обмотками возбуждения на неявно выраженных полюсах.

Амплидин является до некоторой степени видоизменением машины Розенберга, — машины постоянной силы тока при переменной скорости, — использующейся для электрического освещения железнодорожных поездов.

Принцип работы амплидина следующий. Магнитный поток Φ_1 , создаваемый основной обмоткой управления, индуцирует на поперечных щетках электродвижущую силу E_1 . Поперечные щетки замыкаются накоротко. По ним протекает ток I_p , обусловленный э. д. силой E_1 . Этот ток I_p создает по поперечной оси поток Φ_2 . В этом потоке вращается та же обмотка якоря амплидина. На продольных щетках коллектора 2—2 поток Φ_2 индуцирует э. д. силу E_2 , которая и подается к приемнику электрической энергии (двигателю) от амплидина.

Амплидин представляет как бы объединение в одной машине квадратичной системы Леонарда. Обмотка управления и якорь с поперечными щетками являются как бы первой машиной с обмоткой возбуждения в ее главной цепи. Цепь короткого замыкания и якорь ампли-

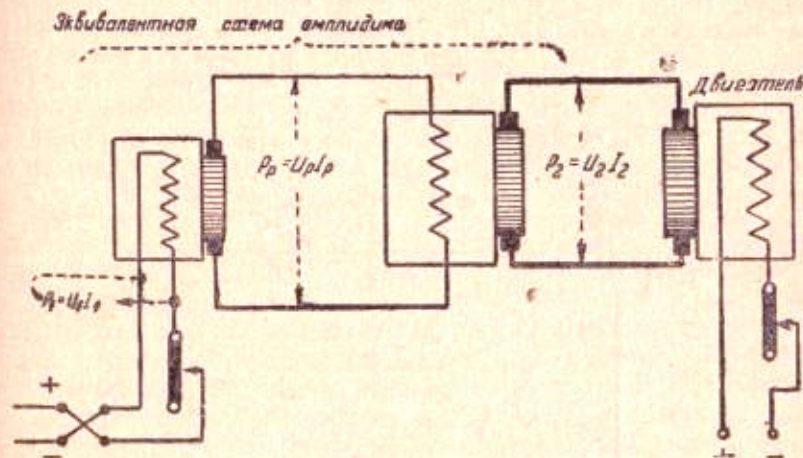


Рис. 41. Схема, эквивалентная амплидину.

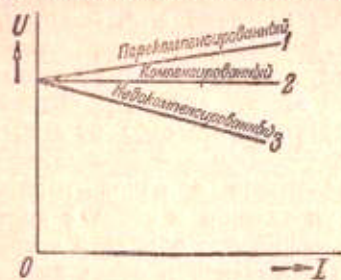
дина с продольными щетками представляют эквивалент второй машины (рис. 41). Мощность возбуждения в машине постоянного тока нормально составляет 1—2% от мощности машины. В данном случае мощность обмотки управления $P_1 = U_1 I_1$ составляет 1% от мощности цепи короткозамкнутых щеток $P_p = U_p I_p$. В свою очередь, мощность этой последней цепи составляет 1% от выходной мощности амплидина $P_g = U_2 I_2$. В результате коэффициент усиления амплидина по мощности

$$\alpha = \frac{U_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1} = \frac{U_p \cdot I_p}{U_1 \cdot I_1} \cdot \frac{U_2 \cdot I_2}{U_p \cdot I_p} = 100 \cdot 100 = 10\,000.$$

Амплидин является электромагнитным механизмом, служащим для усиления мощности. Сама усиленная мощность поступает к амплидину от вращающего его двигателя. Обмотки управления амплидина регулируют режим его работы и поступление мощности к амплидину от вращающего его двигателя.

Амплидин (в отличие от обычного генератора постоянного тока) почти не обладает электромагнитной инерцией (п. 17). Переходные процессы проходят в нем весьма быстро. В обмотке управления

амплитина протекает весьма малый ток, поэтому введением в цепь этой обмотки добавочного омического сопротивления за счет малых потерь роль самоиндукции можно свести на-нет. Магнитный же поток якоря



по главной оси*уничтожается компенсационной обмоткой. Таким образом, роль самоиндукции в амплитине практически почти исключена. В результате все процессы форсировки, регулирования скорости, поддержания постоянства какой-либо величины можно проводить весьма быстро. Напряжение амплитина с нагрузкой может меняться по одной из прямых 1, 2 и 3 рис. 42.

Рис. 42. Изменение напряжения амплитина с нагрузкой.

Прямая 1 относится к перекомпенсированной машине, когда поток компенсационной обмотки $\Phi_{ко}$ больше потока якоря по продольным щеткам Φ_a . Характеристика 2 относится к вполне компенсированной машине, т. е. с $\Phi_{ко} = \Phi_a$, 3 — к недокомпенсированной, т. е. к случаю $\Phi_{ко} < \Phi_a$. Практически, по условиям устойчивой работы нормально амплитины конструируются для характеристики третьего типа.

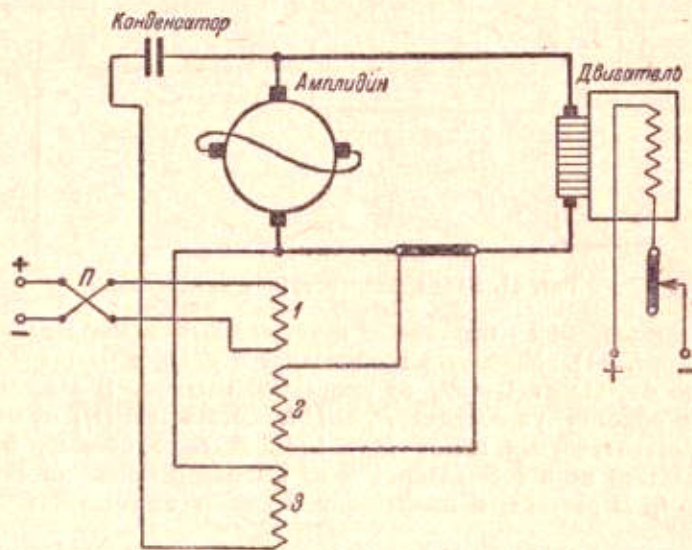


Рис. 43. Обмотки возбуждения амплитина.

Амплитины пока производятся до мощностей в 20 квт, хотя имеются отдельные экземпляры и большей мощности. На большую мощность изготовление амплитинов пока оказывалось неэкономичным и технически затруднительным. При мощности до 20 квт амплитин питает непосредственно двигатель привода, при большей мощности двигателя амплитин служит возбудителем генератора Леонарда. Амплитин применяется также в качестве возбудителя генераторов для высокочастотных печей, для

синхронного двигателя и т. д. В нормальной схеме амплитин чаще всего имеет три или четыре обмотки возбуждения (рис. 43):

1) обмотка управления 1 (иногда ее называют обмоткой направления); эта обмотка по полярности реверсируемая определяет собой основное поле амплитина по величине и направлению;

2) обмотка регулирования 2, являющаяся в то же самое время обмоткой обратной связи с регулируемым объектом и служащая для поддержания постоянства или определенного закона изменения какой-либо величины, например силы тока двигателя (как на рис. 43), его скорости и т. д. Всякое отклонение регулируемой величины от заданной вызывает добавочный импульс регулирующей обмотки амплитина в его основной магнитной системе возбуждения. В результате регулируемая величина возвращается к требуемому значению. Иногда применяются две регулируемые обмотки;

3) противоколебательная обмотка возбуждения 3, включаемая или через конденсатор, как на рис. 43, или через стабилизирующий трансформатор напряжения. Роль противоколебательной обмотки — успокаивать могущие возникнуть колебания при различных изменениях регулируемой величины.

23. Система Леонарда с регулексом

Система Леонарда с регулексом, предложенная американской фирмой Аллис Чалмерс, представляет, по существу, квадратичную или кубичную систему Леонарда, т. е. с возбудителем генератора и с отдельным возбудителем возбудителя генератора. Последним является регулекс — машина постоянного тока особой конструкции и с несколькими обмотками возбуждения. Включение обмоток возбуждения в регулексе может быть подобно включению таковых в рототроле. Система дает возможность непрерывного управления процессами, быстрой форсировки, поддержания постоянства напряжения генератора, ограничения предельного тока двигателя и т. д. Система нашла пока применение лишь в приводе реверсивных прокатных станов и в установках электрических печей.

24. Ионный привод постоянного тока

В практике последнего времени стал находить применение такой привод с двигателями постоянного тока, при котором эти двигатели получают энергию от сети переменного тока через статические выпрямительные ионные аппараты — тиратроны, игнитроны и ртутные выпрямители. На эти же аппараты перенесено и управление пуском, торможением двигателей, регулировкой их скорости, осуществлением определенного режима, графика работы и т. д. Этот тип привода дает возможность производить регулировку скорости в пределах 40 : 1 и 60 : 1. Он дает простую и легкую возможность осуществить непрерывное управление рабочим агрегатом.

Наибольшее распространение в промышленности нашел ионный привод с тиратронами под сокращенным американским названием „тайм-отроль“, — тиратронное управление двигателями или в ином варианте — „мототроль“. Этот привод применяется пока при мощностях не свыше

10—20 *квт*. При большей мощности применению привода препятствует его относительно плохой коэффициент мощности (косинус фи) при средних и низких скоростях регулируемых приводов. Рассмотрение ионного привода будет дано позднее в отделе аппаратуры совместно с рассмотрением особенностей работы ионно-электронной аппаратуры управления (п. 117—119).

Глава V

Механические свойства двигателей переменного тока

25. Механические свойства асинхронных двигателей

Асинхронные трехфазные двигатели, как известно, бывают двух основных типов: с кольцами и короткозамкнутые. Последние обладают наиболее простой конструкцией из всех известных типов электродвигателей. Работа асинхронного двигателя протекает вследствие взаимодействия поля статора и тока в роторе. Вращающееся магнитное поле, создаваемое протекающим по статорной обмотке трехфазным током, перемещается в пространстве с синхронным числом оборотов в минуту

$$n_0 = \frac{\nu_1 \cdot 60}{p},$$

где ν_1 — частота первичного тока, а p — число пар полюсов машины. Ток в роторе индуцируется за счет некоторого отставания ротора от поля статора. Это отставание характеризуется скольжением, выражаемым равенством

$$\sigma = \frac{n_0 - n}{n_0}.$$

Чем больше нагрузка на двигатель, тем больше должно быть скольжение. Скольжение при номинальной нагрузке в мощных двигателях составляет до 1%, в очень мелких доходит до 4—12%.

Вращающий момент двигателя определяется потерями в роторе. Эти потери равны разности мощности P_1 , переданной ротору вращающимся магнитным полем статора, и мощности P_2 , отданной двигателем приводимому механизму. Если вращающий момент двигателя M , а угловые скорости вращающегося поля статора и ротора соответственно ω_0 и ω_1 , то

$$P_1 - P_2 = M \cdot \omega_0 - M \cdot \omega_1 = M \omega_0 \cdot \sigma, \quad (25)$$

так как $\frac{\omega_0 - \omega_1}{\omega_0} = \sigma$.

Потери в роторе идут практически почти целиком на джоулевы потери в меди ротора. Они равны $m \cdot I_r^2 \cdot r_r$, где m — число фаз, I_r — ток ротора, r_r — сопротивление фазы ротора.

Так как

$$m \cdot I_r^2 \cdot r_r = P_1 - P_2 = M \cdot \omega_0 \cdot \sigma,$$

то вращающийся момент ротора при m и ω_0 постоянных:

$$M = c \cdot \frac{r_r \cdot I_r^2}{\sigma}. \quad (26)$$

Так как ток ротора

$$I_r = \frac{E_r}{\sqrt{r_r^2 + x_r^2}}, \quad (27)$$

а э. д. сила ротора пропорциональна постоянному потоку статора Φ_s и разности чисел оборотов в минуту поля статора и ротора, то

$$I_r = \frac{c \cdot \Phi_s \cdot (n_0 - n)}{\sqrt{r_r^2 + x_r^2}} = c_1 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{r_r^2 + x_r^2}}, \quad (28)$$

где x_r — индуктивное сопротивление ротора, равное $x_r = 2\pi L_2 \cdot \nu_1 \sigma$; L_2 — коэффициент самоиндукции обмотки ротора. Таким образом, вращающий момент асинхронного двигателя согласно (26) и (28) будет:

$$M = c' \cdot \frac{\sigma \cdot r_r}{r_r^2 + x_r^2} = c' \cdot \frac{\sigma \cdot r_r}{r_r^2 + (2\pi L_2 \cdot \nu_1 \cdot \sigma)^2}. \quad (29)$$

Для асинхронных двигателей принято давать связь между моментом и скольжением, а не между моментом и скоростью. На рис. 44 приведены кривые двух типичных обыкновенных короткозамкнутых двигателей: мощностью 2 *квт* (а) 100 *квт* (б). Из кривых видно, что вращающий момент асинхронного двигателя имеет максимум. Этот максимум равен обычно 2—2,5 M_N ; максимум момента является итогом изменения скольжения σ , т. е.

итогом изменения частоты тока в роторе $\nu_2 = \nu_1 \sigma$. Наличие максимума вытекает из равенства (29). Если мы найдем максимум выражения (29), взяв первую производную от M по σ и приравняв ее нулю, т. е.

$$\frac{dM}{d\sigma} = -c' \frac{\left[r_r \cdot \left(-\frac{r_r^2}{\sigma^2} + 2\pi L_2 \cdot \nu_1 \right)^2 \right]}{\left[\frac{r_r^2}{\sigma} + \sigma (2\pi L_2 \cdot \nu_1)^2 \right]^2} = 0, \quad (30)$$

то получим, что так называемое опрокидывающее скольжение σ_m при котором M достигает максимума M_{max} :

$$\sigma_m = \frac{r_r}{2\pi L_2 \cdot \nu_1}. \quad (31)$$

Это выражение показывает, что вращающий момент асинхронного двигателя достигает максимума при скольжении, равном отношению активного сопротивления цепи ротора к индуктивному сопротивлению ротора, отнесенному к частоте тока статора.

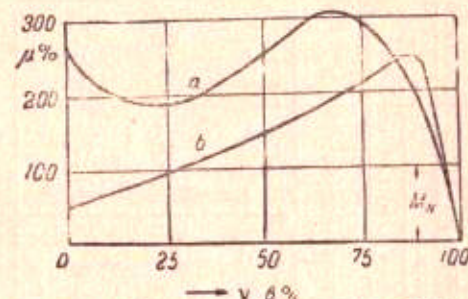


Рис. 44. Механические характеристики короткозамкнутых асинхронных двигателей.

Влияние колебаний напряжения U и частоты ν на характеристики асинхронных двигателей

Колебания напряжения	Изменение U	Пусковой и максимальный моменты	Изменение скольжения	Изменение потребляемого тока в мин.	Ток при номинальной нагрузке	Пусковой ток	К. п. д.				нормальной нагрузки				Перегрев при полной нагрузке	Перегрузочная способность											
							4/4		3/4		1/2		4/4				3/4		1/2								
							нормальной нагрузки		нормальной нагрузки		нормальной нагрузки		нормальной нагрузки				нормальной нагрузки		нормальной нагрузки								
Колебания частоты	Изменение	+20% +10% -10%	+44% +21% -19%	-30% -17% +23%	+1,5% +1,0% -1,5%	-11% -7% +11%	+25% +10% -10%	Малоувелич.	-1/2	0	0	-7	-5	-5	-5	-44%											
																	+5%	-10%	+5%	0	-5%	+5%	-5%	+5%	-5%	+5%	-5%

В табл. 5 показано, как влияют колебания напряжения и частоты переменного тока на основные величины, характеризующие работу типичного асинхронного двигателя.

Отметим, что у короткозамкнутых асинхронных двигателей малой мощности в кривой вращающего момента $M=f(\sigma)$ имеет место провал при скольжении, близком к единице (см. кривую a для двигателя мощностью в 2 квт на рис. 44). Причины этого провала заключаются в несинусоидальном распределении магнитного потока по окружности ротора, иначе говоря, — во влиянии так называемых высших гармонических магнитодвижущей силы. Эти высшие гармонические при малых скоростях двигателя создают отрицательный (генераторный тормозной) момент, который и обуславливает указанный выше провал при скольжении, близком к единице. Очевидно, что этот провал ограничивает величину пускового момента двигателя. По американским нормам, минимальная величина вращающего момента короткозамкнутого двигателя должна быть не ниже $1,5 M_N$. Наши нормы сильно занижают эту величину, допуская минимум в $0,6 M_N$. Такая величина M_{min} является явно недопустимой и должна быть пересмотрена, так как она приводит к необходимости брать короткозамкнутые двигатели по условиям величины пускового момента большей мощности, чем то требуется нормальной работой.

26. Механические характеристики асинхронных двигателей

Для механической характеристики асинхронного двигателя можно получить удобное выражение, если сначала в равенство (29) подставить значение опрокидывающего скольжения σ_m . Тогда получим значение опрокидывающего момента M_{max} . Берем отношение M и M_{max} , получим выражение для механической характеристики в виде:

$$M = \frac{2 M_{max}}{\frac{\sigma}{\sigma_m} + \frac{\sigma_m}{\sigma}} \quad (32)$$

Это выражение носит название упрощенного уравнения Клосса. Оно получается вообще в том случае, если мы пренебрежем активным сопротивлением фазы статора r_1 , что допустимо лишь для крупных двигателей. В мелких двигателях (а короткозамкнутые двигатели как раз применяются в первую очередь при малых и средних мощностях) учет влияния r_1 необходим. В таком случае получается более сложное равенство для момента двигателя:

$$M = \frac{2 M_{max} \cdot (1 + \epsilon)}{\frac{\sigma}{\sigma_m} + \frac{\sigma_m}{\sigma} \pm 2\epsilon} \quad (33)$$

Это выражение носит название полного уравнения Клосса. В нем величина $\epsilon = \frac{r_1}{x_\sigma}$, где x_σ — полное реактивное сопротивление статора и ротора двигателя. Численно величина ϵ может приниматься равной $5 \sigma_N$ где σ_N — номинальное скольжение двигателя. В равенстве (33) знак (+) относится к двигательному режиму, знак (-) к генераторному, рекуперативному, получаемому при работе двигателя выше син-

хронной скорости. Для пользования приведенными равенствами (32) и (33) необходимо знать σ_m и M_{max} двигателя. В каталогах на асинхронные двигатели величина σ_m обычно не дается, а указывается лишь величина допустимой мгновенно для двигателя перегрузки $\lambda_m = \frac{M_{max}}{M_N}$.

Так как согласно (33)

$$\lambda_m = \frac{M_{max}}{M_N} = \frac{\frac{\sigma_N + \sigma_m}{\sigma_m} + 2\varepsilon}{2(1 + \varepsilon)},$$

то

$$\sigma_m = \sigma_N \left\{ [\lambda_m + (\lambda_m - 1)\varepsilon] + \sqrt{[\lambda_m + (\lambda_m - 1)\varepsilon]^2 - 1} \right\}. \quad (34)$$

В рабочем режиме двигателя, лежащем между $\sigma = 0$ и $\sigma = \sigma_m$ (рис. 45), в упрощенной формуле Клосса (32) отношением $\frac{\sigma}{\sigma_m}$ по сравнению с отношением $\frac{\sigma_m}{\sigma}$ с достаточной для практики точностью можно пренебречь. При этом получается прямолинейная зависимость вращающего момента двигателя M_d от скольжения

$$M_d = M_{max} \cdot \frac{2\sigma}{\sigma_m} = c_\sigma \cdot \sigma = \frac{M_N}{\sigma_N} \cdot \sigma. \quad (35)$$

Значение M_N может быть вычислено по номинальной мощности P_N и номинальному числу оборотов в минуту n_N , указываемым на паспорте машины:

$$M_N = \frac{P_N}{\omega_N} = \frac{P_N}{\frac{2\pi n_N}{60}}; \quad \sigma_N = \frac{n_0 - n_N}{n_0}.$$

Обыкновенный короткозамкнутый асинхронный двигатель имеет всего лишь одну механическую характеристику $M = f(\sigma)$. Согласно ГОСТ 183-41, кратность начального пускового вращающего момента, т. е. $M_{нач} : M_N$, у трехфазных асинхронных короткозамкнутых двигателей должна быть не ниже 0,9. Кратность минимального вращающего момента в процессе пуска того же двигателя не ниже 0,6.

Кратности максимальных вращающих моментов трехфазных асинхронных двигателей (кроме крановых) должны быть: а) у двигателя с контактными кольцами — не ниже 1,8; б) у двигателя короткозамкнутого — не ниже 1,65.

В асинхронном двигателе с кольцами изменением сопротивления, вводимого в цепь ротора через кольца, представляется возможным варьировать механические характеристики. При неизменных напряжении и частоте сети, максимальный вращающий момент двигателя M_{max} остается постоянным. Однако величина скольжения σ_m , при котором этот момент двигателя достигнет максимума, будет меняться в соответствии с величиной добавочного сопротивления, введенного в цепь ротора двигателя, так как

$$\sigma'_m = \frac{r_r + R_d}{2\pi L_2 v_1}, \quad (31')$$

где R_d — добавочное сопротивление в цепи ротора двигателя.

При разных сопротивлениях в цепи ротора R_d получаем семейство механических характеристик, представленное на рис. 45. На нем $R_{d1} < R_{d2} < R_{d3} < R_{d4}$.

В случае пуска в ход двигателя с кольцами сопротивление его непрерывно ручным или автоматическим способом меняется. В результате двигатель при пуске проходит по участкам кривых, показанных на рис. 45 жирными линиями. Практически при этом используются в основном лишь прямолинейные части механических характеристик двигателя.

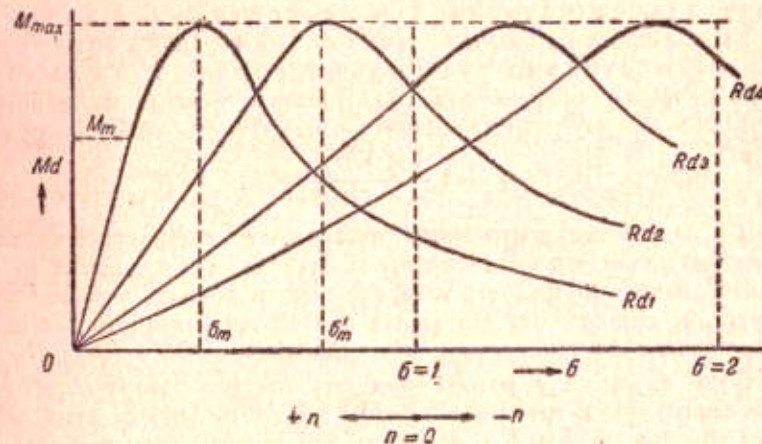


Рис. 45. Характеристики асинхронного двигателя с кольцами при разных сопротивлениях в цепи ротора.

Построение характеристик при вводимых в цепь ротора добавочных омических сопротивлениях основывается на следующем. При равенстве для естественной и искусственной характеристик двигателя реактивных сопротивлений ротора, когда

$$\sigma_m = \frac{r_r}{2\pi L_2 v_1}, \quad \text{а} \quad \sigma'_m = \frac{r_r + R_d}{2\pi L_2 v_1},$$

получаем:

$$\frac{\sigma'_m}{\sigma_m} = \frac{r_r + R_d}{r_r},$$

где σ'_m — опрокидывающее скольжение при искусственной характеристике. Кроме того, для этой характеристики, согласно (32),

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{\sigma}{\sigma_r} + \frac{\sigma_m}{\sigma}}. \quad (32')$$

Рассматривая случай одинаковых моментов вращения двигателя M на естественной (32) и искусственной (32') характеристике, получаем:

$$\frac{\sigma'}{\sigma_m} + \frac{\sigma'_m}{\sigma'} = \frac{\sigma}{\sigma_m} + \frac{\sigma_m}{\sigma}. \quad (35')$$

Это равенство осуществляется лишь при условии, что

$$\frac{\sigma'}{\sigma_m} = \frac{\sigma}{\sigma_m} \quad (36)$$

подставляя в (36) вместо σ'_m приведенное выше его значение, имеем:

$$\frac{\sigma'}{\sigma} = \frac{r_r + R_d}{r_r} \quad (37)$$

Таким образом, при любом одинаковом вращающем моменте для естественной и искусственной характеристики скольжение на искусственной характеристике σ' во столько раз больше скольжения на естественной σ , во сколько раз сопротивление фазы цепи ротора $(r_r + R_d)$ больше внутреннего сопротивления фазы обмотки ротора r_r :

$$\sigma' = \sigma \cdot \frac{r_r + R_d}{r_r} \quad (37')$$

Как и в двигателях постоянного тока расчет механических характеристик удобно проводить в относительных единицах и в процентах (п. 8). В отличие от машин постоянного тока, где имеется лишь одно номинальное напряжение, в асинхронных двигателях приходится различать два номинальных напряжения: номинальное линейное напряжение статора U_{N1} и номинальную э. д. силу ротора при разомкнутом роторе E_{20} . Точно также в асинхронном двигателе приходится иметь дело с двумя номинальными токами: статора I_{sN} и ротора I_{rN} . В асинхронных двигателях с кольцами номинальное сопротивление для ротора при соединении его обмоток звездой

$$R_{rN} = \frac{E_{2NO}}{1,75 \cdot I_{rN}} \quad (38)$$

где E_{rNO} — э. д. сила на кольцах разомкнутого неподвижного ротора, а I_{rN} — номинальный ток ротора.

Относя сопротивления в равенстве (37') к номинальному сопротивлению ротора и выражая все величины в процентах, получим:

$$\begin{aligned} \sigma' \cdot 100 &= \sigma \cdot 100 \cdot \frac{\frac{r_r + R_d}{R_{NO}} \cdot 100}{\frac{r_r}{R_{NO}} \cdot 100} \\ \sigma' / \sigma &= \sigma^0 / \sigma^0 \cdot \frac{(r_r + R_d)^0 / \sigma^0}{r_r^0 / \sigma^0} \quad (39) \end{aligned}$$

Так как работа асинхронного двигателя с кольцами протекает на прямолинейных частях механических характеристик, то построение последних может быть выполнено следующим образом. Все характеристики проходят через точку синхронной скорости $n_0 = \frac{\nu_1 \cdot 60}{p}$ или $\sigma = 0$ и прямолинейны. Вторая точка любой механической характеристики может быть найдена по равенству

$$M = \frac{M_N}{\sigma_N} \cdot \frac{r_r}{r_r + R_d} \cdot \sigma \quad (40)$$

При номинальном моменте двигателя скольжение σ' в процентах равно сопротивлению цепи ротора ρ в процентах. Расчет может быть проведен также графически по рис. 12.

27. Асинхронные короткозамкнутые двигатели Бушера и с глубоким пазом

Кривые моментов обыкновенных асинхронных короткозамкнутых двигателей, представленные на рис. 44, оказываются в ряде случаев практически неподходящими, с одной стороны, из-за сильного снижения момента двигателя от точки M_{max} между σ_m и $\sigma = 1$ и большого пускового тока обыкновенных короткозамкнутых двигателей, с другой. Пусковой ток в них в покое достигает 5—7-кратной номинальной величины. Поэтому на практике используют также короткозамкнутые дви-

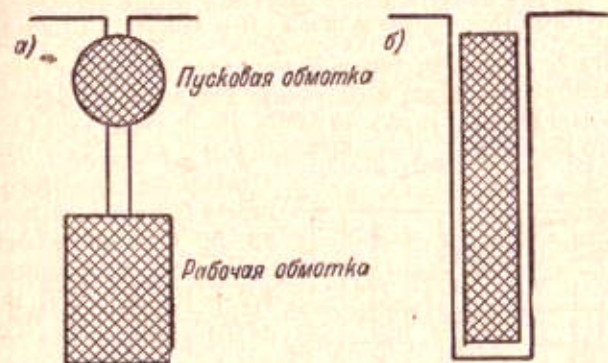


Рис. 46. Впадина ротора двигателя Бушера и с глубоким пазом.

гатели с усложненной конструкцией ротора. В двигателе типа Бушера применяется на роторе две короткозамкнутые обмотки (рис. 46, а). Одна из них — обычно из никелина (верхняя) — обладает большим активным и малым индуктивным сопротивлением, вторая — из меди (нижняя) — наоборот, малым активным и большим реактивным сопротивлением. Вследствие таких соотношений активного и реактивного сопротивлений, каждая обмотка дает максимум вращающего момента при другом скольжении. Благодаря такой конструкции, т. е. сложению в двигателе двух вращающих моментов от двух обмоток, удается получить примерное постоянство вращающего момента, развиваемого двигателем от покоя до нормальной скорости. На рис. 47 представлены для сравнения кривые изменения момента и тока: а — нормального короткозамкнутого двигателя; б — двигателя Бушера.

Некоторая сложность конструкции двигателя Бушера повела к созданию короткозамкнутого двигателя с так называемым глубоким пазом, у которого отношение высоты к ширине паза достигает величины порядка 8 и выше (рис. 46, б). Такой глубокий паз как бы эквивалентен целому ряду обмоток, с постепенным уменьшением активного сопротивления и постепенным увеличением индуктивного сопротивления по

мере перемещения по пазу от воздушного зазора в глубь железа. В итоге получаем результирующее изменение момента и тока двигателя, согласно рис. 47, в.

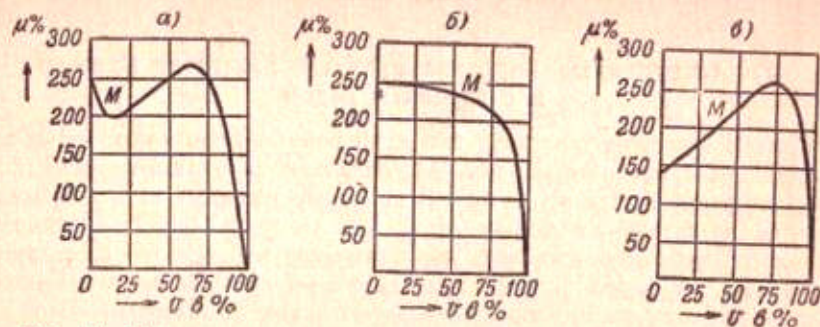


Рис. 47. Кривые момента и тока двигателя обыкновенного короткозамкнутого (а), с глубоким пазом (б) и двигателя Бушера (в).

Как двигатели Бушера, так и двигатели с глубоким пазом строятся заводом «Электросила» от нескольких киловатт до нескольких тысяч киловатт. В двигателях с глубоким пазом мощностью до 13 квт, отношение пускового момента M_p к номинальному M_N составляет от 1,4 до 2,0.

Отношение пускового тока двигателя I_p к номинальному I_N — от 4 до 5. Соответствующие цифры в двигателях большей мощности 1,2 — 1,4 и 4 — 5. В двигателях Бушера отношения $k_M = \frac{M_p}{M_N}$ и $k_I = \frac{I_p}{I_N}$ характеризуются обычно следующими цифрами:

Мощность в квт	k_M	k_I
11—22	2,25—2,5	4,5
30—75	1,75—2,0	4,5
90 и выше	0,75—1,0	4—4,5

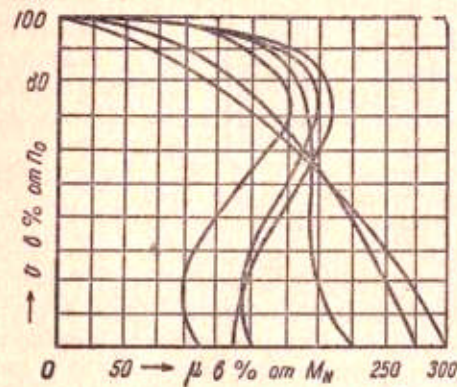


Рис. 48. Характеристики различных короткозамкнутых двигателей для металлорежущих станков.

Кривые $M = f(s)$ для двигателей Бушера и с глубоким пазом не поддаются аналитическому выражению даже по полной формуле Клосса. Поэтому, как и механические характеристики серийных двигателей постоянного тока, характеристики этих двигателей приходится представлять графически (рис. 47). Для сравнения взяты двигатели с одинаковым максимальным моментом. На рис. 48 даны для примера характеристики различных короткозамкнутых американских двигателей, применяемых на металлорежущих станках.

Для снижения пусковых токов короткозамкнутых двигателей иногда применяется пуск их от пониженного напряжения. Получаемые при этом, пусковые свойства характеризуются табл. 6.

Характеристика пусковых свойств короткозамкнутых асинхронных двигателей при разных кратностях пускового тока $I_{пуск}$ при U_N

Метод пуска	Отношение пускового момента к номинальному U_d/U_N	Отношение пускового момента к моменту при U_N	Максимальные пусковые $kVA : kWN$ двигателя			Минимальные пусковые kVA ; пусковые kVA при U_N
			$k=4$	$k=6$	$k=8$	
Пуск от полного напряжения	1,0	1,0	3,0	4,4	6,0	1,0
	0,8	0,64	2,0	3,0	4,0	0,65
	0,65	0,42	1,3	2,0	2,8	0,45
Пуск через автотрансформатор	0,5	0,25	0,8	1,3	1,6	0,30
	0,8	0,64	2,0	3,1	4,1	0,70
Пуск через одну ступень активного сопротивления	0,5	0,25	1,5	2,2	3,0	0,50
	0,45	0,20	1,3	2,0	2,6	0,45
	0,375	0,14	1,1	1,6	2,2	0,40

Для ряда исполнительных механизмов оказывается целесообразным применять короткозамкнутые двигатели с увеличенным или, как обычно говорят, с повышенным номинальным скольжением. В отличие от обычных короткозамкнутых двигателей, имеющих номинальное скольжение в 2—3%, двигатели с повышенным скольжением имеют номинальное скольжение в 10—14%. Подобные двигатели оказываются совершенно необходимыми для ряда металлорежущих станков с большим числом пусков и реверсов в час в целях уменьшения пусковых потерь и уменьшения нагрева двигателя. Анализ соответствующих вопросов дан далее в п. 53 и 54.

Двигатели с повышенным скольжением находят также применение:

- а) для приводов с пульсирующей нагрузкой, как-то: молотов, прессов, штамповочных станков и т. п.;
- б) для приводов, требующих большого пускового момента или отличающихся тяжелыми условиями пуска, например вспомогательные механизмы металлорежущих станков, кардочесальные машины, холодильные компрессоры и т. д.;
- в) для приводов с меньшей продолжительностью пуска и реверса;
- г) в целях повышения устойчивости работы электроприводов при предполагаемых толчках нагрузки и колебаниях напряжения.

28. Тормозные характеристики асинхронных двигателей

В асинхронных двигателях, как и в других электрических двигателях, возможны три основных режима торможения: 1) режим противовключения, когда машина вращается против поля; 2) режим рекуперативного торможения, когда машина вращается в сторону поля со скоростью большей скорости вращающегося магнитного поля n_0 ; этот режим возможен, например, при спуске груза или в двигателях с переключением полюсов (п. 29); 3) режим динамического торможения, когда отсоединенная от сети машина, возбуждаемая в статор постоянным током или от отдельных возбудителей, или от купроксных выпрямителей КВ (п. 97), работает синхронным генератором при переменной частоте. Схемы основных режимов представлены на рис. 49.

Режим противовключения осуществляется переключением перед торможением двух фаз статора двигателя. Характеристики противовключения являются продолжением двигательных характеристик в IV квадранте (рис. 50). Так как при переходе на режим противовключения поле статора начинает пересекать обмотки ротора с большей скоростью, чем в двигательном режиме, а следовательно, в роторе начинают индуцироваться большие э. д. силы, то противовключение в двигателях с кольцами осуществляется лишь на искусственных характеристиках, а не на естественной. Основные трудности применения этого метода в автоматических схемах во многих случаях заключаются в отсутствии специального реле совершенной конструкции, которое отключало бы двигатель при достижении нулевой скорости. Оставшись приключенным к сети, двигатель будет развращаться в противоположном направлении.

Характеристики генераторного рекуперативного режима располагаются во II квадранте. Кривые генераторного тормозного момента аналогичны таковым для двигательного режима. Опрокидывающие скольжения в ге-

нераторном и двигательном режиме, при одном и том же сопротивлении в цепи ротора, одинаковы $\sigma'_g = \sigma'_m$, максимальный же момент генераторного режима $M_{\max g}$ больше, чем двигательного $M_{\max d}$. Аналитически

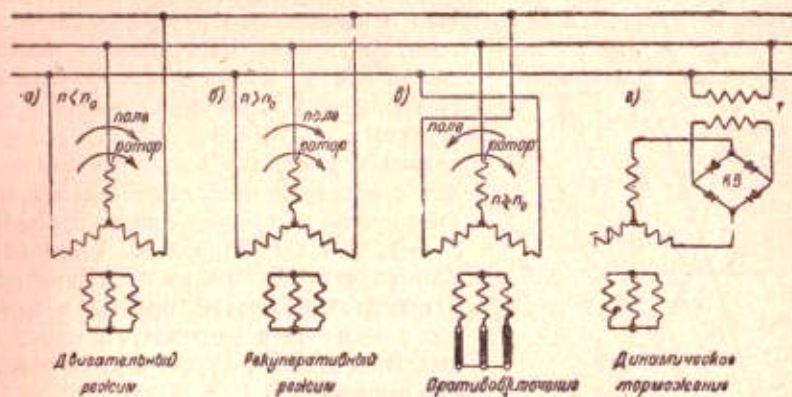


Рис. 49. Схемы основных режимов работы асинхронных двигателей.

это выражается равенством (33). Происходит же это в силу того, что в двигательном режиме падение напряжения в машине покрывается за счет напряжения сети, в генераторном же — за счет самой машины

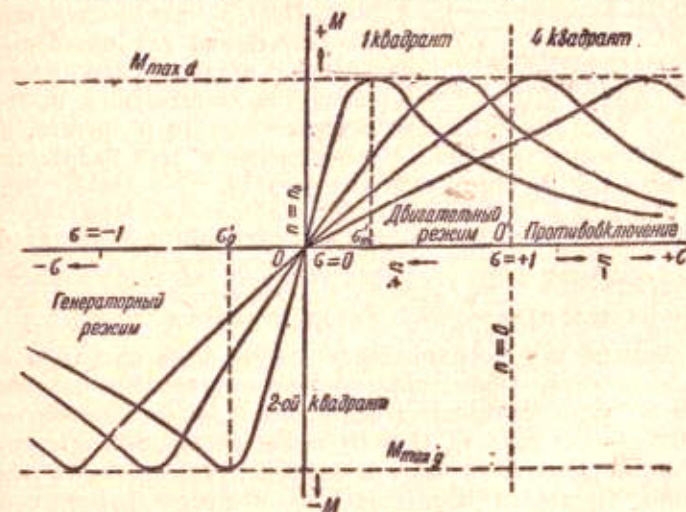


Рис. 50. Полный комплекс характеристик асинхронного двигателя.

При динамическом торможении асинхронный двигатель работает как синхронный генератор с неподвижными полюсами. Так как частота синхронного генератора $\nu = \frac{pn}{60}$, то по мере снижения скорости двигателя частота его уменьшается. Форма кривой вращающего момента в этом случае одинакова с таковой в двигательном режиме и определяется ве-

личной добавочного сопротивления в роторе (рис. 51). Величина постоянного тока возбуждения зависит от схемы включения обмоток машины и ограничена нагревом и односторонним магнитным притяжением между статором и ротором.

Некоторые недостатки тормозных характеристик противовключения, а также отсутствие совершенного отключающего реле, редкие возможности рекуперативного торможения, осуществляющегося лишь при скорости выше синхронной, необходимость в постоянном токе при динамическом торможении вместе с трудностями получения низких скоростей повели к тому, что в ряде случаев приводов с асинхронными двигателями при частых пусках и реверсах применяются более сложные типы приводов. Так, иногда используется привод от двух двигателей половинной мощности, причем в тормозном режиме одна машина работает в двигательном режиме, другая в режиме противовключения [Л, 1, т. II, стр. 283 — 300]. Иногда для торможения по валу асинхронного двигателя применяется тормозной генератор постоянного тока. Есть схемы, при которых асинхронный двигатель во время торможения включается как однофазный. Иногда применяются варианты с двумя двигателями для привода — один с кольцами; второй — короткозамкнутый. Комбинируя двигательные и тормозные характеристики того и другого, пытаются получить желаемые режимы. Исследования в этих направлениях еще ведутся как в СССР, так и в других странах.

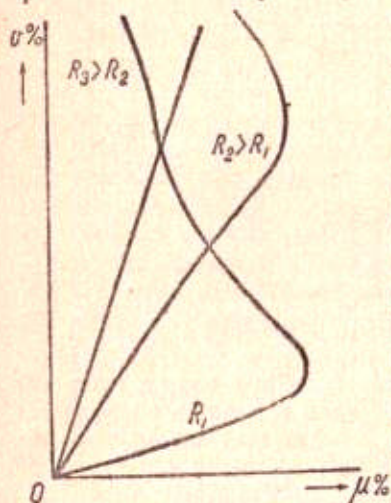


Рис. 51. Кривая тормозного момента при динамическом торможении.

29. Регулирование скорости асинхронных двигателей

Число оборотов в минуту вращающегося магнитного поля в асинхронном двигателе $n_0 = \frac{\nu_1 \cdot 60}{p}$. Ротор стремится вращаться со скоростью, близкой к n_0 и разнящейся от нее лишь на малую величину за счет скольжения. Принципиально наиболее простым способом регулирования скорости асинхронных двигателей было бы плавное изменение частоты питающего тока ν_1 . Однако такое регулирование требует специальных преобразователей частоты в форме: 1) синхронного генератора, приводимого двигателем постоянного тока с регулируемой скоростью; 2) коллекторных машин переменного тока, вращаемых двигателями с регулируемой скоростью; 3) ионных аппаратов (практическое применение в стадии изучения). Все это обычно удорожает установку. Поэтому регулирование частотой применяется в очень редких случаях, когда необходимо идентично регулировать скорость большой группы двигателей (рольганги на металлургических заводах, некоторые прядильные машины в текстильном производстве). Для одиночных приводов в промышленности этот тип регулирования применяется в редчайших случаях.

Ступенчатое регулирование скорости можно получить переключением полюсов двигателя; обычно применяемое и наиболее удобное для переключения соотношение пар полюсов 1:2. Такое переключение удобно лишь для короткозамкнутых двигателей, так как в них ротор автоматически по-

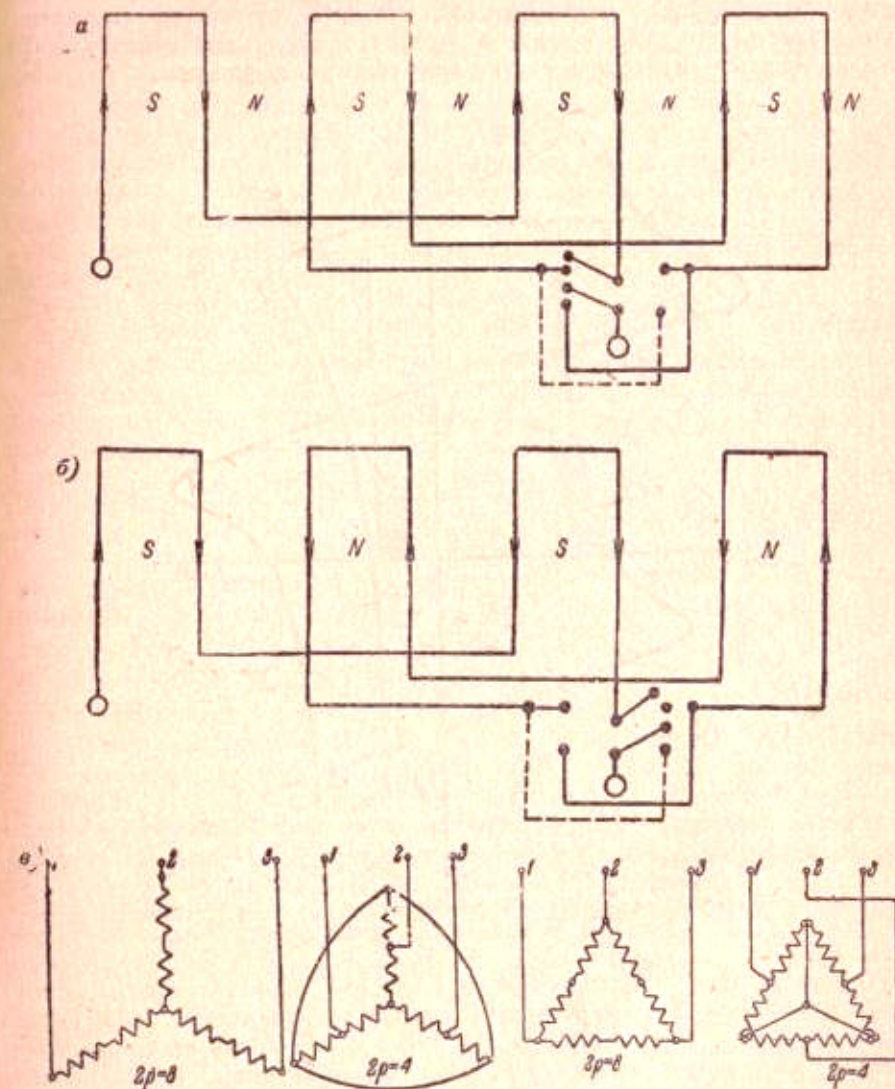


Рис. 52. Переключение полюсов в статоре асинхронного двигателя.

лучает то число полюсов, которое задается статором. Переключение обмотки ротора двигателя с кольцами на две разных комбинации полюсов потребовало бы добавочных колец, что значительно удорожило бы машину. Поэтому в двигателях с кольцами переключение числа полюсов практически почти не применяется.

Короткозамкнутый двигатель с одной статорной обмоткой и переключением на две комбинации полюсов называется двухскоростным. Идея переключения показана на рис. 52. Рис. 52,а показывает, как меняются полюса при переключении тока в проводниках обмотки. Рис. 52,б показывает схему переключения обмоток с $2p=8$ на $2p=4$. Рис. 52,в дает схему переключения по так называемому способу Даландера. Особенность его заключается в том, что здесь при переключении осуществляется переход с соединения обмоток треугольника на двой-

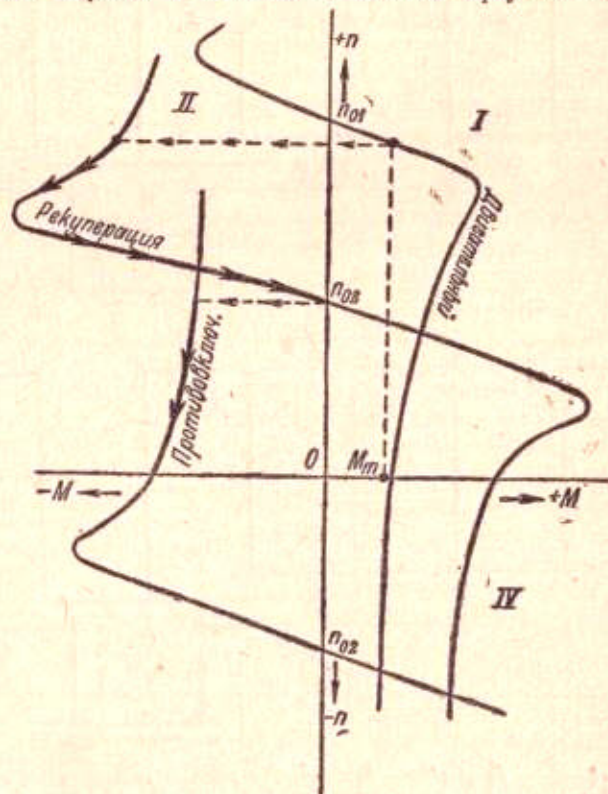


Рис. 53. Механические характеристики двухскоростного двигателя.

ную звезду. При переключении по схеме рис. 52,б двигатель на обоих числах полюсов может развивать один и тот же момент M . В схеме Даландера (рис. 52,в) двигатель при обеих комбинациях дает приблизительно постоянную мощность P . При желании иметь три скорости в статоре короткозамкнутого двигателя, называемого трехскоростным, устраивают две отдельные обмотки, одну переключаемую, вторую — нет. Четырехскоростный двигатель имеет две переключаемые обмотки статора. Наиболее часто встречающиеся комбинации синхронных чисел оборотов в минуту четырех скоростных двигателей следующие: 1) 500/1000/1500/3000; 2) 500/750/1000/1500; 3) 500/600/750/1000 (последняя комбинация с тремя обмотками).

Механические характеристики двухскоростного двигателя для двигательного режима, рекуперативного генераторного и противвключения даны на рис. 53. Там же показано, как можно осуществить электрическое торможение: а) при переходе от высшей синхронной скорости $n_{01} = \frac{v_1 \cdot 60}{p_1}$ к низшей $n_{02} = \frac{v_1 \cdot 60}{p_2}$ (где $p_1 = \frac{p_2}{2}$) рекуперативным торможением; б) от скорости n_{02} до 0 в режиме противвключения. Переход по характеристикам показан жирными линиями. Для графического изображения перехода на режим противвключения использована характеристика обратного хода (см. п. 16). Переключение полюсов дает возможность осуществить лишь ступенчатую регулировку скорости. Плавную регулировку скорости можно получить лишь в двигателе с кольцами, меняя сопротивление в цепи ротора.

Возможность подобной регулировки вытекает из следующих соображений. Момент, развиваемый двигателем:

$$M = c \cdot \Phi_s \cdot I_r = c_1 \cdot I_r,$$

так как при постоянном напряжении на зажимах двигателя магнитный поток статора Φ_s тоже неизменен. Таким образом, при постоянном моменте на валу двигателя M сила тока в роторе должна оставаться неизменной. Но

$$I_r = \frac{E_r}{z_r} = \frac{c' \cdot \Phi_s \cdot (n_0 - n)}{z_r} \approx c' \cdot \sigma.$$

Если, при некоторой нагрузке двигателя, в ротор его будет введено добавочное сопротивление R_d , то сила тока в роторе сначала уменьшится:

$$I_r = \frac{E_r}{z_r + R_d};$$

при уменьшенной силе тока в роторе двигатель не будет в состоянии преодолеть приложенный к нему момент. Ротор двигателя будет затормаживаться до тех пор, пока сила тока не достигнет прежней величины. Число оборотов ротора в минуту упадет, так как $E_r = c' \cdot \Phi_s (n_0 - n)$ должна увеличиться. Двигатель, при уменьшенном числе оборотов в минуту, станет развивать момент, соответствующий моменту рабочей машины.

Этот способ регулировки неэкономичен из-за больших потерь в ростате. Применяется он, в основном, лишь в крановых приводах. В приводах с редкими пусками в час он используется лишь тогда, когда пределы регулирования не превышают 20% (т. е. 1:0,8).

Во избежание потерь при больших мощностях двигателей и пределах регулирования не выше 30% (1,8:1), в цепь ротора вводятся добавочные машины. Эти машины своей электродвижущей силой плавно меняют скорость ротора. Подобные установки называются каскадными. Наиболее часто применялись каскад Кремера (с двигателем постоянного тока и одноякорным преобразователем) и каскад Шербиуса (с коллекторной машиной переменного тока Шербиуса). Использовались они на прокатных станах и шахтных вентиляторах. Ныне, в связи с расширением предела регулирования рабочих машин и большим внедрением многодвигательного привода, асинхронные каскады для новых установок в сильной степени утратили свое значение.

Синхронный двигатель является двигателем строго постоянной скорости, равной $n_0 = \frac{\nu \cdot 60}{p}$. Никакая регулировка скорости его практически невозможна, так как регулирование частоты неприменимо. Основным преимуществом синхронного двигателя, кроме строго постоянства скорости, является его высокий коэффициент мощности (косинус фи). Меняя ток возбуждения в синхронном двигателе, можно просто регулировать его $\cos \varphi$ (рис. 54). Одновременно с $\cos \varphi$ меняется и потребляемый двигателем ток. Нормальные синхронные двигатели проектируются на $\cos \varphi = 1$ или $\cos \varphi = 0,8$ при опережающем токе. Работа при опережающем токе повышает перегрузочную мощность синхронного двигателя.

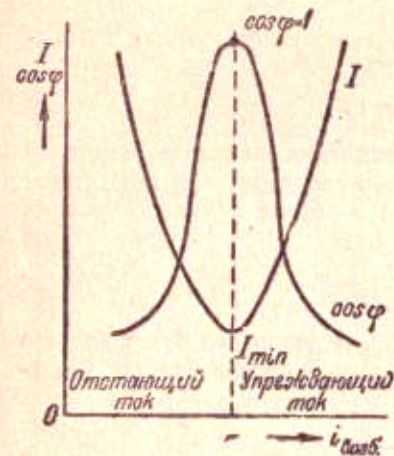


Рис. 54. Изменение тока и коэффициента мощности асинхронного двигателя при регулировании тока возбуждения.

Согласно ГОСТ 183-41, кратность максимального вращающего момента синхронного двигателя при номинальных напряжении, частоте и токе возбуждения и рабочем соединении обмоток,

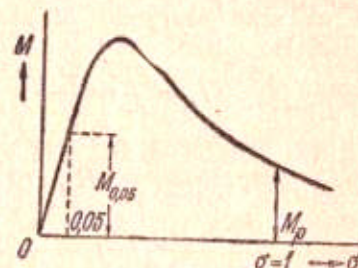


Рис. 55. Механическая характеристика синхронного двигателя для пуска.

в случае двигателя с опережающим коэффициентом мощности 0,8, должна быть не ниже 1,65.

В табл. 7 приведены данные, характеризующие механические свойства синхронных двигателей. Пуск современных синхронных двигателей производится не синхронизацией, так как это требовало бы отдельного двигателя (асинхронного с регулировкой в роторе или постоянного тока, в большинстве случаев по мощности не сильно отличающейся от самого синхронного двигателя). Все современные синхронные двигатели пускаются в ход как короткозамкнутые асинхронные. Для этого в полюсах двигателя устраивается особая пусковая обмотка. Во время пуска двигатель работает как асинхронный с соответствующей механической характеристикой.

Ввиду сложности аналитического выражения, эту характеристику представляют обычно графически. Одна из них дана на рис. 55. Для пуска двигателя характерны два вращающих момента: 1) пусковой M_p при $\sigma = 1$; 2) подсинхронный ($M_{0,05}$) при $\sigma = 0,05$. Первый должен быть достаточен для того, чтобы двигатель взял с места и разогнался в нуж-

Свойства нормальных синхронных двигателей

Тип двигателя	Пусковой момент M_p %	Подсинхронный момент $M_{0,05}$ %	Перегрузочный момент M_{max} %	Пусковой ток при I_p %	
Нормальные стандартные двигатели средних мощностей, $\cos \varphi = 1$	На 500—1000 об/мин	110	110	175	550—750
	На 1500 об/мин	110	110	150	550—750
	То же, $\cos \varphi = 0,8$				
на 500—1000 об/мин	125	125	250	500—700	
на 1500 об/мин	125	125	200	500—700	
Двигатели больших мощностей, $\cos \varphi = 1$	500—1500 об/мин				
	180—400 квт	110	110	150	550—750
	450 квт и выше	85	85	150	550—750
То же, $\cos \varphi = 0,8$	180—400 квт	110	110	200	500—700
	450 квт и выше	85	85	200	500—700
	Тихоходные для поршневых компрессоров, 500 об/мин и ниже $\cos \varphi = 1$		40	30	140
То же, $\cos \varphi = 0,8$		40	30	200	225—400
Специальные средней скорости	175	115	200	500—600	

ное время. Второй должен иметь достаточную величину, чтобы двигатель дошел до скорости, близкой к синхронной, и при включении постоянного тока в обмотку возбуждения впал в синхронизм.

Как M_p , так и $M_{0,05}$ должны быть больше момента нагрузки. Ввиду того, что при пуске от полного напряжения синхронный двигатель берет большую силу тока (табл. 7), то в ряде случаев двигатель пускают в ход или через трансформатор или через реактор; при более тяжелых условиях пуска и больших мощностях применяют комбинированную схему последовательного пуска сначала через трансформатор, затем через реактор. Подобная схема носит название схемы Кори дорфера. Необходимо иметь в виду, что эти способы снижают силу пускового тока двигателя пропорционально снижению приложенного напряжения, зато они снижают и развиваемый двигателем момент пропорционально квадрату напряжения. Выбор схемы зависит от условий механизма и от мощности питающей двигатель подстанции. Схема пуска синхронного двигателя в ход исключительно автоматическая.

31. Основные типы промышленных коллекторных двигателей переменного тока и их применение

Коллекторные двигатели являются такими двигателями переменного тока, которые поддаются широкой регулировке скорости. Схемы включения, нашедших наибольшее распространение в зарубежной практике типов коллекторных двигателей, даны на рис. 56 а. На нем 1 представляет однофазный двигатель Дери с двумя комплектами щеток: 1—1 — неподвижными и 2—2 перемещающимися. Пуск двигателя в ход и регулировка скорости производится сдвигом щеток. Двигатели, в зависимости от положения щеток, обладают различными серийными характеристиками, представленными на рис. 56б. Нормальные пределы регулирования — от 50 до 120% синхронной скорости, т. е. с соотношением 2,4:1. Выше 20% синхронной скорости, по условиям коммутации, эти двигатели работать не могут. За счет значительного снижения мощности машины можно расширить пределы регулирования до 5—120% синхронной скорости, т. е. получить соотношение 24:1. Такое снижение скорости возможно лишь на весьма ограниченный промежуток времени.

Второй распространенный тип (2 на рис. 56а) — это трехфазный шунтовой коллекторный двигатель типа Шраге. В нем питание двигателя происходит через ротор. Статор является вторичной цепью. На ротор наложена вторая обмотка, в которой вращающимся полем ротора индуцируется э. д. сила. Эта э. д. сила через коллектор, связанный с обмоткой, и щетки вводится во вторичную статорную цепь. Этим и достигается регулировка скорости. Нормальные пределы регулирования — от 50 до 150% синхронной скорости, т. е. 3:1. С понижением мощности и на короткий промежуток времени эта скорость может быть снижена до 20—10% синхронной скорости, т. е. может быть получено соотношение от 7,5:1 до 15:1.

Максимальная мощность, на которую можно конструировать такие двигатели, 200—300 квт. Двигатель Шраге при регулировке является двигателем постоянного момента, т. е. при всех скоростях он может давать один и тот же момент. Мощность при этом меняется пропорционально числу оборотов в минуту. За границей на бумагоделательных машинах с многодвигательным приводом имеются коллекторные двигатели мощностью 150—200 квт с пределами регулирования до 12,5:1.

Механические характеристики двигателей Шраге по существу аналогичны таковым в шунтовых двигателях постоянного тока, получаемым при регулировке скорости током возбуждения. Только здесь эти характеристики (рис. 57) могут быть поворотом щеток доведены до низких скоростей. Здесь торможение практически может быть осуществлено по методу рекуперации (в двигателях Шраге) и по методу противовключения (в двигателях Шраге и Дери). Переход к тормозным режимам здесь может быть выполнен поворотом щеток.

Наша советская техника до сих пор не пошла по пути применения коллекторных двигателей переменного тока (за весьма малыми исключениями) по следующим причинам: 1) стоимость коллекторных двигателей сравнительно высока; 2) при большом числе регулируемых электроприводов двигателя постоянного тока (с преобразователями из переменного

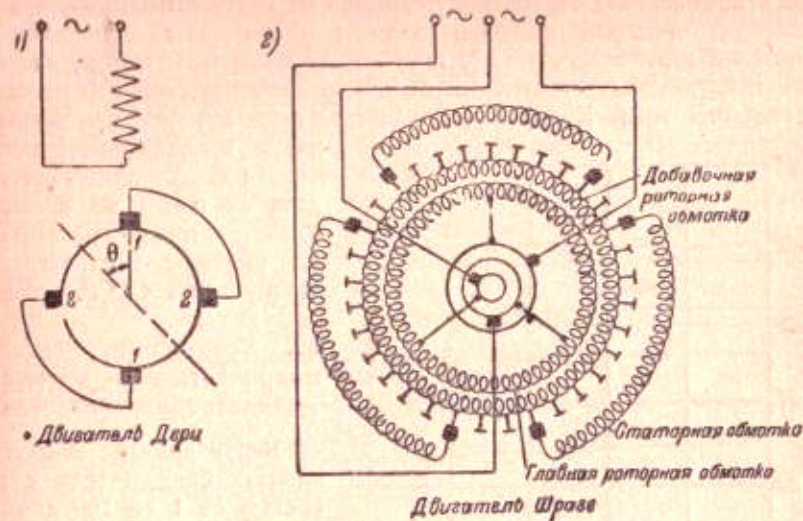


Рис. 57а. Схемы основных промышленных коллекторных двигателей переменного тока.

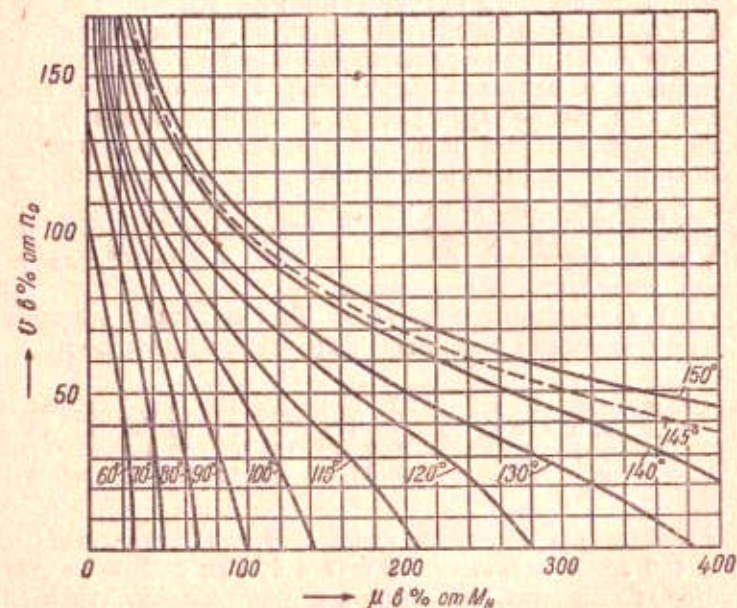


Рис. 56б. Механические характеристики двигателя Дери.

тока в постоянный) оказываются обычно не менее выгодными, чем коллекторные двигатели переменного тока; 3) эксплуатация коллекторных двигателей переменного тока с постоянным поворотом щеток, как показал опыт, требует значительно большего внимания, чем при двигателях постоянного тока. Коллекторные двигатели до сих пор использовались

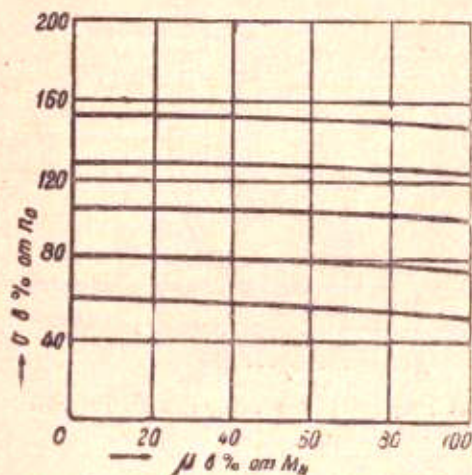


Рис. 57. Механические характеристики двигателя Шраге.

только в западно-европейской практике. Американская практика их почти не применяет. Вряд ли можно рассчитывать на широкое распространение их и у нас в СССР.

32. Карликовые двигатели, микродвигатели и высокочастотные двигатели

Карликовыми двигателями называются двигатели с мощностью от 1 до 100 *вт*, микродвигателями — мощностью менее 1 *вт*.

Двигатели эти изготовляются различных типов: 1) постоянного тока: шунтовые, серийный и компаундные; 2) универсальные для постоянного и

однофазного тока; 3) трехфазного тока: а) коллекторные универсальные, б) репульсионные (вроде типа Дери, но с общим комплектом перемещающихся диаметрально расположенных щеток); в) короткозамкнутые, г) синхронные в разных конструкциях; 4) однофазные асинхронные двигатели: а) с пуском вручную; б) с вспомогательной фазой и самоиндукцией для создания при пуске вращающегося магнитного поля; в) с вспомогательной фазой и емкостью для тех же целей; г) с вспомогательной фазой в виде замкнутого медного кольца. Все они находят применение в быту, промышленной практике и авиации. В 1943 г. в США таких двигателей было выпущено до $50 \cdot 10^6$, из них 60% составили универсальные микродвигатели.

Средние коэффициенты полезного действия таких двигателей могут быть охарактеризованы следующими примерными цифрами:

мощность в <i>вт</i> . . .	0,7—1	1,5	7,5	15	25	30	35	50
к. п. д. в % . . .	4—6	16	23	29	35	39	43	49
мощность в <i>вт</i> . . .	75	90	120	150	180	250	350	
к. п. д. в % . . .	54	56	60	62	65	69	72	

Высокочастотные двигатели конструируются для частот примерно в 300 и 400 *гц*. В частности, частота в 400 *гц* становится стандартной на некоторых самолетах, так как она вполне подходит там и для целей радиосвязи. Достижимое число оборотов в минуту двухполюсного двигателя — $3000 = \frac{60 \cdot \nu}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1}$. При 300 *гц* двухполюсный асинхрон-

ный двигатель дает 18 000 *об/мин*. В США сконструированы высокочастотные двигатели малых мощностей на 120 000 *об/мин*. В текстильной промышленности на ультрацентрифугах и крутильных веретенах применяются двигатели на 100 000 *об/мин*. Для таких двигателей используется специальное динамное железо с минимальными потерями на токи Фуко и гистерезис.

Для уменьшения потерь на трение о воздух, ротор таких двигателей помещается в вакууме. Ток высокой частоты подается двигателям или от специальных синхронных генераторов индукторного типа или от специальных преобразователей частоты. Чаще всего преобразователь

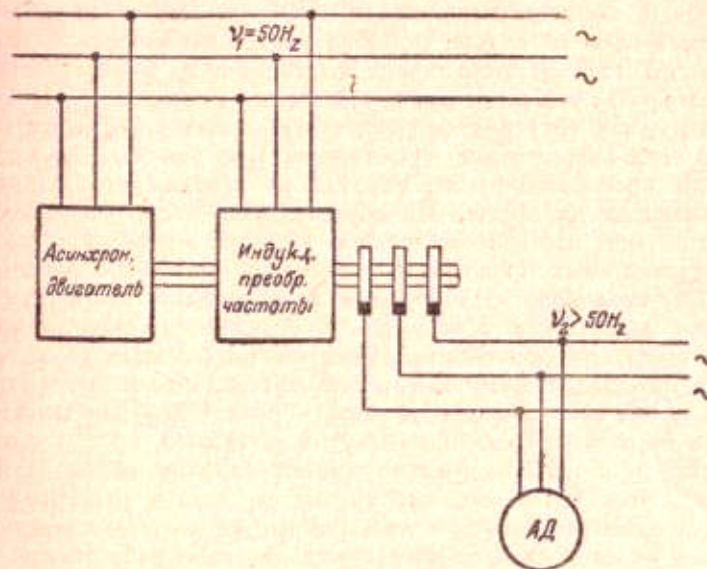


Рис. 58. Схема питания асинхронных двигателей током высокой частоты.

частоты представляет агрегат из обыкновенного асинхронного двигателя, вращающего индукционный преобразователь частоты. Последний получается из асинхронной машины, статор которой включен на сеть промышленной частоты, ротор же питает приемники высокой частоты (рис. 58). Частота тока, получаемого в роторе при вращении его против поля, равна:

$$\nu_2 = \nu_1 \cdot \alpha = \frac{n_0 + n}{n_0} \nu_1 = \nu_1 + \frac{pn}{60},$$

где p — число пар полюсов машины, а n — число ее оборотов в минуту. При необходимости в ступенчатой регулировке частоты последняя может меняться переключением числа полюсов двигателя, приводящего асинхронный преобразователь частоты.

Выбор электрического типа двигателя для привода

33. Выбор для привода электрического типа нерегулируемого двигателя

В современной практике электрическая энергия на электрических станциях как районных, так и блокстанциях отдельных мощных предприятий, требующих производственного пара или обладающих отбросным топливом, генерируется в форме переменного тока. При этом совершенно естественно для всех приводов с нерегулируемой скоростью использовать двигатели переменного тока. Тем самым мы избегаем ненужного, в данном случае, преобразования электрической энергии из переменного тока в постоянный, потребовавшего бы специальных преобразовательных агрегатов или вращающихся (двигателей — генераторов) или статических (ртутных выпрямителей). Кроме того, двигатели переменного тока (асинхронные и синхронные) по конструкции проще, чем двигатели постоянного тока, так как не требуют коллектора, легче, и обслуживание их проще. Это обуславливает исключительно широкое распространение переменного тока для приводов в промышленности.

Нерегулируемые приводы на переменном токе могут быть в основном обслужены короткозамкнутыми асинхронными двигателями, асинхронными двигателями с кольцами и синхронными. Короткозамкнутый двигатель является простейшим типом электродвигателя по конструкции и обслуживанию. Поэтому совершенно естественным является стремление ставить везде, где только возможно, короткозамкнутые двигатели. Некоторым недостатком короткозамкнутых двигателей, по сравнению с синхронными, является сравнительно низкий коэффициент мощности (косинус фи). Этот $\cos \varphi$ особенно снижается, если в отдельные периоды привод должен работать при меньших нагрузках. Этому недостатка совершенно не имеет синхронный двигатель, могущий работать при $\cos \varphi = 1$ и упрещающем токе при всех нагрузках.

Коэффициент мощности нагрузки непосредственно влияет на стоимость электрической энергии. Так, согласно последнему тарифу на электрическую энергию, установленному НКЭС приказом за № 171 от 23/VIII 1943 г. в соответствии с распоряжением СНК СССР, стоимость электрической энергии при $\cos \varphi = 0,7$ на 25% выше, чем при $\cos \varphi = 0,85$, а при $\cos \varphi = 0,6$ на 75% выше. При $\cos \varphi = 0,4$ установки вообще отключаются от электрических станций. Это удорожание энергии получается за счет необходимости при снижении $\cos \varphi$ повышать мощность генерирующих и трансформирующих электрическую энергию установок, а также за счет необходимости тратить на станциях на потери, вызванные ухудшением $\cos \varphi$, добавочное топливо или воду (на гидроэлектрических станциях). В силу этого разграничение между мощностями короткозамкнутых и синхронных двигателей определяется в основном экономическими соображениями.

Синхронный двигатель требует для своей работы постоянного тока. Этот ток получается или от отдельного возбудителя, сидящего на валу двигателя, или от заводской сети постоянного тока, если такая имеется,

или, наконец, от специального возбудительного агрегата при нескольких синхронных двигателях. Это удорожает установку. Если учесть полную стоимость установки, включая и автоматическую аппаратуру управления, то разграничение между короткозамкнутыми двигателями и синхронными по мощности, с учетом влияния $\cos \varphi$ на стоимость электрической энергии, лежит примерно в пределах от 100 до 150 *квт* (иногда даже от 75 *квт*). Меньшие мощности — это в основном область применения короткозамкнутых двигателей, большие мощности — синхронных. В практике СССР этот раздел временно лежит несколько выше, примерно около 200—250 *квт*, причем чем ниже скорость вращения двигателя, тем более экономичен синхронный двигатель. На быстроходных компрессорах в 3000 *об/мин* короткозамкнутые двигатели оказываются экономичными до 1000—2000 *квт*. Американская практика в свою очередь идет на применение синхронных двигателей до 10 *квт* в тех случаях, когда в установке имеется несколько тихоходных приводов, которые можно оборудовать синхронными двигателями. В США стандартные синхронные двигатели изготавливаются от мощностей в 10 *квт*. Наша практика, естественно, пойдет по пути дальнейшего снижения мощностей синхронных двигателей.

В пусковом отношении — в отношении толчка тока — особой разницы между короткозамкнутыми и синхронными двигателями нет, так как последние пускаются в ход как асинхронные. Как у синхронных, так и у короткозамкнутых двигателей можно снижать пусковые токи усложненной схемой включения, ведущей к снижению напряжения двигателя при пуске. При этом развиваемый двигателем вращающий момент снижается пропорционально квадрату напряжения. Характеристика пусковых свойств короткозамкнутых двигателей при разных способах пуска была дана в табл. 6.

Необходимость снижения пускового тока двигателя не требуется обычно конструкцией и условиями работы самого двигателя, но при больших мощностях короткозамкнутых и синхронных двигателей она может требоваться условием возникновения значительных падений напряжения в сети, возникающих при пусковых токах двигателей. Чрезмерные толчки тока могут сказываться на осветительных приемниках прежде всего, а также и на других двигателях. Упрощенный расчет предельной мощности короткозамкнутого двигателя можно вести по формуле:

$$\frac{\text{пусковой толчок тока}}{\text{номинальная сила тока трансформатора}} = \frac{\text{допустимое падение напряжения}}{\text{напряжение короткого замыкания трансформатора}}$$

Заметим, что двигатели Бушера обладают меньшими пусковыми токами, чем обыкновенные короткозамкнутые двигатели. В тех случаях, когда применение короткозамкнутых и синхронных двигателей оказывается невозможным или по условиям чрезмерного толчка тока или недостаточности пускового момента, приходится прибегать к асинхронным двигателям с кольцами. Последние стоят дороже короткозамкнутых, обладают несколько худшим косинусом фи и стоят дороже. Двигатели с кольцами приходится применять при мощностях свыше 200—300 *квт* и при таких ударных нагрузках, которые синхронный двигатель не выдер-

Предварительные технические данные электродвигателей трехфазных, асинхронных, защищенных с короткозамкнутым ротором, с повышенным скольжением
Тип АДС на 3000, 1500, 1000 и 750 об/мин

Таблица 10
Технические данные электродвигателей трехфазных, асинхронных, защищенных с короткозамкнутым ротором, с обмоткой лобовых частей пастой
Тип АДО на 3000 и 1500 об/мин

Тип АДО	Мощн. кат	Об/мин при ном. нагрузке	Ток при 380 в		При номинал. нагрузке		Кратность пускового тока $\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	Кратность пускового момента $\frac{M_{нач}}{M_{ном}}$	Кратность максим. пускового момента $\frac{M_{мин}}{M_{ном}}$	Кратность максим. момента $\frac{M_{макс}}{M_{ном}}$	Скольжение в % при		Махов. момент без пасты и муфты клд ²	Вес без пасты и муфт тл. ст
			$I_{ном}$	$I_{пуск}$	к. п. д. %	cos φ					$M_{макс}$	$M_{мин}$		
21/2	1,4	2930	3,1	28	81	0,84	9	1,1	3	19	19	96	$19,5 \cdot 10^{-3}$	27
22/2	1,7	2930	3,8	36	82	0,82	9,5	1,3	3,3	19	19	96	$21,5 \cdot 10^{-3}$	30
31/2	2,5	2930	5,5	52	83	0,83	9,5	1,3	3,3	15	15	96	$41,5 \cdot 10^{-3}$	42,5
32/2	3,0	2930	6,6	73	84	0,82	11	1,3	3,7	15	15	96	$45,5 \cdot 10^{-3}$	46
41/2	4,1	2940	8,8	84	85	0,83	9,5	1,3	3,2	14	14	96	$92,5 \cdot 10^{-3}$	60
42/2	4,8	2940	10,5	100	85	0,82	9,5	1,5	3,4	14	14	96	0,103	67,5
51/2	6,5	2940	14	133	86	0,83	9,5	1,5	3,4	12	12	96	0,188	86
52/2	7,5	2940	16	152	86	0,83	9,5	1,6	3,6	12	12	96	0,202	94
21/4	0,8	1430	2,1	13	77	0,75	6	0,6	2,3	22	22	92	$33,5 \cdot 10^{-3}$	25
22/4	1,1	1430	2,8	18	79	0,74	6,5	0,6	2,3	22	22	92	$28 \cdot 10^{-3}$	29
31/4	1,7	1445	4,1	27	81	0,75	6,5	0,6	2,4	18	18	92	$48,5 \cdot 10^{-3}$	35
32/4	2,3	1445	5,6	39	83	0,75	7	0,6	2,5	18	18	92	$58 \cdot 10^{-3}$	41,5
41/4	3,4	1450	7,7	58	84	0,79	7,5	1,0	2,6	18	18	95	0,118	56
42/4	4,2	1450	9,6	72	85	0,78	7,5	1,0	2,7	18	18	95	0,145	65
51/4	6,0	1460	13,1	118	86	0,81	9	1,0	3,3	18	18	95	0,200	78
52/4	7,0	1460	15,6	156	87	0,78	10	1,0	3,6	18	18	95	0,222	88,5

Тип АДС	Мощность кат	Об/мин синхр.	Ток при 380 в		При номин. нагрузке		$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{нач}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{макс}}{M_{ном}}$	Скольжение в % при номинальной нагрузке
			$I_{ном}$	$I_{пуск}$	к. п. д. %	cos φ				
21/2	1,5	3000	3,5	18	73	0,89	5,0	2,2	2,5	13
22/2	1,9	3000	4,3	22	75	0,88	5,0	2,2	2,6	12
31/2	2,8	3000	6,2	35	77	0,89	5,5	2,5	2,8	10
32/2	3,4	3000	7,4	41	79	0,88	5,5	2,6	2,9	10
41/2	4,6	3000	10,0	55	78	0,90	5,5	2,5	2,9	10
42/2	5,7	3000	12,0	72	80	0,89	6,0	2,7	3,2	9
51/2	7,0	3000	15,0	90	79	0,89	6,0	2,7	3,2	9
52/2	8,3	3000	18,0	126	81	0,88	7,0	3,0	3,5	7
21/4	0,85	1500	2,5	9	65	0,81	3,5	1,7	1,8	20
22/4	1,1	1500	3	12	69	0,80	4,0	1,7	1,9	17
31/4	1,7	1500	4,5	18	71	0,80	4,0	1,9	2,1	16
32/4	2,2	1500	5,7	26	75	0,74	4,5	1,9	2,2	13
41/4	3,2	1500	7,5	38	79	0,82	5,0	2,3	2,7	11
42/4	4,0	1500	8,3	42	79	0,93	5,0	2,3	2,7	11
51/4	5,9	1500	13,6	82	80	0,82	6,0	2,8	3,2	11
52/4	7,2	1500	16,7	100	81	0,81	6,0	2,8	3,2	10
21/6	0,5	1000	1,8	6	61	0,71	3,5	1,9	2,2	20
22/6	0,65	1000	2,3	8	63	0,69	3,5	1,9	2,2	18
31/6	1,0	1000	3,2	13	66	0,73	4,0	1,9	2,2	17
32/6	1,4	1000	4,2	17	71	0,72	4,0	1,9	2,2	13
41/6	2,2	1000	5,8	29	76	0,76	5,0	2,6	3,0	9
42/6	2,8	1000	7,3	37	77	0,76	5,0	2,6	3,0	9
51/6	3,8	1000	9,5	48	78	0,78	5,0	2,2	2,7	9
52/6	4,4	1000	10,9	55	79	0,78	5,0	2,2	2,7	9
51/8	2,1	750	5,8	23	76	0,72	4,0	1,8	2,1	13
52/8	2,5	750	7,2	29	75	0,70	4,0	2,0	2,4	13

Сводка характеристик основных систем регулируемых электроприводов

Наименование систем	Пределы регулирования	Характер регулирования	Ограничения в мощностях	Примечание
1. Двигатели постоянного тока, питаемые от постоянного напряжения	3:1, возможно получение заправочных и ползутих скоростей	Плавный	Практически нет	Получение очень низких скоростей сопряжено со значительными потерями энергии
2. Система Леонарда, в том числе и с амплином	От 10:1 до 20:1; при использовании ротороля до 120:1	Очень плавный	Практически нет	Наиболее совершенная система по возможностям регулирования и плавности переходных процессов
3. Ионный привод постоянного тока (п. 119)	От 20:1 до 60:1	Очень плавный	Средние и большие мощности ограничены ухудшением $\cos \varphi$ при регулировании	В стадии первых применений. Пока экономически реализуется до мощности в 5—10 квт
4. Асинхронные двигатели с кольцами	При постоянном моменте нагрузки 1:0,8, при вентиляторном до 1:0,6, возможно получение заправочных и ползутих скоростей	Относительно плавный	Практически нет, обычно выше 200—300 квт	Применяется относительно редко
5. Каскадные агрегаты асинхронных машин с коллекторными постоянными и переменными токами	Не выше 2:1	Плавный	Практически нет; экономичны при мощностях выше 200—300 квт	Пригодны лишь для однодвигательных, а не многодвигательных приводов
6. Короткозамкнутые асинхронные двигатели	Обычно не выше 4:1	3—4 ступени	Практически нет	Наибольшее значение имеет в приводе металлообработывающих станков
7. Репульсионные однофазные коллекторные двигатели	От 1,2 до 0,5 синхронной скорости с получением низких заправочных скоростей	Плавный	Строятся до 75 квт	Возможно расширение пределов регулирования за счет уменьшения мощности данного габарита

живает (прокатные станы, группа Леонарда — Ильгнера). Самым типичным применением синхронных двигателей следует считать привод поршневых воздушных и аммиачных компрессоров. Как уже отмечено выше, при малых и средних мощностях в случае работы короткозамкнутых двигателей на толчковой нагрузке (пресса, молота, ткацкие станки и т. п.), в целях обеспечения лучшего режима работы и экономии энергии, эти двигатели конструируются с повышенным номинальным скольжением.

Основные технические данные на наиболее распространенные у нас короткозамкнутые двигатели типа АД приведены в табл. 8—11. Указанные в табл. 8—11 токи при напряжении двигателей в 220 в следует умножать на коэффициент 1,73, при напряжении 500 в — на 0,76.

34. Основные положения по выбору электроприводов регулируемой скоростью

Выбор типа электропривода для исполнительных механизмов с широко регулируемой скоростью представляет иногда не простую задачу. Асинхронные двигатели с кольцами дают возможность регулирования реостатом лишь в пределах 1:0,8. Короткозамкнутые асинхронные двигатели обладают лишь ступенчатой регулировкой, получаемой переключением полюсов. Коллекторные двигатели переменного тока обычно недостаточно экономичны. Поэтому во всех тех случаях, где требуется широкая регулировка скорости, приходится прибегать к преобразованию переменного тока в постоянный и использовать широко регулируемые приводы постоянного тока.

Шунтовые двигатели постоянного тока, питаемые от неизменного напряжения, могут обеспечить регулировку практически в пределах не выше, чем 3:1. При более широких пределах регулирования приходится идти на применение системы Леонарда, которая обеспечивает регулирование в пределах 10:1, 20:1, а в системах с ротороляем — даже до 120:1. В современной практике, в целях интенсификации и более совершенного ведения производственных процессов, все шире и шире применяется регулирование приводов и притом с более широким диапазоном. Для таких механизмов основной регулируемой системой чаще всего является система Леонарда. В комбинации с амплином и ротороляем она дает возможность осуществлять самые сложные графики работы с заданным режимом пуска, торможения, пути, поддержания постоянства скорости, динамического момента и т. д. При малых мощностях двигателей до 5—10 квт для тех же целей может найти применение ионный электропривод. Краткая сводная характеристика различных регулируемых систем дана в табл. 12.

Необходимо отметить, что некоторые механизмы, кроме основной скорости, требуют лишь одной другой низкой заправочной, установочной или наладочной. В таких случаях иногда применяется двухдвигательный привод большей мощности для основной скорости и меньшей — для низкой. Подобный привод может быть легко осуществлен и на переменном токе. В случае использования одного асинхронного двигателя с кольцами для той и другой цели низкая скорость, образуемая введением большого сопротивления в цепь ротора, получается недостаточно устойчивой.

Наименование систем	Пределы регулирования	Характер регулирования	Ограничения в мощностях	Примечание
8. Трёхфазные серийные коллекторные двигатели	От 1,2 до 0,5 синхронной скорости (2,4:1)	Плавный	Нормально в промышленности до 150 квт	Возможно временное получение низких скоростей
9. Трёхфазные шунтовые коллекторные двигатели	От 1,5 до 0,5 синхронной скорости (3:1)	Плавный	Нормально до 150 квт	Понижением мощности габарита могут быть расширены пределы регулирования до 15% синхронной скорости (8:1 и 10:1)

35. Некоторые особенности выбора рода тока привода при напряженном повторно-кратковременном режиме работы

Точное определение повторно-кратковременного режима дано ниже (п. 64). Он характеризуется частыми пусками привода в ход и остановками или непрерывно чередующимися нагрузкой и холостым ходом. С первыми условиями приходится встречаться в кранах, лифтах, подъемниках, вспомогательных механизмах металлургических заводов, со вторыми — в металлорежущих станках — автоматах, прессах, молотах. Ряд приводов металлорежущих станков работает также с частыми пусками и остановками. В том случае, когда режим работы не чрезмерно напряженный, т. е. число пусков в час не превышает 300 — 600, и к приводу не предъявляется требований точного осуществления какого-либо специфичного графика скорости, представляется возможным удовлетворить такие приводы асинхронными двигателями — при малых мощностях короткозамкнутыми, при средних — двигателями с кольцами. При повышении мощности двигателей применение короткозамкнутых двигателей по условиям нагрева становится затруднительным. Все пусковое, выделяющееся в цепи ротора во время пуска и электрического торможения тепло в короткозамкнутых двигателях должно рассеиваться непосредственно в обмотке ротора; в асинхронных же двигателях с кольцами и двигателях постоянного тока большая часть этого тепла рассеивается в добавочных сопротивлениях. Это затрудняет и ограничивает возможности применения короткозамкнутых двигателей средней мощности при напряженном повторно кратковременном режиме работы. Лишь в металлорежущих станках-автоматах, при мощности в несколько киловатт и ниже, специальные типы короткозамкнутых двигателей могут работать при числе пусков 3000 — 4000 раз в час. С обычными крановыми установками вполне справляются асинхронные двигатели с кольцами. При сильно напряженном режиме работы, какой встречается на металлургических заводах, в кранах и различных вспомогательных механизмах, в которых число пусков в час доходит до 1000—2000, в СССР и США применяются обычно двигатели постоянного тока. Применение двигателей постоянного тока оказывается необходимым также при требованиях осуществления какого-либо специального режима.

Отрасль промышленности	Механизмы	Рациональный род тока	Примечание
Металло-обрабатывающая (холодная обработка)	Станки специальные с многодвигательным приводом, продольно-фрезерные, крупные, расточные, с большим числом скоростей, копировальные, крупно-токарные, лобовые токарные, колесотокарные и вальцетокарные, быстросходные строгательные, крупные, карусельные, с коэффициентом регулирования 1: 1,06 и 1: 1,12	В основном постоянный	Зависит от типа станка
	Станки массового производства, автоматы		
Металлургическая	Станки с фланцевыми двигателями	Переменный (обычно)	Система Леонарда — Ильгнера. Обычно система Леонарда или Шербиуса
	Станки со шпиндельными двигателями		
	Прессы и молоты	Постоянный	
	Реверсивные прокатные станы	Переменный	
Текстильная	Нерегулируемые нереверсивные станы	Постоянный при многодвигательном приводе. Переменный при однодвигательном приводе с диапазоном регулирования меньше 2: 1	Вопрос должен подвергнуться тщательному анализу
	Регулируемые нереверсивные станы		
	Высокопроизводительные станы холодной прокатки	Постоянный	
Бумажная	Нерегулируемые клетки нереверсивных станов	Переменный	
	Вспомогательные механизмы повторно-кратковременного режима		
Текстильная	Подготовительные фабрики	Переменный	
	Прядильные фабрики		
Текстильная	Ткацкие фабрики	Постоянный	
	Отделочные механизмы с многодвигательным регулируемым приводом		
Текстильная	Отделочные механизмы с однодвигательным регулируемым приводом	Постоянный и переменный	
	Подготовительные машины		

Отрасль промышленности	Механизмы	Рациональный род тока	Примечание
Бумажная	Дефибреры	Переменный	
	Постоянная часть бумагоделательной машины Переменная часть бумагоделательной машины Отделочные механизмы	Постоянный	
Полиграфическая	Многорольные ротационные машины Остальные механизмы	Постоянный и переменный Постоянный и переменный В основном переменный	
Кожевенно-обувная		Переменный	
Силикатная и керамическая			
Резиновая			На специальных регулируемых машинах необходим анализ
Химическая	Приводы		
Краны и лифты		Постоянный и переменный	

36. Ориентировочные указания по выбору рода тока для приводов в различных отраслях промышленности

В табл. 13 даются сводные указания по выбору рода тока для приводов разных отраслей промышленности. При этом нужно иметь в виду, что в целях получения эффективных и экономичных приводов в одном и том же цехе вообще могут быть приводы постоянного и переменного токов. Даже на одном крупном металлорежущем станке с многодвигательным приводом встречаются иногда одновременно регулируемые приводы постоянного и нерегулируемые — переменного тока.

Глава VII

Поддержание постоянства скорости и синхронизация электроприводов

37. Значение вопроса и поддержание постоянства скорости регулируемых приводов постоянного тока

Целый ряд производственных механизмов, преимущественно с многодвигательным приводом, требуют по условиям технологического процесса поддержания постоянства скорости отдельных звеньев рабочего агрегата или постоянного соотношения скорости между ними. Сюда относятся

бумагоделательные машины, регулируемые непрерывные прокатные станы, станы холодной прокатки, текстильные отделочные агрегаты, некоторые конвейеры резинового производства и т. д. Несоблюдение этих условий ведет к порче и разрыву продукта. Пояснение дает рис. 59, где показан проходящий непрерывно между валиками полупродукт (бумагоделательные машины, прокатные станы). Несоблюдение постоянства скорости отдельного звена ведет к образованию петель или порче продукта. Так как через такие рабочие машины проходит продукция различного сорта, то обычно они требуют широкой регулировки скорости и приводятся в движение двигателями постоянного тока. В отдельных случаях практики требуется взаимная синхронизация отдельных звеньев рабочих машин или нескольких рабочих машин. Так, например, в целях упрощения механической конструкции мощного козлового крана (рис. 60) в нем для перемещения применяются два двигателя на правой или левой стороне. Во избежание перекаса конструкции эти двигатели должны идти строго синхронно.

Простейший способ воздействия на скорость шунтового двигателя постоянного тока заключается в регулировании тока возбуждения, т. е. магнитного потока Φ по равенству:

$$n = \frac{u - IR}{c \cdot \Phi}$$

Всякое отклонение скорости двигателя от необходимой должно быть исправлено таким воздействием. Последнее достигается быстродействующими автоматическими регуляторами.

Наиболее часто ранее применялся регулятор типа Тирилла. Этот регулятор дает прерывистое регулирование. Идея его заключается в том, что если двигатель должен иметь постоянное число оборотов в минуту, например 500, то ток возбуждения двигателя замыканием контактов регулятора несколько раз в секунду непрерывно меняется между величинами, соответствующими примерно 450 и 550 оборотам двигателя в минуту. Таким образом двигатель непрерывно стремится, в зависимости от положения контактов, или к 450 или к 550 об/мин. Нормально добавочное сопротивление R_1 введено в цепь возбуждения (рис. 61, а), и двигатель стремится при меньшем значении потока к скорости в 550 об/мин. Но, как только он достигает 500 об/мин, сопротивление зашунтировывается специальной катушкой, и двигатель начнет стремиться к 450 об/мин, соответствующим большему магнитному потоку (рис. 61, б).

Схема привода постоянного тока с регулятором представлена на рис. 62. Якорь двигателя $ГД$ и его цепь возбуждения питаются от сети постоянного тока. Так как контакты быстродействующего регулятора могут надежно работать лишь при очень малой силе тока, то они замыкают сопротивление не непосредственно в цепи возбуждения двигателя, а в цепи возбуждения вольтодобавочной машины $ВМ$, введенной в цепь возбуждения двигателя. Сила тока возбуждения $ВМ$ во много раз меньше силы тока возбуждения $ГД$. $ВМ$ дает на обмотку возбуждения напряжение, согласное с напряжением сети. На вал двигателя насажена вспомогательная маленькая машинка переменного тока $ВГ$ синхронный генератор, получающий возбуждение от независимого источника. Напряжение этой машины $E = c \cdot n \cdot \Phi$. При $\Phi = \text{const}$, $E = c' \cdot n$. Как только число оборотов двигателя достигает предельного допустимого

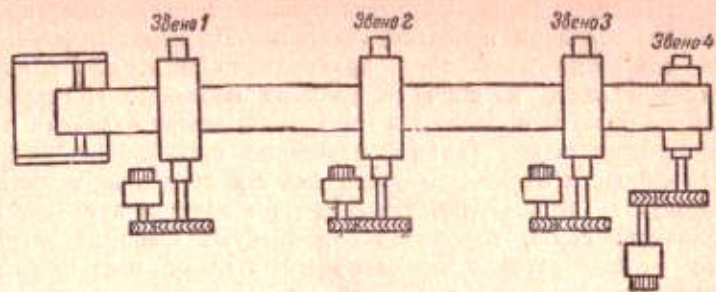
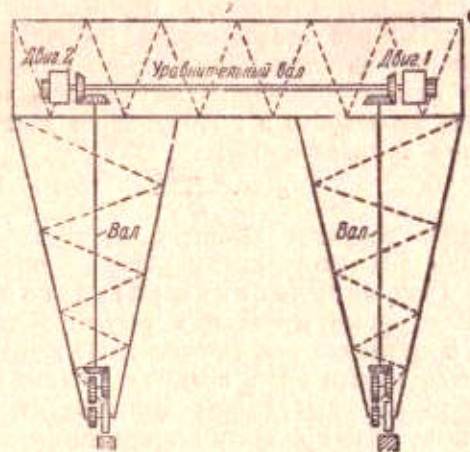
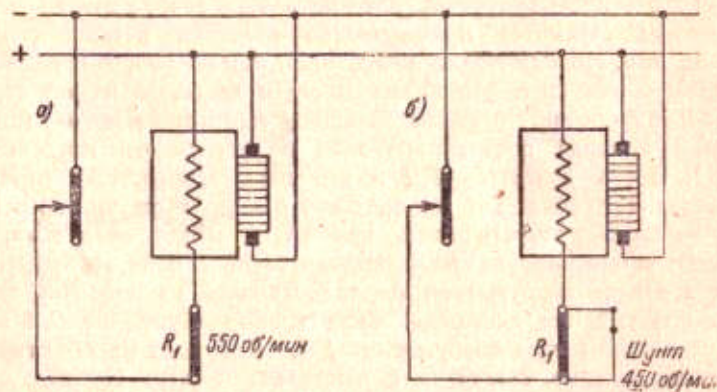


Рис. 59. Связь отдельных звеньев машины проходящим полупродуктом.



60. Упрощенная кинематическая схема привода козлового крана.



61. Схема цепи возбуждения для быстродействующего регулирования.

(для вышеуказанного примера 500 об/мин), ток катушки K_1 , питаемой вспомогательным генератором, замыкает контакты, шунтирующие сопротивление r в цепи возбуждения машины BM ; напряжение BM , а стало быть, и ток возбуждения двигателя начинают увеличиваться. Двигатель $ГД$ начинает снижать скорость. Как только напряжение BM несколько повысится, она своей катушкой K_2 разомкнет контакты регулятора, двигатель снова начнет повышать скорость, снова замкнутся контакты, и т. д. Большой диапазон предельных установочных скоростей двигателя ($\pm 10\%$, от 450 до 550 об/мин) взят для того, чтобы

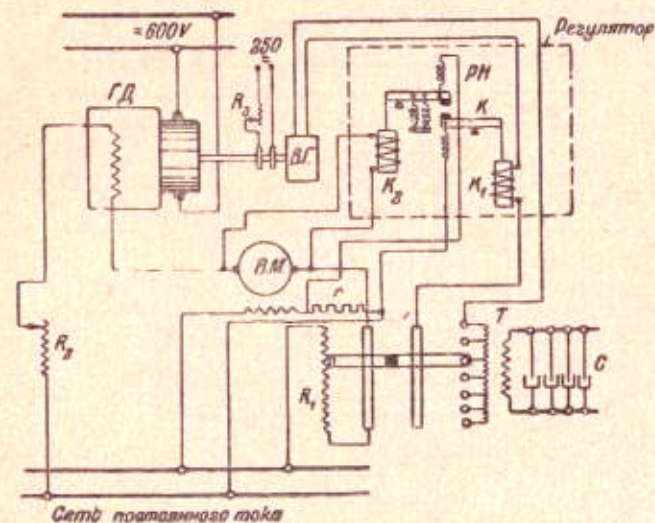


Рис. 62. Схема привода постоянного тока с быстродействующим регулятором.

процессы регулирования протекали быстрее. Точность поддержания постоянства скорости таким регулятором — порядка $0,1 \div 0,5\%$. Другой вариант быстродействующего регулятора будет описан далее, после рассмотрения процессов синхронизации хода.

38. Синхронизация хода электроприводов

Синхронизация хода электроприводов как постоянного, так и переменного тока в промышленной практике осуществляется с помощью вспомогательных асинхронных машин, насаживаемых на вал вместе с главными.

Схема такого привода для двух звеньев представлена на рис. 63. На нем D_1 и D_2 — главные асинхронные двигатели с кольцами, приводящие две синхронизируемые рабочие машины или два синхронизируемых звена одной рабочей машины с отдельными приводами. На валу каждого из двигателей насажено по вспомогательному асинхронному двигателю с кольцами BD_1 и BD_2 . Эти двигатели своими статорными обмотками включаются на ту же сеть. Роторные обмотки этих машин через кольца электрически связываются вместе. При такой электриче-

ской связи со стороны первичной и вторичной систем (статора и ротора) асинхронные машины ведут себя по отношению друг к другу как синхронные. Если главные машины, а стало быть, и вспомогательные идут синхронно, то электродвижущие силы роторов вспомогательных машин BD_1 и BD_2 имеют одинаковую частоту и направлены навстречу одна другой. Между BD_1 и BD_2 (в цепи роторов) не протекает никакого тока. Однако достаточно одной из главных машин под влиянием изменившейся нагрузки ускорить или замедлить свой ход, как э. д. с. ротора одной вспомогательной машины BD_1 сдвинется по фазе относительно э. д. с. ротора второй машины BD_2 . Между вспомогательными

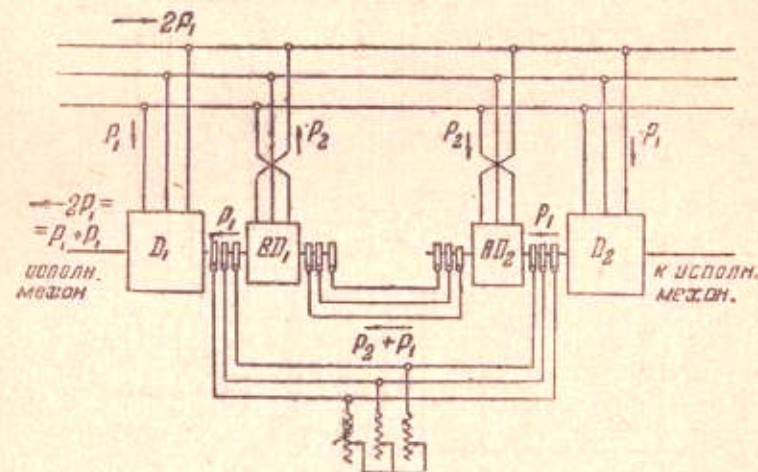


Рис. 63. Синхронизация асинхронных двигателей вспомогательными машинами.

машинами пройдет ток, одна из них с ускорившимся главным двигателем будет работать генератором, т. е. создаст на валу тормозной момент. Вторая вспомогательная машина будет работать двигателем, т. е. создаст на валу двигательный момент. В результате синхронность хода машин будет восстановлена. Нагрузка на обоих главных двигателях будет одинакова. Имеющий место обмен мощностями машин показан на рис. 63 стрелками.

Мощности вспомогательных машин зависят от возможной неравномерности нагрузок. Обычно их берут в 20—40% от мощности главных машин, иногда мощности вспомогательных машин доходят до 100% от главных. Совершенно естественно, что применение вспомогательных машин удорожает электрический привод, как таковой, но в целом синхронизированный привод оказывается выгоднее чисто механической связи с одним приводным двигателем, давая упрощение и облегчение кинематических связей.

Синхронизация может быть соблюдена на всем диапазоне скоростей от $n=0$ до $n=n_0$. Для возможности работы при скоростях двигателей $n > 0,8 n_0$ роторы вспомогательных машин должны вращаться против поля. Возможное механическое смещение одного звена относительно другого при синхронизации, в случае наибольшего рассо-

гласования¹ нагрузок, составляет в среднем $\left(\frac{45}{p}\right)$ градусов на оси главных двигателей, где p — число пар полюсов вспомогательных асинхронных машин.

В тех случаях, когда главные асинхронные двигатели должны работать лишь при скоростях меньше $0,8 n_0$, можно обойтись без вспомогательных машин, связывая машины по схеме рис. 64 с общим пуско-регулирующим реостатом. При этом синхронизация переносится на сами главные машины. Достаточно одной из машин ускориться или отстать, чтобы между роторами машин протек уравнивающий ток,

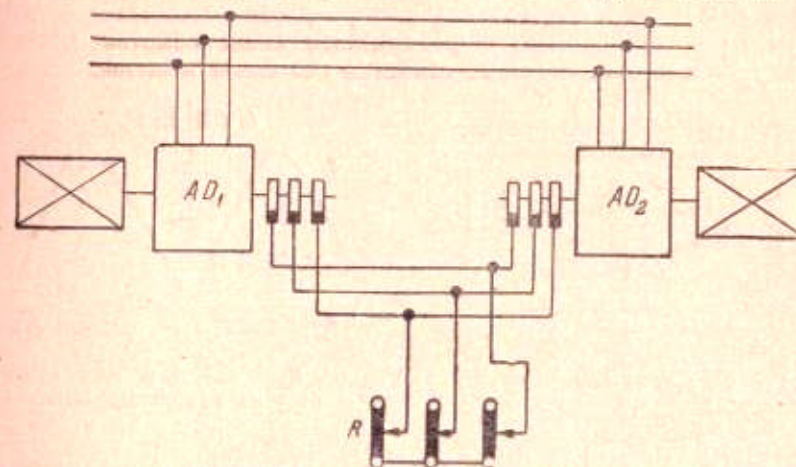


Рис. 64. Синхронизация асинхронных двигателей связью через реостат.

который выравнивал бы ход машины. При приближении к скорости, равной $0,8 n_0$, э. д. с. роторов машин становится малой, уравнивающие токи уменьшаются и синхронизация машин оказывается невозможной.

39. Самосины

Самосины¹ — это сокращенное наименование самосинхронизирующихся систем. В основном они используются для целей управления и контроля. Под самосинами понимаются маломощные асинхронные машины с однофазной первичной и трехфазной вторичной системой. Наиболее эффективной оказывается система с явно выраженными полюсами. Схема соответствующего включения представлена на рис. 65.

Статорные обмотки самосинов приключаются к двум проводам трехфазной сети. Трехфазные роторные обмотки связываются между собой. Один из самосинов является ведущим, второй ведомым. Ведомых может быть несколько. Система работает так, что при повороте на некоторый угол ведущего самосина на тот же угол поворачивается ведомый самосин. В покое самосинов э. д. с. роторов их равны,

¹ Американский термин — сельсины [self — само].

и между ними не протекает никакого тока. При повороте ведущего самосина его э. д. с. сдвигается по фазе относительно э. д. с. ведущего. Между роторами машины протекает уравнивающий ток. Этот ток создает в ведомом самосине вращающий момент, под влиянием которого он поворачивается на тот же угол, что и ведомый. Зависимость вращающего момента от угла рассогласования дана на рис. 66.

Самосины чрезвычайно удобны для дистанционного контроля за положением того или другого механизма или какого-либо его звена. В прокатном цехе, например, для этой цели применяется до нескольких десятков самосинов. Самосины являются чрезвычайно распространенным аппаратом в современном электроприводе. Особым конструированием магнитной системы и размещением обмоток на статоре можно получить бесконтактные самосины без колец и щеток.

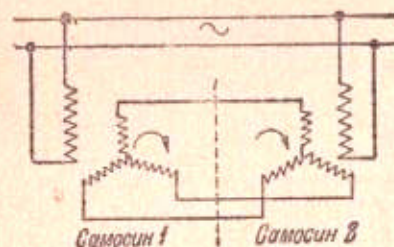


Рис. 65. Схема самосинов.

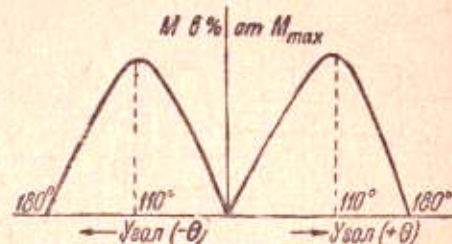


Рис. 66. Зависимость момента самосина от угла рассогласования.

40. Схема поддержания постоянства скорости двигателей с угольными регуляторами и самосинами

Схема поддержания постоянства скоростей двигателей с угольными регуляторами и самосинами относится к схемам непрерывного управления. Она приведена на рис. 67. Задача заключается в согласовании скоростей двух регулируемых двигателей D_1 и D_2 постоянного тока. Двигатель D_1 является ведущим и скорость двигателя D_2 подгоняется к его скорости.

Как на вал двигателя D_1 , так и на вал двигателя D_2 насажено по самосину, из которых C_1 — ведущий, а C_2 — ведомый. В случае нескольких двигателей постоянного тока на рабочей машине число самосинов равно числу двигателей. Самосин C_2 связан с D_2 через коническую передачу КП с ремнем. Назначение ее заключается в том, чтобы иметь возможность менять соотношение скоростей двигателей D_1 и D_2 . Вторичные обмотки самосинов C_1 и C_2 не связываются вместе, а включаются на дифференциальный самосин ДС с трехфазной первичной и вторичной цепями. Если самосины C_1 и C_2 , первичные однофазные обмотки которых включены к одной и той же сети, вращаются с одинаковой скоростью, вращающиеся поля статора и ротора ДС идут с одинаковой скоростью. Между статором и ротором ДС вращающего момента не получается. Но достаточно двигателю D_2 начать отставать или ускоряться по сравнению с двигателем D_1 , как между полем статора и ротора ДС возникает вращающий момент.

Ротор самосина ДС поворачивается. Он воздействует на сопротивление R угольного регулятора — реостата, введенного в цепь возбуждения двигателя D_2 . Угольный регулятор состоит из сжимаемых и разжимаемых угольных дисков. ДС сжимает или разжимает угольные диски, тем самым меняет сопротивление в цепи возбуждения двигателя D_2 , и скорость его возвращается к необходимой величине. Действие

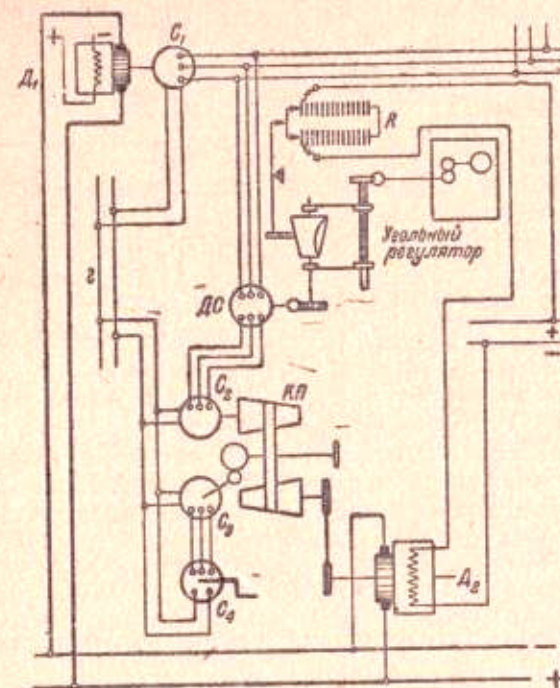


Рис. 67. Схема поддержания постоянства скорости с угольным регулятором и самосинами.

угольных пластин в регуляторе аналогично действию сжатия угольного порошка в микрофоне при телефонном разговоре. Самосины C_3 и C_4 служат для ручной установки положения ремня.

41. Современные возможности непрерывного регулирования

В практике последнего времени, для целей поддержания постоянства скорости, начали применяться электрические машины — амплидины, рототролы, регулексы (п. 21—23). Схема с амплидином представлена на рис. 68. В нем скорость двигателя поддерживается амплидином, являющимся возбудителем двигателя. С этой целью амплидин, кроме основной обмотки управления 1 и противоколебательной 2, имеет регулировочную обмотку возбуждения 3. Эта обмотка питается от вспомогательной маленькой машинки M , насаженной на вал регулируемого двигателя. Ее э. д. с. пропорциональна скорости двигателя. Достаточно скорости двигателя отклониться от установленной, как

машинка дает импульс в цепь возбуждения амплидина. Напряжение амплидина, а следовательно, и обуславливаемый им ток возбуждения двигателя меняется, и скорость двигателя D получает необходимое значение.

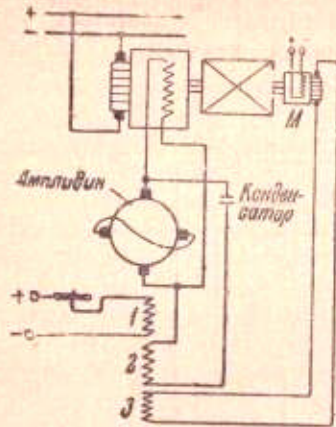


Рис. 68. Схема с амплидином для поддержания постоянства скорости двигателя.

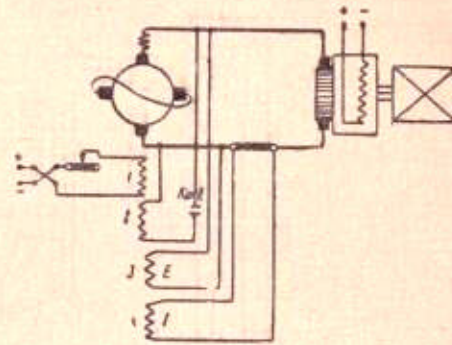


Рис. 69. Поддержание амплидином постоянства мощности двигателя.

Таким путем можно поддерживать постоянной как силу тока двигателя, так и мощность двигателя (рис. 69). Аналогичные процессы могут быть осуществлены как с помощью ротороля, так и регулекса.

Глава VIII

Основы динамики электропривода

42. Деление режимов работы электроприводов по длительности непрерывной нагрузки

Все огромное разнообразие режимов работы исполнительных механизмов может быть по существу разделено на три основных режима. В простейшем виде они представляются графиками рис. 70. На этом рисунке по оси абсцисс нанесено время, а по оси ординат — момент или мощность двигателя.

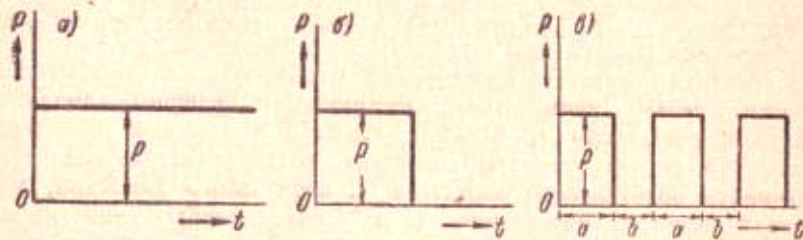


Рис. 70. Основные режимы работы электропривода.

График 70, а характеризует продолжительный режим работы. При нем рабочий период настолько велик, что нагрев

машины, получающийся в результате потерь в ней (в железе и в меди), т. е. потеря от преобразования энергии электрической в механическую, достигает установившегося состояния. Примерами могут быть электроприводы насосов в водопроводных станциях, непрерывно действующего конвейера, нерегулируемого вентилятора, дефибрера в бумажной промышленности, текстильных отделочных агрегатов. В реальных условиях нагрузки привода, а значит, и температуры частей двигателя могут несколько колебаться.

Вторым режимом работы является ограниченный по времени (практически не более $1/2$ — 1 часа) кратковременный режим (рис. 70, б). Кратковременной работой машины называется такая работа, в течение которой нагрев машины не достигает установившегося состояния, а перерыв в работе достаточно велик для того, чтобы по возобновлении работы температура машины не отличалась от температуры окружающей среды. Типичным примером такой работы могут быть установочные приводы на станках, монтажные краны, двигатели разводных пролетов мостов, подъем шитов шлюза и т. п. Стандартными временами кратковременной работы могут быть 15, 30 и 60 мин.

Весьма распространенным является повторно-кратковременный режим (рис. 70, в). Повторно-кратковременной работой называется такая работа, при которой рабочие периоды регулярно чередуются с периодами остановки или работы без нагрузки — «промежутками». Примером являются двигатели кранов, лифтов, прессов, молотов, металлорежущих станков — автоматов и т. д. Общая продолжительность одного рабочего периода с одним промежутком не должна превосходить 10 мин. В противном случае режим необходимо рассматривать как продолжительный при переменной нагрузке.

Подход к выбору мощности двигателя для каждого из трех режимов различен. Для каждого режима существуют специальные конструкции двигателей, имеются и отдельные каталоги на соответствующие типы двигателей. На щитках двигателей, предназначенных для продолжительного режима работы, указывается мощность двигателя без особой оговорки. У двигателей кратковременного режима работы указывается время, в течение которого он может работать, например: 20 квт, 30 мин. Для двигателей повторно-кратковременного режима работы, кроме мощности, указывается так называемая продолжительность включения (сокращенно ПВ) двигателя к сети. Согласно ГОСТ 183-41, под относительной продолжительностью рабочего периода понимается отношение времени рабочего периода к продолжительности рабочего цикла. Согласно рис. 70, в, она равна:

$$\zeta\% = \frac{a}{a+b} \cdot 100\%$$

На щитке может стоять, например, 20 квт, $\zeta = 25\%$. Стандартными продолжительностями включения являются 15, 25 и 40%. Рис. 70 не учитывает особенностей изменения мощности при пуске и торможении, а характеризует идеализированные режимы работы.

43. Подразделение режимов работы приводов по характеру процессов

Как бы ни был сложен режим работы исполнительного механизма, он всегда будет состоять из следующих режимов работы: 1) пуск в ход; 2) установившаяся работа при неизменной нагрузке (в частных случаях может отсутствовать); 3) прием и сброс нагрузки; 4) регулирование скорости; 5) остановка с электрическим торможением двигателя или без него; 6) реверсирование, по существу распадается на остановку и пуск в обратном направлении. Для примера на рис. 71 показаны графики изменения скорости и тока (так называемые нагрузочные диаграммы), электропривода строгательного станка, в которых охвачены все указанные режимы. В ряде случаев отдельные режимы могут отсутствовать

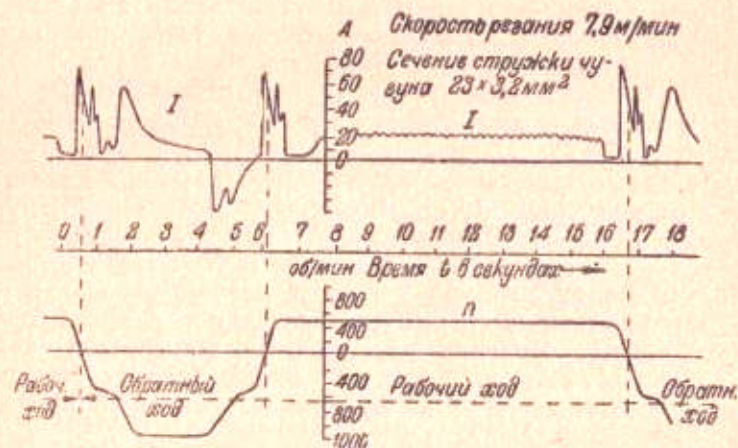


Рис. 71. Нагрузочная диаграмма привода строгательного станка.

вать; в свою очередь, иногда весь цикл работы, например в копировальном металлорежущем станке, может состоять только из переходных режимов. Наибольшую сложность для анализа работы привода представляют именно неустановившиеся (переходные) режимы, — переход от одного установившегося состояния к другому — пуск в ход, остановка, переход от одной нагрузки к другой и т. д.

44. Подразделение рабочих машин по характеру статической нагрузки и по классам

Рабочие машины разных отраслей промышленности весьма многочисленны и разнообразны. Однако все они могут быть разделены на ограниченное число классов. Род нагрузки рабочей машины прежде всего характеризуется законом изменения статического момента сопротивления. Под статическим моментом сопротивления мы понимаем момент сопротивления рабочей машины без учета ее ускорений и замедлений.

В зависимости от рода машины, ее кинематики, производственного процесса по характеру статического момента все рабочие машины могут

быть разделены на 5 классов: 1) машины с постоянным статическим моментом $M_m = \text{const}$, не зависящим (для данного процесса) ни от каких факторов; 2) машины, в которых статический момент зависит от скорости $M_m = f(v)$, например вентилятор, в нем статический момент пропорционален квадрату скорости $M_m = M_0 + c \cdot v^2$; 3) машины со статическим моментом, зависящим от пути $M_m = \varphi(L)$, в первую очередь машины с кривошипно-шатунными механизмами, например ножницы, прессы; 4) машины, в которых статический момент зависит от пути и скорости $M_m = \varphi(v, L)$, например заводские электровозы. Сопротивление в этом случае определяется скоростью, уклоном пути и кривыми (трассой пути); 5) машины, в которых статический момент является функцией времени, например электропривод, компенсирующий тем или иным способом на корабле влияние качки.

Пояснение различных зависимостей дает рис. 72.

Подразделение некоторых механизмов по классам дает табл. 14.

При наличии разного характера статического момента к приводу могут предъявляться разные требования в отношении проведения переходных и рабочих режимов, изменения во времени скорости, момента, тока двигателя, его мощности, определенной закономерности пути и т. д. Все эти вопросы изучаются динамикой привода.

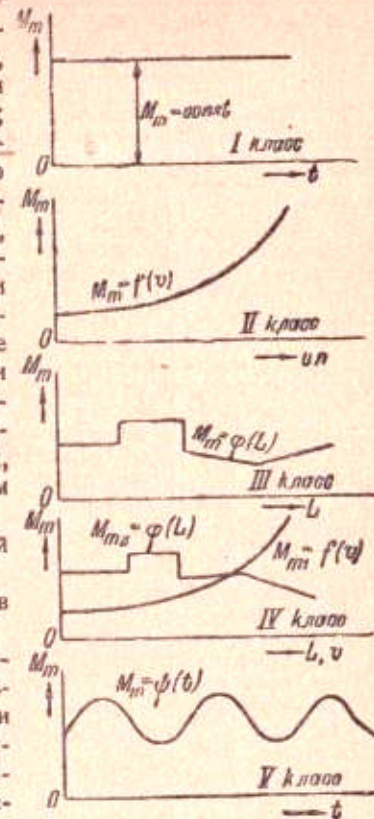


Рис. 72. Зависимости статического момента для разных классов рабочих машин.

Таблица 14

Классификация некоторых исполнительных механизмов по характеру статического момента

$M_m = \text{const}$	$M_m = f(v)$	$M_m = \varphi(L)$	$M_m = \varphi(v, L)$	$M_m = \varphi(t)$
Мостовой кран: а) подъем; б) тележка; в) мост. Лифт Тельфер Транспортные ленты	Вентилятор Дымосос Центробежный насос Центробежный компрессор Центрофуги Гребной винт	Механизмы с кривошипной передачей Подъемный качающийся стол Кантователь Опрокидыватель	Электро-воз Разводной пролет моста с крыльями Гребной винт	Дефибрер Шлифовальный станок Шаровая мельница Сахарная мельница

$M_m = const$	$M_m = f(v)$	$M_m = \varphi(L)$	$M_m = \varphi(v, L)$	$M_m = \varphi(t)$
Прокатные станы горячей и холодной прокатки. а) реверсивные б) реверсивные Рольганг Нажимное устройство валиков прокатных станков Шахтный подъемник с уравновешенным хвостовым канатом Строгательный станок Ряд металлорежущих станков с вращательным движением Бумагоделательная машина Каландры разных отраслей промышленности Ситцепечатная машина Дубильный, жировальный барабаны (кожевенная промышлен.) Ротационная машина	Козловой край Листовальный и обкладочный каландры (резиновая промышлен.) Рогулечный и кольцевой вальтеры (текстильная промышлен.) Карусельный станок Механизмы горизонтального наведения артиллерийских орудий	Ножницы горячей резки Выталкиватель Вагоноопрокидыватель Поршневой насос Поршневой компрессор Шахтный подъемник с уравновешенным канатом Шахтный подъемник с переменным радиусом навивки Качающийся конвейер Глубокий насос эрлифт и газлифт нефтяная промышленность) Балансирующий станок (нефтяная промышленность) Экскаватор Грейферные краны Деррик-кран Пневматические молоты Гибочные машины Различные кривошипные прессы Различные ножницы Ковочные машины Доменный подъемник Миксер Металлургические краны Качающаяся мартеновская печь Плоскопечатная машина Ткацкий станок Сельфактор Телескоп	Рулевое устройство Ледокол Регулятор скольжения Следящие приводы	Мездрильная машина (кожевенная промышлен.) Пила для резки дерева Фрикционный молот Механизмы резиновой промышленности Бенбери Каландры Различные вальцы Дорновый станок Механизмы вращательного бурения Кардная машина Камнедробилка

$M_m = const$	$M_m = f(v)$	$M_m = \varphi(L)$	$M_m = \varphi(v, L)$	$M_m = \varphi(t)$
		Сбрасыватели бомб Зарядные устройства в самолетах Копировальные станки Бумагорезательные станки Агрегатные станки Автоматы Следящие приводы Стриппер-кран Кран Тиглер		Привод в регуляторах Бумажные роулы Следящие приводы

45. Значение динамики электропривода

Электропривод предназначен для осуществления рабочими машинами производственных процессов. Эти процессы протекают как в установившихся, так и в неустановившихся режимах. Электропривод так должен обеспечить протекание всех этих процессов, чтобы получить наибольшую производительность при наилучшем качестве продукта. Анализом переходных процессов и занимается динамика электропривода. Она рассматривает, как протекают эти процессы при различных сочетаниях рабочих машин, приводящих их двигателей и управляющей ими аппаратуры управления, в современной практике преимущественно автоматической.

Протекание переходных процессов характеризуется так называемыми нагрузочными диаграммами электропривода. Эти диаграммы представляют зависимости $I, M, P, n, L = f(t)$. Анализ соответствующих процессов дает возможность правильно выбрать тип двигателя, его мощность, а также аппаратуру управления. Чрезмерная мощность двигателя без нужды удорожает оборудование, повышает расход энергии, а в некоторых случаях даже снижает производительность. В асинхронных двигателях отклонение мощности от номинальной ведет к плохому коэффициенту мощности. Недостаточная мощность двигателя не обеспечивает надежной и производительной работы механизма.

Характер математического анализа переходных режимов зависит от комплексных свойств рабочей машины, двигателя и аппаратуры. Для каждого упомянутого выше класса рабочей машины применяется своя методика анализа переходных режимов. Основные положения динамики привода излагаются ниже.

46. Уравнение движения электропривода

Движение электропривода с исполнительным механизмом подчиняется уравнению движения Даламбера. В том случае, когда приве-

денный момент инерции всего агрегата J остается постоянным, это уравнение будет:

$$M_d - M_m = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (41)$$

где M_d — момент двигателя, M_m — приведенный к валу двигателя статический момент рабочей машины, ω — угловая скорость двигателя и t — время. Если же приведенный момент инерции агрегата $J(\alpha)$ меняется в зависимости от угла поворота α , как, например, в кривошипно-шатунных механизмах, то уравнение получает вид:

$$M_d - M_m = J(\alpha) \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{dJ(\alpha)}{d\alpha} \cdot \frac{\omega^2}{2}. \quad (42)$$

В (41) величина $J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_j$ носит название динамического момента. Статический момент агрегата обуславливается рабочей машиной, момент двигателя определяется его механическими характеристиками и аппаратурой управления. Получаемый в агрегате динамический момент является итогом взаимодействия этих двух моментов. Как статический момент, так и момент двигателя, в самом общем случае, могут быть как тормозящими, так и двигательными, почему в общем виде уравнение движения рабочего агрегата с электрическим приводом может быть написано в форме:

$$\pm |M_d| \pm |M_m| = J \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (43)$$

Под статическим моментом исполнительного механизма (M_s) разумеется вращающий момент на валу этого механизма, определяемый статическими силами. Если этот момент пересчитан на угловую скорость двигателя, то он называется приведенным статическим моментом (M_m).

Все статические моменты делятся на две категории: 1) реактивных моментов и 2) потенциальных моментов. В первую категорию входят моменты: от трения, резания (металла, бумаги, дерева и т. д.), сжатия (воздуха, газа), от растяжения и скручивания (пряжа) неупругих тел. Эти моменты всегда противодействуют вращению агрегата. Ко второй категории относятся моменты от веса, а также от сжатия, растяжения и скручивания упругих тел. В зависимости от направления вращения агрегата потенциальные моменты, связанные с изменением потенциальной энергии отдельных элементов системы, могут противодействовать вращению двигателя (подъем груза) или способствовать ему (спуск груза).

Вводимый в формулу (41) вращающий момент двигателя M_d может быть определен по полезной мощности двигателя и числу его оборотов в минуту n .

$$M = \frac{P}{\omega} \cdot \frac{75}{736} = 0,975 \cdot \frac{P}{n},$$

если P выражено в ваттах, и

$$M = 975 \cdot \frac{P}{n},$$

если P выражено в киловаттах. 75 является переводным множителем из лошадиных сил в килограмметры, 736 — переводным множителем из ватт в лошадиные силы.

47. Приведение статических моментов к валу двигателя

Приведение статических моментов от одной оси к другой делается на основании приравнивания мощностей на обеих осях с учетом потерь в промежуточных передачах. Если статический момент на валу рабочей машины M_s (рис. 73), угловая скорость рабочей машины ω_m при скорости двигателя ω_d , передаточное число между валом двигателя и рабочей машины — k , к. п. д. промежуточных передач — η_p , а приведенный к валу двигателя статический момент — M_m , то при передаче энергии от двигателя к рабочей машине

$$M_s \cdot \omega_m = M_m \cdot \omega_d \cdot \eta_p. \quad (44)$$

Так как $k = \frac{\omega_d}{\omega_m}$, то

$$M_m = M_s \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\eta_p}. \quad (45)$$

При наличии нескольких передач между двигателем и механизмом с передаточными числами k'_1, k'_2, \dots, k'_n и соответственно с их к. п. д. $\eta_{p1}, \eta_{p2}, \dots, \eta_{pn}$ приведенный к валу двигателя статический момент

$$M_m = M_s \cdot \frac{1}{k'_1 \cdot k'_2 \cdot k'_3 \dots k'_n} \cdot \frac{1}{\eta_{p1} \cdot \eta_{p2} \cdot \eta_{p3} \dots \eta_{pn}}. \quad (45')$$

При этом каждое значение η_{px} должно соответствовать передаваемому через данную передачу вращающему моменту. В тех случаях потенциального момента (например при спуске груза), когда энергия подается от механизма к двигателю (положим, имеет место рекуперация энергии), мы должны написать:

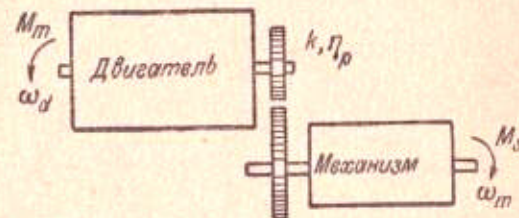


Рис. 73. Приведение статических моментов к оси двигателя.

$$M_m \cdot \omega_d = M_s \cdot \omega_m \cdot \eta_p,$$

откуда:


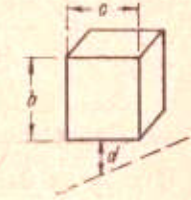
$$M_m = M_s \cdot \frac{1}{k} \cdot \eta_p.$$

Таким образом, при равенстве к. п. д. для подъема и спуска приведенный статический момент при спуске груза M_m и при подъеме M_m связаны соотношением

$$M_m \downarrow = M_m \uparrow \cdot \eta_p^2.$$

48. Приведение маховых масс вращательного движения к одной оси

Приведение маховых масс производится из тех соображений, что живая сила системы, отнесенная к одной оси, остается неизменной. Если во вращающемся электрифицированном агрегате, включая двигатель, имеется $(n+1)$ звеньев с моментами инерции двигателя J_d и моментами инерции звеньев $J_1, J_2, J_3, \dots, J_n$ (рис. 74), вращающихся при угловой

Наименование тела	Формула	Изображение
1. Сплошной цилиндр вокруг собственной оси	$\rho^2 = \frac{r^2}{2}$	
2. Полый цилиндр вокруг собственной оси	$\rho^2 = \frac{r_1^2 + r_2^2}{2}$	
3. Прямоугольная призма вокруг оси, проходящей через центр	$\rho^2 = \frac{b^2 + c^2}{12}$	
4. Прямоугольная призма вокруг оси, проходящей через одну плоскость	$\rho^2 = \frac{4b^2 + c^2}{12}$	
5. Прямоугольная призма вокруг внешней оси	$\rho^2 = \frac{4b^2 + c^2 + 12bd + 12d^2}{12}$	
6. Цилиндр вокруг оси, проходящей через центр	$\rho^2 = \frac{r^2 + 3r^2}{12}$	
7. Цилиндр вокруг оси, проходящей через основание	$\rho^2 = \frac{4r^2 + 3r^2}{12}$	

скорости двигателя ω_d соответственно со скоростями $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, то суммарная живая сила системы будет равна:

$$\frac{J \cdot \omega_d^2}{2} = \frac{J_d \cdot \omega_d^2}{2} + \frac{J_1 \cdot \omega_1^2}{2} + \frac{J_2 \cdot \omega_2^2}{2} + \dots + \frac{J_n \cdot \omega_n^2}{2}. \quad (46)$$

Момент инерции системы J , отнесенный к валу двигателя, будет:

$$\begin{aligned} J &= J_d + J_1 \cdot \frac{\omega_1^2}{\omega_d^2} + J_2 \cdot \frac{\omega_2^2}{\omega_d^2} + \dots + J_n \cdot \frac{\omega_n^2}{\omega_d^2} = \\ &= J_d + J_1 \cdot \frac{n_1^2}{n_d^2} + J_2 \cdot \frac{n_2^2}{n_d^2} + \dots + J_n \cdot \frac{n_n^2}{n_d^2} = \\ &= J_d + J_1 \cdot \frac{1}{k_1^2} + J_2 \cdot \frac{1}{k_2^2} + \dots + J_n \cdot \frac{1}{k_n^2}, \end{aligned} \quad (47)$$

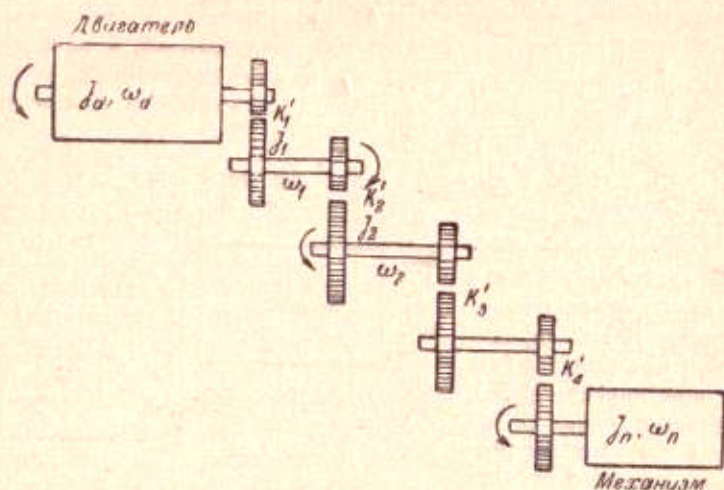


Рис. 74. Приведение маховых масс к одной оси.

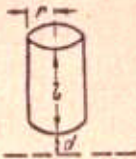

где k_1, k_2, \dots, k_n — соответственно передаточные числа между осью двигателя и осями отдельных вращающихся звеньев. Отметим, что момент инерции имеет размерность $\text{кгм} \cdot \text{сек}^2$. Для каждого отдельного вращающегося звена он равен его массе m_x на квадрат радиуса инерции звена ρ_x :

$$J_x = m_x \cdot \rho_x^2.$$

Моменты инерции сложных геометрических тел могут быть вычислены разложением их на элементарные части. Значения радиусов инерции для типичных элементов приведены в табл. 15.

В практике электропривода обычно оперируют не с моментами инерции J в $\text{кгм} \cdot \text{сек}^2$, а с маховыми моментами GD^2 в кгм^2 , где G — истинный вес тела, а D — его диаметр инерции,

$$J = m \cdot \rho^2 = \frac{G}{g} \cdot \frac{D^2}{4}.$$

Наименование тела	Формула	Изображение
8. Цилиндр вокруг внешней оси	$\rho^2 = \frac{4r^2 + 3r^2 + 12dl + 12d^2}{12}$	
9. Всякое тело вокруг оси, проходящей через центр тяжести	$\rho^2 = R_0^2 + d^2$ (R_0 — радиус инерции вокруг оси, через центр тяжести, ρ — радиус инерции вокруг другой параллельной оси, d — расстояние между центром тяжести и осью вращения)	

Приведение маховых моментов может производиться по формуле (48), аналогичной таковой для приведения моментов инерции (47).

$$GD^2 = (GD^2)_d + (GD^2)_1 \cdot \frac{1}{k_1^2} + (GD^2)_2 \cdot \frac{1}{k_2^2} + \dots + (GD^2)_n \cdot \frac{1}{k_n^2} \quad (48)$$

При введении в уравнение движения привода GD^2 вместо J оно получает вид при $GD^2 = \text{const}$.

$$\pm M_d \pm M_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (49)$$

При GD^2 , зависящем от угла поворота α , из (42)

$$\pm M_d \pm M_m = \frac{GD^2(\alpha)}{375} \cdot \frac{dn}{dt} + \frac{n^2}{7200} \cdot \frac{d[GD^2(\alpha)]}{d\alpha} \quad (50)$$

49. Приведение поступательного движения к вращательному

В рабочих машинах мы часто сталкиваемся с поступательным движением, и возникает вопрос о приведении поступательного движения к вращательному. Приведение статических усилий делается из условия равенства мощностей поступательного и вращательного движения, а приведение маховых масс из равенства живых сил.

Если усилие при поступательном движении F_m , скорость поступательного движения (при угловой скорости двигателя ω_d) v_m и к. п. д. промежуточных передач η_p , то при передаче энергии от двигателя к механизму (рис. 75):

$$M_m \cdot \frac{2\pi n_d}{60} \cdot \eta_p = F_m \cdot v_m \quad (51)$$

откуда

$$M_m = \frac{F_m \cdot v_m \cdot 60}{2\pi n_d \cdot \eta_p} \quad (51')$$

В случае приведения вращательного движения к поступательному при тех же условиях усилие поступательного движения

$$F_m = M_m \cdot \frac{2\pi n_d \cdot \eta_p}{60 \cdot v_m} \quad (51'')$$

Для приведения маховых масс нужно просуммировать живую силу поступательного и вращательного движений. При приведении к вращательному движению двигателя можно написать

$$\frac{J_{\text{прив}} \cdot \omega_d^2}{2} = \frac{J \omega_d^2}{2} + \frac{mv^2}{2}$$

(где J — приведенный к оси двигателя момент инерции всех вращающихся частей, а m — масса всех частей, движущихся поступательно со скоростью v при скорости двигателя ω_d), откуда приведенный к оси двигателя момент инерции всей системы

$$J_{\text{прив}} = J + m \cdot \frac{v^2}{\omega_d^2}$$

Из второго члена правой части этого равенства можно получить выражение для махового момента, эквивалентного массам, движущимся поступательно:

$$GD^2 = \frac{364 \cdot G_1 v^2}{n^2}$$

где G_1 — вес поступательно перемещающихся масс.

Соответственно при приведении к поступательному движению

$$\frac{m_{\text{прив}} \cdot v^2}{2} = \frac{J \omega_d^2}{2} + \frac{mv^2}{2}$$

Приведенная к поступательному движению масса всей системы

$$m_{\text{прив}} = \frac{J \omega_d^2}{v^2} + m$$

Переход от J к GD^2 может быть сделан по формуле

$$GD^2 = 4gJ$$

50. Особенности приведения статических усилий и маховых масс при наличии кривошипной передачи

Подобная передача имеет, например, место в механизме ножниц, служащих для резки металла. Кинематическая упрощенная схема ножниц дана на рис. 76. Благодаря непрерывному изменению соотношения скоростей между двигателем и механизмом здесь непрерывно меняется как приведенный статический момент, так и приведенный маховый момент по графику рис. 77а. Разложение сил и рассмотрение скоростей отдель-

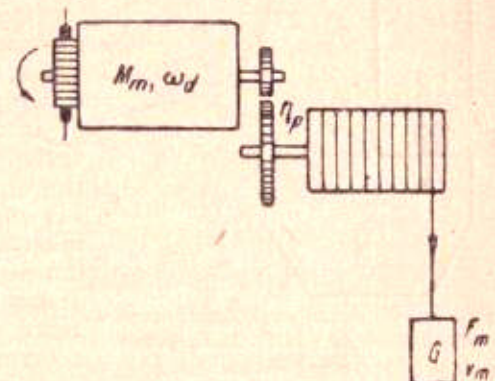


Рис. 75. Приведение поступательного движения к вращательному.

ных звеньев [Л,1] дает возможность получить следующие зависимости для приведенного к валу двигателя статического момента M_m и приведенного к валу двигателя махового момента системы GD^2 :

$$M_m = F \cdot r \cdot \frac{1}{k \cdot \eta_p} = \frac{Q \cdot \sin(\varphi_1 - \beta) \cdot \sin(\alpha - \beta) \cdot r}{k \cdot \eta_p}, \quad (52)$$

$$GD^2 = (GD^2)_d + \frac{m_A \cdot g \cdot 4r^2 \cdot \sin^2(\varphi_1 - \beta) \cdot \sin^2(\alpha - \beta)}{k^2}. \quad (53)$$

Обозначения соответствуют рис. 776. r — означает радиус кривошипа, k — передаточное число между двигателем и кривошипом, η_p — к. п. д. передач от двигателя к механизму и m_A — масса частей системы, движущихся поступательно. В подобных случаях для решения уравнения движения привода приходится пользоваться равенством (50). С переменным соотношением скоростей между двигателем и механизмом приходится также иметь дело в приводах с гидравлическими муфтами в период разгона и торможения. Изменение момента инерции может иметь место в кинематических схемах, обуславливающих перемещение центра тяжести какого-либо тела относительно центра вращения, т. е. с изменением его радиуса инерции (например,

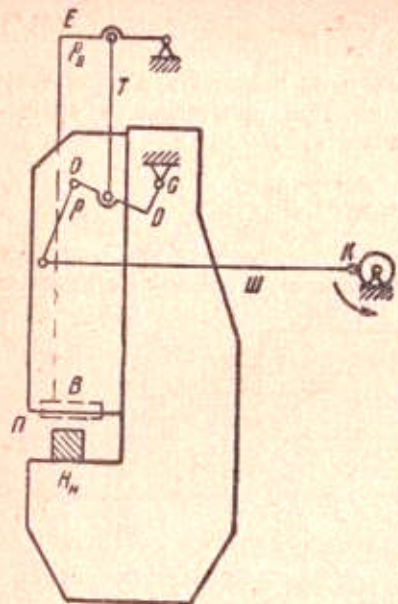


Рис. 76. Упрощенная кинематическая схема ножниц для резки железа.

артиллерийские приводы). В отдельных случаях практики, не требующих большой точности или являющихся весьма сложными для вычисления, от точного учета закона изменения махового момента зависимости от

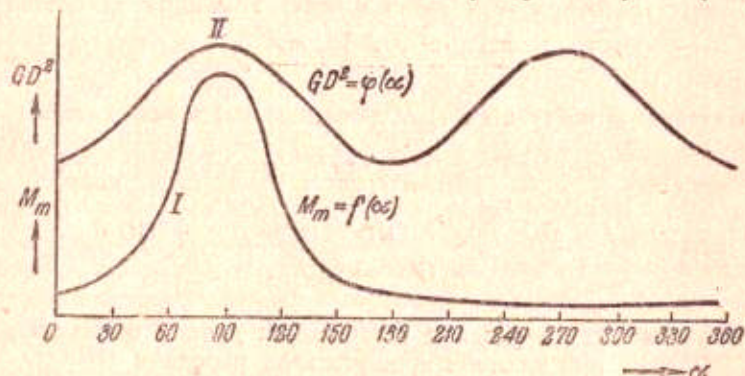


Рис. 77а. Изменение приведенных статического и махового моментов в зависимости от угла поворота кривошипа.

угла поворота иногда отказываются и принимают при расчете его среднее значение. Так поступают, например, в приводе строгательного станка, при приводе поршневого компрессора от синхронного двигателя и т. п.

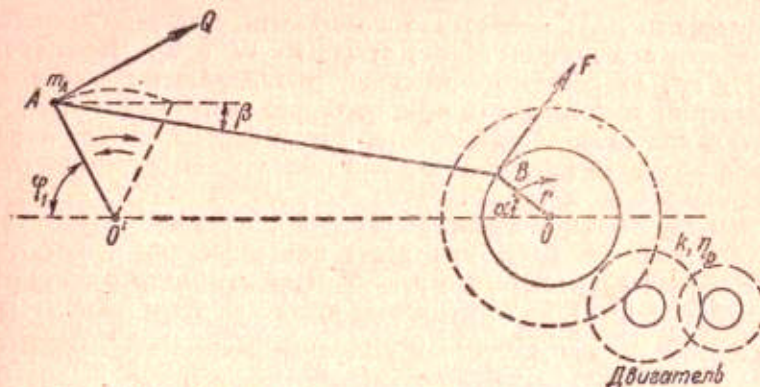


Рис. 77б. К кинематической схеме ножниц.

51. Вопросы учета полных потерь в передачах

Коэффициент полезного действия передач не остается постоянным. Он зависит от величины передаваемого через передачу суммарного статического и динамического моментов. При наличии нескольких передач через каждую вообще передается иной вращающий момент. Делаются попытки более точного учета потерь в передачах в переходных режимах привода, однако этот вопрос весьма сложен вследствие происходящих изменений динамического момента и неизученности законов изменения потерь в передачах [Л,1]. Поэтому практика ограничивается обычно указанным выше простым учетом потерь в передачах, учитывая их лишь при приведении статических моментов и усилий.

52. Решение уравнений движения привода для пуска и торможения

Поведение электрифицированного агрегата в переходных режимах зависит от характера статического момента механизма, от механической характеристики двигателя, от маховых масс системы, от типа управления приводом. Вместе с тем характер протекания переходных процессов определяет производительность механизмов и качество выпускаемой продукции или производимых операций. Рассмотрим сначала простейший случай пуска вхолостую двигателя постоянного тока или асинхронного с кольцами под реостатом.

Из уравнения движения привода вида

$$M_d - M_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt},$$

в данном случае при $M_m = 0$ и $GD^2 = (GD^2)_d$, имеем:

$$M_d = \frac{(GD^2)_d}{375} \cdot \frac{dn}{dt}.$$

Интегрируя, получаем время пуска вхолостую:

$$t_{p0} = \int_0^{n'_0} \frac{(GD^2)_d}{375} \cdot \frac{dn}{M_d}. \quad (54)$$

В равенство (54) необходимо подставлять уравнение механической характеристики двигателя $M_d = f(n)$ (главы IV и V). Число оборотов в минуту n'_0 , до которого происходит разгон, является числом оборотов холостого хода двигателя $n'_0 < n_0$. Строго теоретически время пуска агрегата в хол равно бесконечности, как и вообще во всех инерционных процессах. Практически верхний предел интегрирования следует брать равным $0,95 n'_0$.

В том случае, когда для подсчета времени пуска достаточна точность, примерно, порядка 10% , при пуске под реостатом можно принять момент двигателя постоянным и равным $M_d = \alpha \cdot M_N$, где α лежит обычно в пределах $1,4 \div 1,5$. Тогда время пуска двигателя вхолостую при $M_d = \text{const}$, т. е. при постоянном ускорении двигателя $\frac{dn}{dt} = \text{const}$, будет:

$$t_{p0} = \frac{(GD^2)_d}{375} \cdot \frac{n'_0}{M_N \cdot \alpha}. \quad (55)$$

Легко может быть определено при поставленном выше условии, т. е. при $M_d = \text{const}$, время пуска агрегата в случае постоянного статического момента нагрузки, т. е. $M_m = \text{const}$. В этом случае

$$t_p = \frac{GD^2 \cdot n_s}{375 \cdot [M_N \cdot \alpha - M_m]}, \quad (56)$$

где GD^2 — маховой момент агрегата, приведенный к валу двигателя, а n_s — число оборотов двигателя в минуту по естественной характеристике при $M_d = M_m$.

В тех случаях, когда необходимо точно учесть время пуска или когда момент двигателя не может быть принят постоянным, например при короткозамкнутом асинхронном двигателе, время пуска будет равно

$$t_p = \int_0^{n_s} \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{M_d - M_m} = \int_0^{n_s} \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{f(n) - M_m}. \quad (57)$$

Как указано выше, M_m может зависеть от различных факторов (п. 44).

Соответственно, время торможения t_t при тормозном моменте двигателя M_t и реактивном статическом моменте механизма M_m :

$$t_t = \int_{n_s}^0 \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{M_d + M_m} = \int_{n_s}^0 \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{f(n) + M_m}. \quad (58)$$

В ряде случаев, когда M_m является функцией скорости, т. е. функцией числа оборотов двигателя в минуту [$M_m = \varphi(n)$], представляется возможным решать задачу упрощенно следующим образом.

Вычитаем из $M_d = f(n)$ кривую $M_m = \psi(n)$ (рис. 78, а). Получаем кривую динамического момента $M_j = M_d - M_m$. Эта кривая разбивается

на участки, на которых можно принять прямолинейное изменение M_j . Оно может быть выражено равенством (рис. 78, б):

$$M_j = M_{j1} + \frac{M_{j2} - M_{j1}}{n_2 - n_1} (n - n_1). \quad (59)$$

Подставляя это равенство в уравнение движения привода вида $M_j = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$ и интегрируя его в пределах от n_1 до n_2 , получаем время разгона двигателя между этими скоростями:

$$t_{12} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_2 - n_1}{M_{j1} - M_{j2}} \cdot \ln \frac{M_{j1}}{M_{j2}}. \quad (60)$$

Так по отдельным участкам может быть найдено все время пуска.

В ряде случаев практики одновременно с вычислением времени пуска (или торможения) желательно знать пройденный механизм за это время путь. В условиях прямолинейного изменения динамического момента этот путь в оборотах двигателя N может быть найден следующим образом.

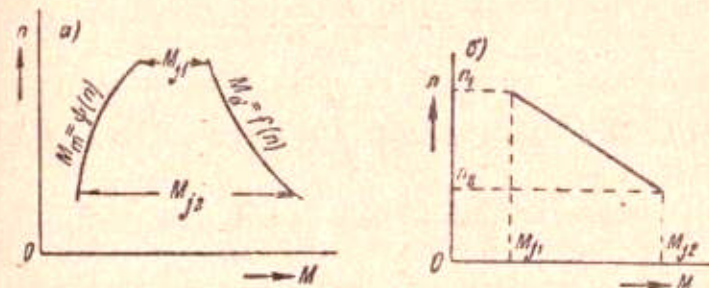


Рис. 78. Графическое получение динамического момента.

Элементарный путь в оборотах dN за время dt будет:

$$dN = \frac{n}{60} \cdot dt, \text{ а } dt = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{M_j}.$$

В общем случае:

$$N_{12} = \frac{GD^2}{2500} \cdot \int_{n_1}^{n_2} \frac{n \cdot dn}{M_j}. \quad (61)$$

При прямолинейном изменении динамического момента, согласно (59):

$$N_{12} = \frac{GD^2}{22500} \cdot \frac{n_2 - n_1}{M_{j1} - M_{j2}} \left[\left(\frac{n_2 - n_1}{M_{j1} - M_{j2}} \cdot M_{j1} + n_1 \right) \cdot \ln \frac{M_{j1}}{M_{j2}} - (n_2 - n_1) \right]. \quad (62)$$

53. Потери энергии в цепи электродвигателей при пуске и практическое значение этого вопроса

Можно доказать, что потери при пуске вхолостую в главных цепях электродвигателей (в якорной цепи машины постоянного тока, в роторной цепи асинхронных двигателей, в статорной цепи синхронных двигателей) равны запасаемой системе кинетической энергии. Докажем это лишь применительно к двигателям постоянного тока. Доказательство для других типов двигателей аналогично.

В двигателях постоянного тока приложенное к ним напряжение

$$U = E + IR = k_2 \cdot n + IR,$$

где R — сопротивление цепи якоря в двигателе, состоящее из сопротивления обмотки якоря и введенных добавочных. Соответственно потребляемая приводом мощность

$$P = UI = I^2 \cdot R + k_2 \cdot n \cdot I = P_{\text{электр}} + P_{\text{механ}},$$

где $P_{\text{механ}}$ — механическая мощность, отданная двигателем рабочей машине, а $P_{\text{электр}}$ — потери в главной цепи двигателя. Рассмотрим случай пуска двигателя вхолостую, т. е. при отсутствии статического момента на его валу ($M_m = 0$). При этом момент двигателя равен динамическому моменту, или в данном случае механической мощности, деленной на угловую скорость:

$$M_d = M_j = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{k_2 \cdot n \cdot I}{\omega} = J \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt}.$$

Отсюда получаем выражение для тока двигателя:

$$I = \frac{4\pi^2}{60^2} \cdot \frac{J}{k_2} \cdot \frac{dn}{dt}.$$

Израсходованная двигателем во время пуска вхолостую энергия

$$A = \int_0^{t_{p0}} UI dt = \int_0^{t_{p0}} k_2 \cdot n \cdot I \cdot dt + \int_0^{t_{p0}} RI^2 \cdot dt = \frac{4\pi^2}{60^2} \cdot J \cdot \int_0^{n_0} ndn + \int_0^{t_{p0}} RI^2 dt = \frac{J\omega_0^2}{2} + \int_0^{t_{p0}} RI^2 \cdot dt = A_{\text{механ}} + A_{\text{электр}}. \quad (63)$$

Величина $A_{\text{механ}}$ представляет запасенную в электрифицированном рабочем агрегате живую силу, $A_{\text{электр}}$ — потери на джоулево тепло в цепи якоря. Обозначим через n_0 скорость идеального холостого хода двигателя без потерь. При этом $E = U = k_2 \cdot n_0$. В этом случае

$$A = \int_0^{t_{p0}} UI dt = \int_0^{n_0} k_2 n_0 \cdot \frac{4\pi^2}{60^2} \cdot \frac{J}{k_2} \cdot \frac{dn}{dt} \cdot dt = J\omega_0^2. \quad (64)$$

Так как $A = A_{\text{мех}} + A_{\text{электр}}$, а $A_{\text{мех}} = \frac{J\omega_0^2}{2}$, то

$$A_{\text{электр}} = \frac{J\omega_0^2}{2}. \quad (65)$$

Таким образом, потерянная при пуске вхолостую в цепи якоря электрическая энергия равна запасаемой в системе живой силе. В случае пуска под нагрузкой к этой энергии присоединяется энергия, затраченная в двигателе на полезную работу

$$A_{\text{электр}} \cong \frac{J\omega_N^2}{2} + M_m \cdot \omega_N \cdot \frac{t_p}{2}.$$

Совершенно аналогичный вывод можно сделать и применительно к асинхронным и синхронным двигателям.

Таким образом, потери в главной цепи двигателей при пуске определяются, в первую очередь, величиной запасаемой в маховых массах кинетической энергии электропривода и приводимого им механизма.

54. Значение вопроса о пусковых и тормозных потерях для короткозамкнутых двигателей

Полученный вывод ярко иллюстрирует, насколько более тяжелые условия пуска получаются в короткозамкнутых двигателях по сравнению с двигателями с кольцами и двигателями постоянного тока. В последних двух типах двигателей израсходованное при пуске тепло, равное

$\frac{J\omega_0^2}{2}$, расходуется во всей цепи якоря или ротора и притом преимущественно в добавочных сопротивлениях, а не в обмотке двигателя.

В короткозамкнутом асинхронном двигателе все это пусковое тепло должно быть рассеяно в короткозамкнутой обмотке ротора. Это обстоятельство затрудняет возможность изготовления короткозамкнутых двигателей с мощностью, примерно, в 5 квт и выше на большое число пусков в час с приводимым механизмом (примерно свыше 600 в час). В целях уменьшения потерь в роторе, в таких случаях применяются короткозамкнутые двигатели с повышенным номинальным скольжением. Условия утяжеляются, если при частых реверсированиях короткозамкнутых двигателей применяется электрическое торможение. Можно показать, что потребляемая в роторе, при динамическом торможении,

электрическая энергия $A_{\text{дм}}$ в случае холостого хода также равна $\frac{J\omega_0^2}{2}$.

Энергия же, потерянная при торможении противовключением $A_{\text{пр}}$, равна $3 \cdot \frac{J\omega_0^2}{2}$, т. е. в три раза больше.

Таким образом, за каждый реверс двигателя потерянная в роторе короткозамкнутого двигателя при холостом ходе его энергия будет:

- 1) при отсутствии электрического торможения: на пуск — $\frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 2) при динамическом торможении: на пуск — $\frac{J\omega_0^2}{2}$;
на торможение — $\frac{J\omega_0^2}{2}$.
Всего — $2 \cdot \frac{J\omega_0^2}{2}$;
- 3) при торможении противовключением: на пуск — $\frac{J\omega_0^2}{2}$;
на торможение — $3 \cdot \frac{J\omega_0^2}{2}$.
Всего — $4 \cdot \frac{J\omega_0^2}{2}$.

Отсюда следует, что при заданном габарите короткозамкнутого двигателя и предельном для него нагреве обмоток допустимое число включений в час в первом случае составит z_0 , во втором — $\frac{z_0}{2}$, в третьем — $\frac{z_0}{4}$. Поэтому в современных мелких короткозамкнутых двигателях с числом включений в час до 3000 — 4000, применяемых в металлоре-

жущих станках для обеспечения такого режима, иногда применяется для целей торможения встроенный в двигатель отдельный электромагнитный тормоз.

Все указанное выше приводит к заключению о необходимости в двигателях для повторно-кратковременного режима работы, особенно для напряженного, стремиться к уменьшению маховых моментов двигателя и приведенного махового момента всего агрегата, в целях уменьшения времен пуска и торможения и расхода энергии в цепях двигателей в переходных режимах.

Какое значение в этом отношении имеют специально сконструированные двигатели с повышенным скольжением, показывают приводимые ниже для примера сравнительные данные о двигателях фирмы AEG. Величина z_0 характеризует допустимое число пусков в час ненагруженного двигателя без дополнительных маховых масс при условии, чтобы двигатель не нагрелся выше допускаемой для изоляции температуры.

Двигатели с повышенным скольжением				Двигатели нормального исполнения		
Тип	GD^2 кг.м	z_0	P_N квт	Тип	z_0	P_N квт
ADO 20/4	0,0015	4000	0,10	ADO 20/4	1200	0,125
DB 5/4	0,011	4000	0,66	DB 5/4	1000	0,80
DB 11/4	0,028	3600	1,20	DB 11/4	800	1,50
DB 22/4	0,06	3000	2,20	DB 22/4	550	2,90
DB 55/4	0,21	1800	5,00	DB 55/4	400	6,00

55. Выбор номинального числа оборотов в минуту двигателя и выбор передаточного числа от двигателя к механизму

В тех случаях, когда привод пускается в ход редко (при продолжительном режиме работы), число оборотов двигателя в минуту для соответствующих приводов можно выбирать так, чтобы получить наиболее экономичное по первоначальной стоимости решение. Чем выше скорость двигателя, тем стоимость его ниже. Мощность двигателя

$$P = c \cdot D^2 \cdot l \cdot n_N$$

где c — машинная постоянная, определяемая электрическими и магнитными параметрами машины, D и l — диаметр рашочки и активная длина железа вращающегося якоря или ротора, n_N — номинальное число оборотов в минуту.

Очевидно, что чем выше номинальная скорость двигателя, тем меньше его геометрические размеры при данной мощности, тем дешевле двигатель. Сочетание быстроходного двигателя с зубчатой передачей оказывается, в некоторых случаях малых и средних мощностей, дешевле применения тихоходных двигателей. Быстроходные асинхронные двигатели имеют еще преимущество более высокого $\cos \phi$. По этим соображениям, для ряда случаев продолжительного режима современная прак-

тика применяет так называемые редукторные двигатели. Редукторные двигатели представляют сочетание двигателя с зубчатой передачей в одном корпусе. Электродвигатели в таких конструкциях изготавливаются, примерно, на 1500—1800 об/мин.

Конец вала для соединения с рабочей машиной может иметь от 750 до 13,5 об/мин. Одноступенчатые передачи от двигателя имеют отношение до 1:5, двухступенчатые — от 1:5 до 1:18, трехступенчатые — от 1:18 до 1:45. Обычная передача с планетарным зацеплением дает соотношение 1:71. При односкоростном асинхронном двигателе редукторные двигатели могут давать несколько скоростей. В США многофазные редукторные двигатели изготавливаются на мощности от 90 вт до 50 квт, однофазные — от 0,5 до 3,7 квт, постоянного тока — от 0,5 до 5 квт. Нестандартные редукторные двигатели изготовлены до мощности в 500 квт.

Сравнение размеров обыкновенного и редукторного двигателя мощностью в 15 квт дано на рис. 79. На нем габариты редукторного двигателя очерчены жирной линией. Отдельный редуктор показан тонкими линиями.

Рис. 80, а и б показывают редукторный двигатель американской конструкции.

Значительно сложнее обстоит дело с выбором передаточного числа от двигателя к механизму в приводах повторно-кратковременного режима работы. В целях повышения производительности, ускорения операций и уменьшения расхода энергии необходимо, чтобы маховый момент двигателя был меньше. Вес двигателя пропорционален $D^2 l$. Стало быть маховый момент двигателя, примерно, пропорционален $D^4 l$. Конструируя электродвигатель определенной мощности, можно, в соответствии с равенством (65), выбрать больший диаметр D и меньшую длину l или наоборот. Выбирая большую длину, мы сильно уменьшаем маховый момент двигателя, так как он пропорционален четвертой степени диаметра. Поэтому все двигатели повторно-кратковременного режима работы, в частности крановые и металлургические, конструируются с увеличенной длиной и уменьшенным диаметром. Это уменьшает время пуска и торможения привода. В отдельных случаях по этим соображениям берут два двигателя половинной мощности — маховый момент при этом уменьшается.

Конструирование двигателей с увеличенной длиной и уменьшенным диаметром решает задачу об уменьшении махового момента самого дви-

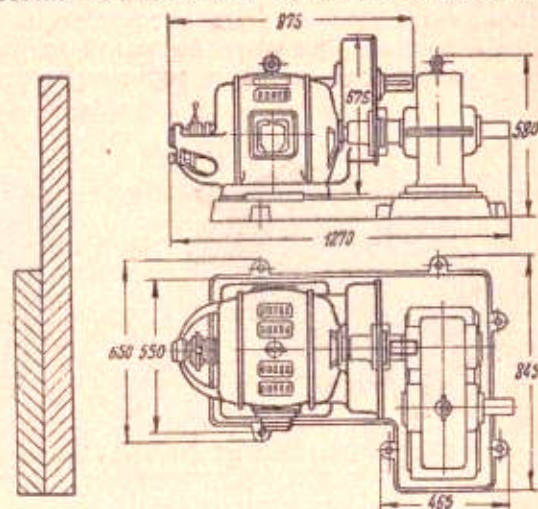


Рис. 79. Сравнение размеров обыкновенного и редукторного двигателей при мощности 15 квт 1500/1360 об/мин.

гателя. Однако для уменьшения времен пуска и торможения в приводах, работающих при повторно-кратковременном режиме, нужно стремиться к уменьшению приведенного момента всего агрегата. При этом возникает вопрос о выборе наиболее выгодного передаточного числа от двигателя к механизму k . При одной передаче приведенный маховый момент агрегата

$$GD^2 = GD^2_d + \frac{GD^2_m}{k^2}.$$

Вопрос о наиболее выгодном передаточном числе для режимов пуска и торможения удобнее всего рассматривать исходя из производительности механизма. При учете последней длина пути механизма, проходящая на периоды пуска и торможения, должна быть пройдена им

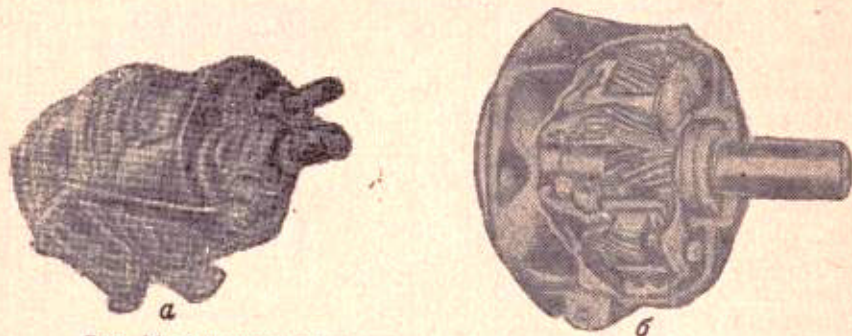


Рис. 80. Редукторный двигатель американской конструкции.

в кратчайший срок. Возьмем частный случай равномерно ускоренного движения при пуске при $M_s = \text{const}$. В этом случае пройденный за время пуска путь какого-то органа механизма в метрах

$$S = \frac{at^2}{2},$$

где a — постоянное ускорение рассматриваемой точки рабочей машины в м/сек^2 , а t — время ускорения в секундах. При заданном S наименьшее t будет соответствовать максимальному ускорению a . Задача нахождения наиболее выгодного передаточного числа сводится к определению максимального возможного значения a .

Для режима пуска при принятых ранее обозначениях можно написать. Ускоряющий (динамический) момент

$$M_j = M_{dm} - \frac{M_s}{k \cdot \eta}, \quad (66)$$

где M_{dm} — среднее значение момента двигателя за пуск, а $M_m = \frac{M_s}{k \cdot \eta}$ — приведенный к угловой скорости двигателя статический момент механизма.

Постоянное угловое ускорение исполнительного механизма, выраженное в об/мин/сек (такое обозначение более привилось в практике, чем об/сек^2),

$$\alpha_m = \frac{n_m}{t_p} = \frac{n_{Nd}}{k} \cdot \frac{1}{t_p} = \frac{375 \cdot M_j}{GD^2 \cdot k} = \frac{375}{k} \cdot \frac{M_{dm} - \frac{M_s}{k \cdot \eta}}{(GD^2)_m + (GD^2)_d} = \frac{375 \left(k \cdot M_{dm} - \frac{M_s}{\eta} \right)}{(GD^2)_m + (GD^2)_d \cdot k^2}. \quad (67)$$

Для нахождения оптимального α_m возьмем производную от (67) по k и приравняем ее нулю. В таком случае

$$\frac{d\alpha_m}{dk} = 375 \cdot \frac{M_d [(GD^2)_m + k^2 \cdot (GD^2)_d] - \left[\left(k \cdot M_{dm} - \frac{M_s}{\eta} \right) \cdot 2k \cdot (GD^2)_d \right]}{[(GD^2)_m + k^2 (GD^2)_d]^2}.$$

Приравняв числитель нулю и решая получающееся квадратное уравнение, находим, что наиболее выгодное для пуска передаточное число

$$k_0 = \frac{M_s}{\eta M_{dm}} + \sqrt{\frac{\left(\frac{M_s}{\eta} \right)^2}{M_{dm}^2} + \frac{(GD^2)_m}{(GD^2)_d}}. \quad (68)$$

Если мы таким же образом исследуем условия торможения, то для этого периода получим наиболее выгодное передаточное число.

$$k'_0 = -\frac{M_s \cdot f(\eta)}{M_{dm}} + \sqrt{\frac{[M_s \cdot f(\eta)]^2}{(M_{dm})^2} + \frac{(GD^2)_m}{(GD^2)_d}}. \quad (69)$$

В этом равенстве $f(\eta)$ учитывает различные возможные изменения направления передачи энергии между двигателем и механизмом.

Очевидно, что наиболее выгодное передаточное число для повторно-кратковременного режима будет некоторое среднее из k_0 и k'_0 . Практически по (68) и (69) определяют среднее значение

$$k_m = \frac{k_0 + k'_0}{2},$$

а затем берут два-три близких и проделяют детальные расчеты. На основе их получают то наиболее выгодное передаточное число, которое должно быть взято в установку.

56. Подразделение переходных режимов электропривода

Переходные режимы электропривода могут быть разделены на три основных области: 1) механические переходные режимы; 2) электромеханические переходные режимы и 3) тепло-электромеханические переходные режимы.

Протекание переходных процессов в электроприводах в основном определяется механической и электромагнитной инерцией системы; тепловая играет значительно меньшую роль. Те процессы, в которых при анализе мы учитываем лишь роль механической инерции (маховые массы агрегата), мы называем механическими. Те процессы, в которых при анализе, кроме механической инерции, мы учитываем электромагнитную (самоиндукцию обмоток), мы называем электромеханическими. При дополнительном учете тепловых изменений получаем процессы, которые именуем теплоэлектромеханическими.

В зависимости от условий работы электрифицированного агрегата, особенностей его технологического процесса, требуемой при этом точности, влияния работы электропривода на производительность, нам приходится учитывать переходные процессы в том или другом объеме, с той или другой точностью. Так, например, в таких механизмах, как глиномаялка, нам достаточно лишь выбрать соответствующий номинальный момент двигателя и проверить двигатель на достаточность пускового момента. Учета переходных режимов здесь вообще не требуется; в реверсивном прокатном стане с маховиком часто достаточно ограничиться рассмотрением механических переходных режимов. В реверсивном прокатном стане, строгательном станке, многодвигательном приводе бумагоделательной машины, пулеметной турели на самолете требуется анализ электромеханических переходных режимов. Теплоэлектромеханические переходные режимы, в силу сложности, до настоящего времени изучены пока весьма мало, и нужда в их анализе пока весьма ограничена.

Полный анализ всех вопросов, связанных с переходными режимами привода, выходит за объем данной книги. Соответствующие вопросы частично рассмотрены в книге автора „Основы электропривода“ [Л, 1] и в особом докладе автора „Обобщение теории автоматизированного привода“ [Труды совещания по автоматизированному приводе Института автоматики и телемеханики АН СССР, 1945.]. Здесь же мы коснемся некоторых, наиболее типичных случаев. Заметим, что аналитическое решение вопроса возможно по существу лишь в двигателях с шунтовой характеристикой. В остальных случаях приходится прибегать к графоаналитическим решениям.

57. Механические переходные режимы электропривода с шунтовой характеристикой при постоянном статическом моменте

Рассматриваемые здесь решения охватывают все механические режимы шунтовых двигателей постоянного тока и рабочие режимы асинхронных двигателей при работе в пределах от $M_d = 0$ до M_{max} , т. е. от $\sigma = 0$ до $\sigma < \sigma_m$, т. е. на участке, где механическая характеристика асинхронного двигателя может быть принята за прямую. Обратимся к уравнению привода для двигательного режима:

$$M_d - M_m = J \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (70)$$

В двигателях с шунтовой характеристикой

$$n = n_0 \cdot (1 - \sigma) \quad (71)$$

$$M_d = c \cdot \sigma. \quad (72)$$

Подставляя (71) в (70), получаем:

$$M_d - M_m = - \frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \cdot \frac{d\sigma}{dt} \quad (73)$$

Из (72) следует, что

$$\frac{M_d}{\sigma_d} = \frac{M_N}{\sigma_N} = \frac{M_m}{\sigma_s}, \quad (74)$$

где $M_N, \sigma_N, M_m, \sigma_s$ — постоянные величины.

Подставляя соотношение (74) в (73), получим:

$$\frac{M_N}{\sigma_N} \cdot \sigma_d - \frac{M_N}{\sigma_N} \cdot \sigma_s = - \frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \cdot \frac{d\sigma}{dt}$$

Этот вид уравнения пригоден как для случая пуска двигателя, так и для случаев ускорения и замедления при изменении нагрузки.

Разделяя переменные, имеем:

$$\frac{d\sigma}{\sigma_d - \sigma_s} = - \frac{M_N}{GD^2} \cdot \frac{375}{n_0 \sigma_N} \cdot dt = - \frac{1}{B} \cdot dt, \quad (75)$$

где B — величина постоянная и равная

$$B = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot M_N} \cdot \sigma_N; \quad (76)$$

она носит название электромеханической постоянной электропривода, точнее — всего электрифицированного агрегата, ибо величина GD^2 определяется совместно двигателем и рабочей машиной. Для естественной характеристики шунтового двигателя постоянного тока (рис. 81) она равна также:

$$B = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_0}{M_p'}$$

где M_p' — момент, развиваемый двигателем в покое при токе короткого замыкания. При этом $M_p' : M_N = 1 : \sigma_N$. Очевидно, что B выражается в секундах и численно представляет время разгона агрегата до скорости n_0 при $M_p' = \text{const}$ и $M_m = 0$. Эта постоянная имеет существенное значение, так как она определяет длительность установления механических процессов электропривода. Интегрируя (75), получаем:

$$\ln(\sigma_d - \sigma_s) - \ln K = - \frac{1}{B} \cdot t,$$

где $\ln K$ — подинтегральная постоянная. В начале работы, при $t = 0$, $\sigma_d = \sigma_H$ (начальное исходное скольжение). В таком случае

$$K = \sigma_H - \sigma_s.$$

Для σ_d окончательно получим:

$$\sigma_d = \sigma_e (1 - e^{-t/B}) + \sigma_H \cdot e^{-t/B}. \quad (77)$$

Заменяя σ через пропорциональные ему моменты, будем иметь:

$$M_d = M_m (1 - e^{-t/B}) + M_H e^{-t/B}. \quad (78)$$

Заменяя в (78) моменты через пропорциональные им токи, получим закон изменения тока двигателя:

$$I_d = I_m (1 - e^{-t/B}) + I_H e^{-t/B}. \quad (79)$$

Заменяя скольжения через числа оборотов в минуту, можно также написать:

$$n_d = n_s (1 - e^{-t/B}) + n_H e^{-t/B}, \quad (80)$$

где n_s — число оборотов двигателя, соответствующее по данной механической характеристике M_m .

Таким образом, в случае механических переходных режимов при $M_m = \text{const}$ и шунтовой характеристике двигателя, изменения всех вели-

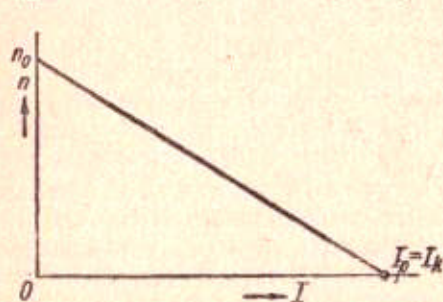


Рис. 81. Естественная характеристика шунтового двигателя с точкой I_p при $n = 0$.

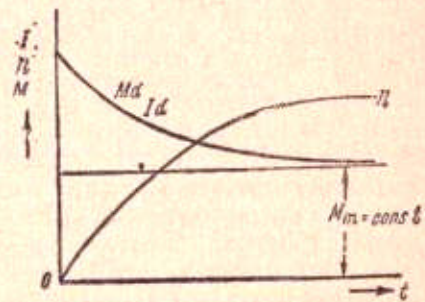


Рис. 82. Протекание переходных режимов в приводе с шунтовым двигателем.

чин происходят по закону экспоненциальных кривых (рис. 82). Из уравнения (78) видно, что электропривод достигает установившегося состояния движения по истечении бесконечно долгого времени. Однако уже по истечении $t = 5B$ максимум кривой отстоит от ее асимптоты всего лишь на 0,5% от M_s .

В самом деле, при начальном моменте $M_H = 0$ можно написать:

$$M_d = M_m (1 - e^{-t/B}) = M_m (1 - \frac{\gamma}{100}).$$

Значениям	$\frac{t}{B} = 2,3$	3	3,22	3,51	3,91	4,6	5,3
соответствуют значения	$\gamma = 10$	5	4	3	2	1	0,5

Таким образом, процесс устанавливается по истечении $(4 \div 5)B$. Для шунтовых машин постоянного тока постоянной B можно придать другое выражение. Учитывая, что $M_N = k_1 I_N$ и $E_N = k_2 \cdot n_N$, получим:

$$B = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot M_N} \cdot \sigma_N = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot k_1 \cdot I_N} \cdot \frac{n_0 - n_N}{n_0}.$$

Так как $I_N = \frac{U - E_N}{R}$, где $E_N = k_2 \cdot n_N$, а $U = k_2 \cdot n_0$, получим:

$$B = \frac{GD^2 \cdot R}{375 \cdot k_1 k_2}. \quad (81)$$

Таким образом, каждая механическая характеристика имеет свою постоянную B_x , соответствующую величине введенного в цепь якоря сопротивления R_x или, иначе говоря, — своему собственному номинальному скольжению σ'_N при $M_d = M_N$.

Полученные равенства применимы и для приема и сброса нагрузки и для условий пуска. Время пуска двигателя на каждой ступени пускового реостата определяется равенством:

$$M_d = M_{установ} = M_m (1 - e^{-t/B_x}) + M_H \cdot e^{-t/B_x};$$

отсюда находим:

$$e^{-t/B} = \frac{M_H - M_m}{M_y - M_m}$$

или

$$t_p = B \cdot \ln \frac{M_H - M_m}{M_y - M_m}. \quad (82)$$

То же самое время t_p может быть выражено через число оборотов в минуту:

$$t_p = B \cdot \ln \frac{n_s - n_H}{n_s - n_{кон}}.$$

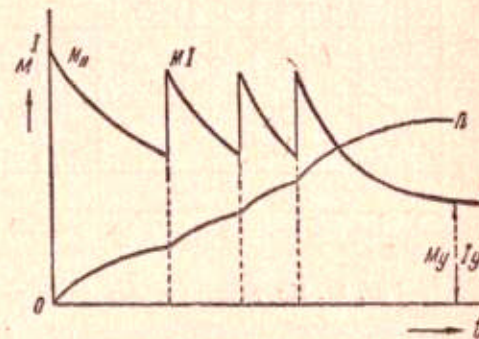


Рис. 83. Кривые пуска привода.

Для последней ступени ($M_y = M_m$ или $n_{кон} = n_s$) время разгона из (82) получается равным бесконечности. Практически для этой ступени надо принимать

$$M_y = 0,95 M_m \text{ или } n_{кон} = 0,95 n_s.$$

Полная кривая пуска двигателя при нескольких ступенях дана на рис. 83. Решение уравнений в данном случае для тормозных режимов аналогично. Уравнение привода в общем случае имеет вид:

$$\pm M_d \pm M_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}.$$

Решение уравнения движения электропривода при противоякличении и реактивном статическом моменте дает выражения:

$$\sigma_d = -\sigma_s (1 - e^{-t/B}) + \sigma_H e^{-t/B}. \quad (83)$$

$$n_d = 2n_0 (1 - e^{-t/B}) - n_s + (n_s + n_H) e^{-t/B}. \quad (84)$$

$$M_d = -M_m (1 - e^{-t/B}) + M_H e^{-t/B}. \quad (85)$$

Время остановки привода от скорости n_s до $n=0$ или до $\sigma_d=1$ при работе на одной и той же механической характеристике будет:

$$t_0 = B_x \cdot \ln \frac{\sigma_H + \sigma_s}{1 + \sigma_s} = B_x \cdot \ln \frac{2n_0 - n_H - n_s}{2n_0 - n_s}, \quad (86)$$

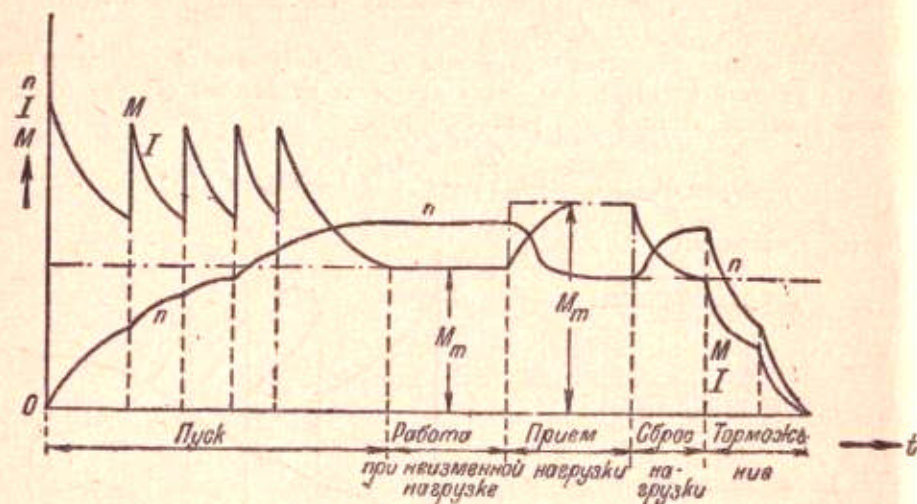


Рис. 84. Протекание переходных процессов некоторого типа привода.

где B_x — соответствующая электрохимическая постоянная агрегата. При динамическом торможении

$$M_d = -M_m (1 - e^{-t/B}) + M_H \cdot e^{-t/B}. \quad (87)$$

$$n = -n_s (1 - e^{-t/B}) + n_H \cdot e^{-t/B}, \quad (88)$$

где B' — электрохимическая постоянная, в данном случае равная $B' = \frac{GD^2 \cdot n_N}{375 \cdot M_H}$. Время торможения электропривода до $n=0$ при неизменном сопротивлении в цепи якоря

$$t'_t = B' \cdot \ln \frac{M_m + M_H}{M_m}. \quad (89)$$

Для примера на рис. 84, при заданном законе изменения статического момента M_m , представлены законы изменения скорости двигателя n с шунтовой характеристикой при пуске в ход, изменении нагрузки и торможении. Изменение скорости происходит по экспоненциальным кривым. Для пуска принято четыре ступени пускового сопротивления, при торможении (в данном случае динамическом) — две ступени. Переход от одной ступени к другой вызывает излом в экспоненциальных кривых, так как меняется основной параметр этих кривых B_x . Там же показано изменение момента двигателя при статическом моменте нагрузки M_m . Кривая $M_d = f(t)$ одновременно является кривой тока двигателя $I_d = f(t)$.

58. Работа электропривода с шунтовой характеристикой с маховиком при пиковой нагрузке

Нереверсивный прокатный стан, график приведенных к валу двигателя статических моментов которого показан на рис. 85, является наиболее типичным примером подобных условий работы. Пики нагрузки

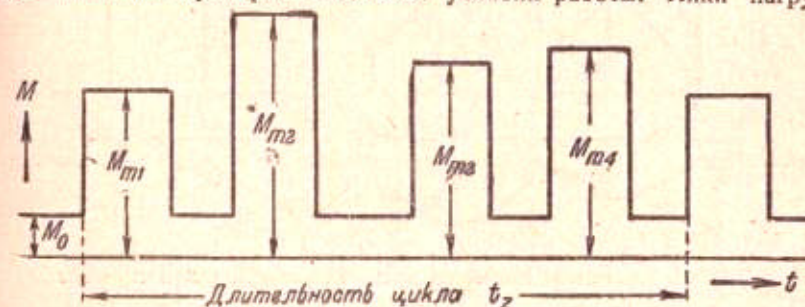


Рис. 85. График статических моментов прокатного нереверсивного стана.

соответствуют пропускam металла через валки. В пределах каждого пропуска металла момент прокатки остается постоянным. Момент холостого хода стана M_0 соответствует трению в подшипниках.

Так как кривая статических моментов стана $M_m = f(t)$ не может быть, вследствие нелинейности, выражена никаким уравнением, то решение приходится проводить последовательно по отдельным участкам, в пределах которых M_m (или M_0) будет постоянным. Решение уравнения, полученное выше в равенствах (77—80), будет справедливо и в данном режиме, являющемся случаем приема и сброса нагрузки. Для любого k -того участка с прокаткой (пропуска металла через валки) будут справедливы выражения:

$$\sigma_d = \sigma_k (1 - e^{-t/B}) + \sigma_{ok} e^{-t/B} \quad (77')$$

и

$$M_d = M_k (1 - e^{-t/B}) + M_{ok} \cdot e^{-t/B}, \quad (78')$$

где

$$\sigma_k = \frac{M_N}{\sigma_N} \cdot M_k \text{ и } \sigma_0 = \frac{M_N}{\sigma_0} \cdot M_0;$$

здесь M_k — момент прокатки соответствующего пропуска, M_{ok} — момент двигателя в начале этого пропуска, а σ_k и σ_{ok} — соответствующие им скольжения.

Соответственно для паузы

$$\sigma_d = \sigma_0 (1 - e^{-t/B}) + \sigma_{ok} e^{-t/B}, \quad (77'')$$

$$M_d = M_0 (1 - e^{-t/B}) + M_{ok} e^{-t/B}. \quad (78'')$$

B является электромеханической постоянной данного агрегата. Графики моментов двигателя $M_d = f(t)$ и скольжения $\sigma_d = \varphi(t)$ представлены

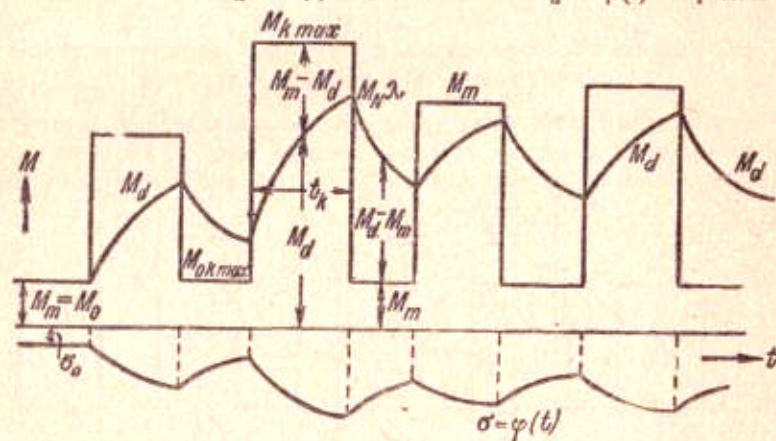


Рис. 86. Изменение моментов двигателя при пиковом приводе.

на рис. 86 экспоненциальными кривыми. Во время пропуска момент двигателя M_d меньше момента прокатки M_m . Разность $M_d - M_m$, равная динамическому моменту, покрывается маховиком. В свою очередь, при

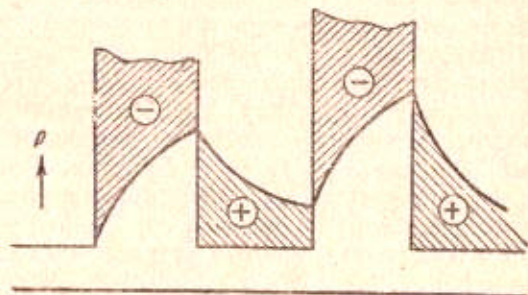


Рис. 87. Изменение мощности двигателя и маховика.

паузе $M_d > M_m$ динамический момент ($M_d - M_m$) идет на зарядку маховика.

На рис. 87 показано изменение мощности двигателя и маховика. Заштрихованные верхние площадки представляют энергию, отдаваемую маховиком, заштрихованные нижние — энергию, идущую от двигателя.

на зарядку маховика. Если за следующую за каким-то пропуском паузу двигатель зарядит маховик, то двигатель в конце паузы вернется к начальной скорости холостого хода стана. Если нет, то добавочная зарядка маховика происходит в короткий период между прокаткой двух слитков. Маховой момент необходимого маховика может быть найден из следующих соображений. В большинстве случаев наибольший достигаемый двигателем момент относится к концу периода пропуска с наибольшим моментом прокатки $M_{k \max}$ (рис. 86). Пусть двигатель имеет предельную допустимую по его электромагнитным свойствам перегрузку $\lambda = \frac{M_{k \max}}{M_N}$.

Эта перегрузка должна быть полностью использована, т. е. момент двигателя в конце пропуска должен быть $M_d = M_N \cdot \lambda$. При этом мы получим меньший вес маховика. В таком случае для конца пропуска с $M_{k \max}$ длительностью t_k

$$M_d = M_N \cdot \lambda = M_{k \max} (1 - e^{-t_k/B}) + M_{ok \max} e^{-t_k/B}. \quad (90)$$

Отсюда находим, что

$$e^{t_k/B} = \frac{M_{k \max} - M_{ok \max}}{M_{k \max} - M_N \cdot \lambda},$$

где $M_{ok \max}$ — момент двигателя в начале рассматриваемого пропуска. Ориентировочно он может быть принят равным M_0 .

Выражая B через ее составляющие $B = \frac{GD^2 \cdot n_0}{375 \cdot M_N} \cdot \sigma_N$, получим необходимое значение приведенного махового момента для такого пикового привода:

$$GD^2 = \frac{t_k \cdot M_N \cdot 375}{n_0 \cdot \sigma_N} \cdot \frac{1}{\ln \left(\frac{M_{k \max} - M_0}{M_{k \max} - M_N \cdot \lambda} \right)}. \quad (91)$$

Значительное снижение скорости электропривода в целях использования маховика повлекло бы за собой существенное снижение производительности механизма. Поэтому нормально маховик выбирают так, чтобы наибольшее скольжение было не больше 20%. Только в отдельных случаях, обходясь безмаховиковым приводом (например ножницы для резки железа), допускают максимальное скольжение до 50%.

59. Решение уравнений механических переходных процессов в случае серийных и компаундных двигателей постоянного тока

В случае серийных и компаундных двигателей механические характеристики не выражаются аналитически, поэтому интегрирование уравнений движения привода приходится производить приближенно графоаналитически, пользуясь так называемым методом конечных приращений. Сущность этого метода заключается в том, что при нем бесконечные малые изменения числа оборотов в минуту (dn) заменяются малыми конечными приращениями (Δn). При этом предполагается, что при подстановке в уравнения движения привода средних значений мо

мента двигателя и среднего значения статического момента сопротивления для каждого рассматриваемого периода изменения скорости уравнения движения электропривода остаются в силе.

Средние значения момента двигателя M_{dm} и статического момента M_{mm} обычно находятся графическим путем.

Применительно к рассматриваемому методу, уравнение движения привода имеет вид:

$$M_{dm} - M_{mm} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t}, \quad (92)$$

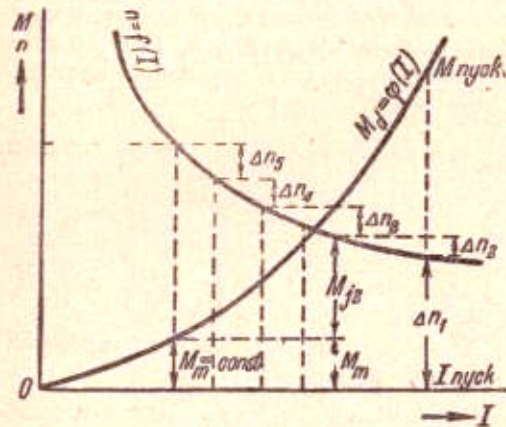


Рис. 88. Графо-аналитический метод расчета переходных режимов.

где M_{dm} и M_{mm} — средние значения момента двигателя и статического момента двигателя за рассматриваемый участок.

Имея кривые $M_d = f(n)$ и $M_m = \varphi(I)$ (то же и при $M_m = \text{const}$) (рис. 88), вычитаем одну из другой графически и находим динамический момент $M_j = \psi(n)$. Далее задаемся последовательными приращениями числа оборотов в минуту $\Delta n_1, \Delta n_2, \dots, \Delta n_n$ и находим средние значения $M_{j1}, M_{j2}, \dots, M_{jn}$.

Пользуясь равенством (92), находим времена $\Delta t_1,$

$\Delta t_2, \dots, \Delta t_n$ разгона на каждом участке по формуле

$$\Delta t_x = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{\Delta n_x}{M_{jx}}. \quad (92')$$

Все вычисления удобно представить в табл. 16.

Таблица 16

Применение графо-аналитического метода

Приращение скорости за участок	Конечная скорость участка	Начальное значение M_{jn}	Конечное значение M_{jk}	Среднее значение M_{jm}	Длительность разгона на участке	Суммарное время
Δn_1	$n_1 = \Delta n_1$	M'_{j1}	M''_{j1}	M_{jm1}	Δt_1	$t_1 = \Delta t_1$
Δn_2	$n_2 = n_1 + \Delta n_2$	M'_{j2}	M''_{j2}	M_{jm2}	Δt_2	$t_2 = t_1 + \Delta t_2$
Δn_3	$n_3 = n_2 + \Delta n_3$	M'_{j3}	M''_{j3}	M_{jm3}	Δt_3	$t_3 = t_2 + \Delta t_3$
Δn_4	$n_4 = n_3 + \Delta n_4$	M'_{j4}	M''_{j4}	M_{jm4}	Δt_4	$t_4 = t_3 + \Delta t_4$
Δn_5	$n_5 = n_4 + \Delta n_5$	M'_{j5}	M''_{j5}	M_{jm5}	Δt_5	$t_5 = t_4 + \Delta t_5$

Откладывая последовательно значения Δn_k для Δt_k , можно построить ступеньками кривую $n = f(t)$ (рис. 89). Так как для каждого значения n по характеристикам двигателя [$M_d = f(n)$ и $M_d = \varphi(I)$] известны значения M_d и I , то не представляет затруднений построить кривые $M_d = f(t)$ и $I = \varphi(t)$.

Подобный метод может быть вполне применим и для торможения. При этом в силу отрицательного значения динамического момента скорость будет не повышаться, а снижаться. Графический вариант этого метода известен под названием принципа пропорций.

Отметим, что для решения подобных задач может быть применен также аналитический метод, изложенный в п. 52.

60. Методика решения задач механических переходных режимов

при $M_m = f(n)$ и $M_m = \varphi(L)$.

Для решения задач при $M_m = f(n)$ в большинстве случаев применяется (кроме шунтового двигателя постоянного тока) графо-аналитический метод, изложенный в предыдущем параграфе. Решение задач для 3-го класса рабочих механизмов (п. 44), у

которых статический момент зависит от пути $M_m = \varphi(L)$, несколько сложнее. Пройденный механизмом за участок путь будет известен лишь тогда, когда будет известна его конечная скорость и время. А последние могут быть найдены лишь в результате решения уравнения движения привода. Поэтому в данном случае поступают так, как и в п. 59, т. е. разбивают кривые $M_d = f(n)$ и $M_m = \varphi(L)$ на участки. Разбивка второй кривой делается постепенно. Возьмем, положим, первый участок. Принимаем для него определенное значение Δn_1 и среднее значение M_{dm1} . Ориентировочно предполагаем величину пути, пройденного за время, соответствующее приращению Δn_1 , равной ΔL_1 . Для ΔL_1 находим среднее значение статического момента M_{m1} . Вычисляем Δt_1 по равенству (92'). Находим пройденный за это время путь $\Delta L'_1$ в оборотах двигателя (ΔN). Для первого участка

$$\Delta N = \frac{\Delta n_1}{2} \cdot \Delta t_1.$$

Если этот путь совпал с принятым, то расчет для первого участка закончен и можно переходить к следующему. Если же нет, то для первого участка нужно принять полученный путь, $\Delta L'_1$, взять для него новое среднее значение статического момента M'_{m1} и расчет произвести вновь.

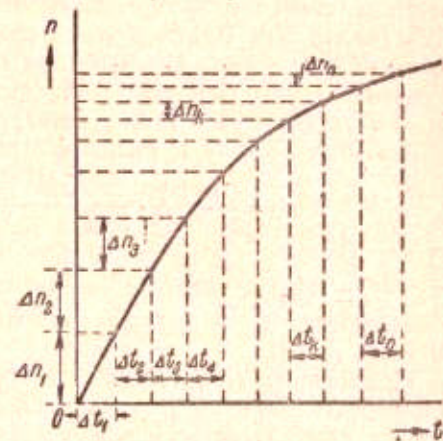


Рис. 89. Получение кривой n в функции от времени.

61. Механические переходные режимы при переменном статическом моменте и при переменном маховом моменте агрегата

Как отмечено выше (п. 46), уравнение движения привода в этом случае имеет вид (обобщенный для различных режимов):

$$\pm M_d \pm M_m = J(x) \cdot \frac{d\omega}{dt} + \frac{dJ(x)}{dx} \cdot \frac{\omega^2}{2}. \quad (42)$$

С этим уравнением чаще всего приходится оперировать в кинематических схемах исполнительных механизмов с кривошипными передачами (см. п. 50). Решение этого уравнения должно производиться графическими методами. Мы приведем лишь один вариант решения. Введем в равенство (42) GD^2 вместо J . Если угол поворота механизма α , то $d\alpha = \omega \cdot dt$. Заменяя в (42) J через GD^2 и α через ω и переходя от дифференциальных величин к элементарным приращениям, получим для Δt :

$$\Delta t = \frac{GD^2 [z]}{375} \cdot \frac{\Delta n}{(M_d \pm M_m)_m} + \frac{n}{750} \cdot \frac{\Delta GD^2 [z]}{(M_d \pm M_m)_m}, \quad (93)$$

где $(M_d \pm M_m)_m$ — среднее значение динамического момента M_{jm} за рассматриваемый промежуток времени Δt , соответствующий приращению Δn .

Приращение угла поворота кривошипа $\Delta \alpha$ в градусах может быть при передаточном числе между осью двигателя и осью кривошипа k выражено равенством:

$$\Delta \alpha \cdot \frac{\pi}{180} \cdot k = \frac{\pi n_m}{30} \cdot \Delta t, \quad (94)$$

где n_m — среднее значение скорости двигателя за рассматриваемый участок. Отсюда:

$$\Delta \alpha = \frac{6 \cdot n_m}{k} \cdot \Delta t. \quad (95)$$

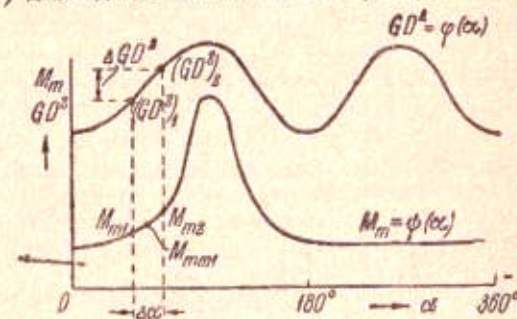
Задачу приходится вообще решать по методу последовательного подбора, изложенному в п. 60. В силу связи большого числа величин, подбор здесь значительно сложнее и всегда требует повторного подсчета.

Н. П. Куницким [Л, 14] выведена следующая формула для Δn :

$$\Delta n = \frac{250 \cdot \Delta \alpha \cdot k [M_{dml} \pm M_{mm}] - 2n_1^2 \cdot \Delta GD^2 [z]}{4n_1 \cdot GD^2 [z] \pm 125 \cdot \Delta \alpha \cdot k \cdot \operatorname{tg} \varphi}; \quad (96)$$

в ней M_{dml} — момент двигателя в начале участка, M_{mm} — среднее значение статического момента за участок, $GD^2(x)$ — маховый момент агрегата в начале участка, $\Delta GD^2(\alpha)$ — приращение махового момента за участок, n_1 — число оборотов в минуту двигателя в начале участка. $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta M_d}{\Delta \alpha}$ характеризует наклон механической характеристики двигателя (рис. 90). Величина $\operatorname{tg} \varphi$ от участка к участку для шунтового двигателя остается постоянной, для серийного и компаундного меняется.

Знак (—) в формуле относится к двигательной работе двигателя, знак (+) — к тормозной. (Формула (96) для первого участка не применима.) При этом способе подсчета задаемся $\Delta \alpha$, находим $(GD^2)_{\alpha 1}$ и $\Delta GD^2_{\alpha 1}$ и M_{mm1} . Берем значения M_{dm1} в начале участка и число оборотов в минуту двигателя n_1 также в начале участка. Находим Δn по равенству (96). Формула (93) дает далее значение Δt . Проверка величины $\Delta \alpha$ может быть сделана по равенству (95). Обычно при таком применении этого метода повторного расчета приращения угла не требуется.



62. Электромеханические переходные режимы в системе Леонарда

Вследствие существенного влияния самоиндукции обмотки возбуждения генератора в системе Леонарда необходимо рассматривать электромеханические переходные режимы. Работа системы при пуске подчиняется следующим уравнениям. Уравнение электрического равновесия для цепи возбуждения с током i :

$$\alpha U_b = ir + L_b \cdot \frac{d \cdot i}{dt}, \quad (97)$$

где r и L_b — сопротивление и коэффициент самоиндукции цепи возбуждения, U_b — нормальное напряжение на зажимах обмотки возбуждения, α — коэффициент форсировки, показывающий во сколько раз повышается напряжение на обмотке возбуждения при пуске для борьбы с электромагнитной инерцией (п. 17). Решая это уравнение, получаем для тока возбуждения равенство:

$$i = \alpha U_b (1 - e^{-t/L_b/r}) = \alpha \cdot U_b (1 - e^{-t/T}), \quad (98)$$

где T — электромагнитная постоянная обмотки возбуждения генератора, равная L_b/r . Выражается она в секундах.

Примем генератор ненасыщенным. В таком случае его э. д. сила при $n = \text{const}$:

$$E_g = c \cdot i = \alpha \cdot U_N (1 - e^{-t/T}), \quad (99)$$

где U_N — номинальное напряжение генератора.

Для цепи якоря двигателя с током I_d получаем уравнение равновесия э. д. сил в этой цепи:

$$E_g = \alpha \cdot U_N (1 - e^{-t/T}) = I_d R_a + L_d \cdot \frac{d \cdot I_d}{dt} + E_d. \quad (100)$$

В нем E_d — обратная э. д. сила двигателя, R_a — сопротивление якорной цепи (генератора и двигателя), а L_d — ее коэффициент самоиндукции

По сравнению с влиянием L_b самоиндукции обмотки возбуждения величиной L_d можно пренебречь, т. е. можно принять $L_d \cdot \frac{d \cdot I_d}{dt} = 0$.

Равенство (100) должно решаться совместно с уравнением движения привода вида

$$M_d - M_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}. \quad (101)$$

Решая совместно равенства (100) и (101) на основе того, что $E_d = k_2 \cdot n$, а $M_d = k_1 n$, для случая пуска получаем:

$$n = \frac{\alpha \cdot n_0}{T - B} [T(1 - e^{-t/T}) - B(1 - \gamma \cdot e^{-t/B})] - \Delta n_s. \quad (102)$$

В этом равенстве n_0 — число оборотов идеального холостого хода двигателя, Δn_s — снижение его скорости при статическом моменте M_m , равное $(n_0 - n_s)$, T — электромагнитная постоянная обмотки возбуждения $T = \frac{L_b}{r_b}$, а B — электромеханическая постоянная электрифицированного агрегата, равная

$$B = \frac{GD^2 R_a}{375 k_1 k_2}. \quad (81)$$

Далее:

$$\gamma = e^{-T \cdot \ln \frac{\alpha n_0}{\alpha n_0 - \Delta n_s}} \cdot \frac{B - T}{B \cdot T}.$$

Аналогичным образом можно получить выражение для тока двигателя:

$$I_d = \frac{\alpha \cdot U_N}{R_a} \cdot \frac{B}{B - T} (e^{-t/T} - \gamma \cdot e^{-t/B}) + I_s, \quad (103)$$

где I_s — ток двигателя, соответствующий статическому моменту M_m .

Приведенные равенства показывают, что протекание переходных процессов в системе Леонарда зависит не только от электромеханической постоянной электрифицированного агрегата B , но и от электромагнитной постоянной обмотки возбуждения генератора T . В зависимости от мощности привода постоянные B и T могут варьировать в широких пределах. Для мощных реверсивных прокатных станков в несколько тысяч киловатт $T = 2 \div 4$ сек. $B = 0,03 \div 0,05$ сек. В приводах мощностью в несколько киловатт $T = 0,1 \div 0,3$ сек., $B = 0,1 \div 0,5$ сек.

В мощных приводах величина B мало влияет на характер разгона. Быстрота его в основном определяется электромагнитной постоянной обмотки возбуждения T . Если в этом случае мы пренебрежем величиной B по сравнению с T , то после небольших преобразований получим из (102) время пуска привода вхолостую

$$t_p \cong T \cdot \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1}. \quad (104)$$

Равенство показывает, насколько существенен для времени разгона коэффициент форсировки тока возбуждения α . Так как после достижения

величиной α значения 3—4 время пуска уже сокращается мало, то ормально в системе Леонарда коэффициент форсировки принимают равным 3—4.

Число оборотов двигателя в минуту в системе Леонарда при рекуперативном торможении вхолостую изменяется по равенству:

$$n = -(zn_0 + \Delta n_s) + \frac{[1 + \alpha] \cdot n_0}{T - B} (T \cdot e^{-t/T} - B \cdot e^{-t/B}). \quad (105)$$

Время торможения t_t может быть найдено подстановкой в (105) значения $n = 0$.

63. Пусковые и тормозные механические процессы короткозамкнутых асинхронных двигателей

Аналитическое решение уравнений движения привода с этими двигателями оказывается простым лишь при использовании упрощенного уравнения Клосса при холостом ходе, т. е. при $M_m = 0$. Уравнение движения в этом случае получает вид:

$$M_d - M_m = M_d = \frac{2V_{\max}}{\frac{\sigma}{\sigma_m} + \frac{\sigma_m}{\sigma}} \cong \frac{GD^2}{375} \cdot n_0 \cdot \frac{d\sigma}{dt}, \quad (106)$$

откуда

$$dt = -\frac{GD^2}{2 \cdot 375} \cdot \frac{n_0}{M_{\max}} \left(\frac{\sigma}{\sigma_m} + \frac{\sigma_m}{\sigma} \right) d\sigma. \quad (107)$$

Интегрируя равенство в пределах от $\sigma_2 = 1$ до $\sigma_1 = \sigma_0$, получаем время пуска привода вхолостую:

$$t_{p0} = \frac{Q}{2} \left(\frac{1}{2\sigma_m^2} + \ln \frac{1}{\sigma_0} \right). \quad (108)$$

В этой формуле Q — опрокидывающая электромеханическая постоянная агрегата, равная

$$Q = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_0 \cdot \sigma_m}{M_{\max}} = B \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_N} \cdot \frac{M_N}{M_{\max}}. \quad (109)$$

Теоретически здесь так же, как и при экспоненциальных функциях, время пуска при $\sigma_0 = 0$ получается равным бесконечности. Поэтому для второго члена в скобках (108) вместо σ_0 в практических решениях задачи нужно брать величину 0,05.

Время пуска вхолостую при этом выразится формулой:

$$t_{p0} = \frac{Q}{2} \left(\frac{1}{2\sigma_m^2} + \ln \frac{1}{0,05} \right). \quad (110)$$

Отличие выражения постоянной Q от таковой (B) в приводах с шунтовой характеристикой вызвано криволинейностью механической характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя. В шунтовом двигателе коэффициент $\frac{\sigma_m}{\sigma_N} \cdot \frac{M_N}{M_{\max}} = 1$.

На рис. 91 показано, как зависит время пуска вхолостую короткозамкнутого двигателя от величины максимального скольжения. По оси абсцисс отложено время в относительных единицах $\tau = \frac{t}{Q}$. Интегрируя равенство (107) в пределах от $\sigma = 2$ (скольжения при вращении против поля с синхронной скоростью) и $\sigma = 1$ (покой), получаем время торможения при противовключении:

$$t_2 = \frac{Q}{2} \left(\frac{3}{2\sigma_m} + \ln 2 \right). \quad (111)$$

Аналитическое решение уравнений при $M_m = \text{const}$ и полном уравнении Клосса оказывается весьма сложным, и мы его здесь не приводим.

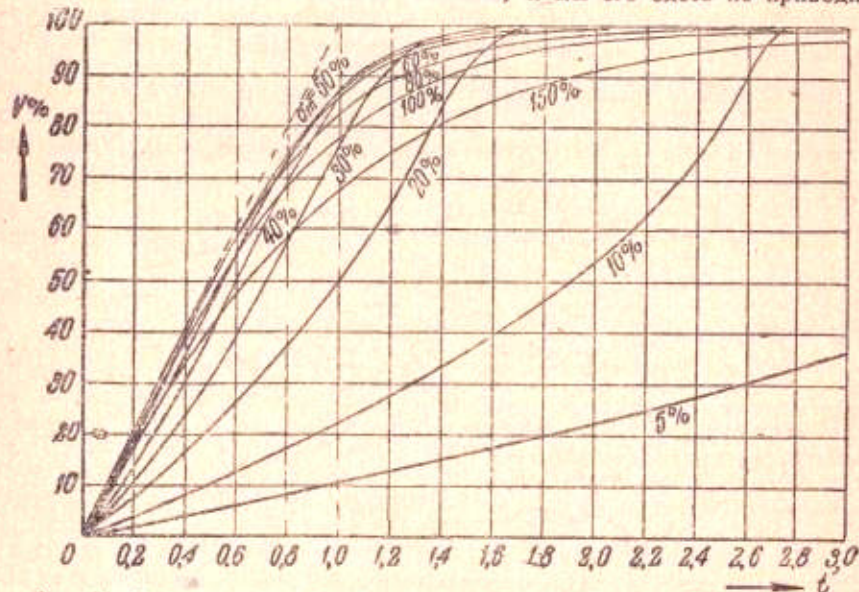


Рис. 91. Зависимость скорости асинхронного двигателя от времени при различных значениях опрокидывающего скольжения σ_m .

Практически при пуске и торможении под нагрузкой короткозамкнутого двигателя целесообразней анализировать переходные процессы, независимо от характера статического момента, по участкам, приближенным графо-аналитическим методом, изложенным в п. 59.

Глава IX

Выбор мощности электродвигателей

64. Факторы, определяющие номинальную и перегрузочную мощность электродвигателей

Правильный выбор мощности двигателей в приводе имеет исключительно важное значение. Недостаточная мощность двигателя не обеспечивает производства и ведет к авариям. Чрезмерная мощность двигателя

повышает стоимость установки, ведет к большим ее габаритам, увеличивает потери электрической энергии за счет снижения к. п. д., а в асинхронных двигателях, кроме того, снижает $\cos \phi$, величина которого непосредственно отзывается на стоимости электрической энергии.

В электродвигателях различают три характерные мощности:

1) Номинальную продолжительную мощность. Это та мощность, которую машина может отдавать в течение произвольно долгого времени, не перегреваясь. Эта мощность, указываемая на щитке машины, ограничена нагревом изолирующих материалов, получающимся в результате потерь в машине при превращении одного вида энергии в другой.

2) Мгновенную перегрузочную мощность, которую машина может отдавать в течение очень небольших промежутков времени, измеряемых секундами, с нагретого состояния без последующего нарушения нормальных условий работы. Эта мощность зависит от электромагнитных свойств электродвигателей и их механической конструкции.

3) Кратковременную перегрузочную мощность, которую двигатель может развивать с холодного состояния в течение вполне определенного промежутка времени (15, 30, 60 мин.). В машинах, предназначенных для кратковременной работы, этот промежуток времени фиксируется на щитке машины рядом с цифрой величины кратковременной мощности. Эта мощность зависит как от условий нагрева машины, ее электромагнитных свойств, так и от механической конструкции.

Соотношение между указанными тремя мощностями для данного габарита двигателя зависит от электромагнитных свойств, примененного в машине сорта изоляции и механической конструкции двигателя.

Выбор мощности (габарита) электродвигателя в приводе практически в подавляющем числе случаев производится по нагреву, а затем в приводах с колеблющейся и пиковой нагрузкой проверяется на возможную мгновенную перегрузку. Кроме того, все двигатели проверяются на достаточность пускового момента для развертывания рабочего агрегата.

65. Нагревание электродвигателей

Основным фактором, определяющим допустимые условия работы того или другого двигателя в отношении нагрузки и степени его использования, является нагрев изоляции. При работе двигателя в нем непрерывно выделяется тепло. Это тепло является результатом неизбежных потерь, которые получаются при преобразовании электрической энергии в механическую (потери в железе на намагничивании, потери в меди, потери на трение в подшипниках и о воздух). После пуска машины в ход с холодного состояния, т. е. с такого, при котором машина имеет температуру окружающей среды, температура машины начинает постепенно повышаться. Устанавливается температура двигателя лишь тогда, когда количество тепла, выделяемое в машине за единицу времени, будет равно тому количеству тепла, которое излучается машиной в окружающую среду за тот же период времени.

Тепловые процессы, происходящие в электродвигателе, очень сложны, вследствие его неоднородности и изменения направления передачи те-

пловых потоков в разное время (от меди к железу, от железа к меди и т. д.). При изучении теплового процесса электрической машины отдельные ее части в целях упрощения приходится принимать за однородное тело.

Обозначим через Q количество тепла, которое выделяется в двигателе за единицу времени. Очевидно, что оно равно сумме потерь в машине или

$$Q = 0,24 \left(\frac{P_1}{\eta_1} - P_1 \right),$$

где P_1 — полезная мощность двигателя при рассматриваемой нагрузке в киловаттах, η_1 — коэффициент полезного действия двигателя при нагрузке P_1 , а 0,24 — переводный множитель из киловатт в большие калории.

Далее обозначим через C теплоемкость машины, т. е. количество тепла, которое необходимо сообщить машине для того, чтобы повысить ее температуру на 1°C , через A — теплоотдачу машины, т. е. количество тепла, которое отдается машиной в окружающую среду в 1 секунду на 1° разности температур между окружающей средой и машиной, через ϑ — превышение температуры машины над окружающей средой.

Дифференциальное уравнение нагрева машины при неизменной нагрузке (неизменных потерях Q) имеет вид:

$$Q \cdot dt = A \cdot \vartheta \cdot dt + C \cdot d\vartheta.$$

Оно означает, что количество тепла, выделенное в машине за элемент времени dt , равно количеству тепла, которое частично отдано машиной в окружающую среду ($A \cdot \vartheta \cdot dt$) и частично пошло на повышение температуры самой машины ($C \cdot d\vartheta$). Решая это уравнение, имеем:

$$(Q - A \cdot \vartheta) \cdot dt = C \cdot d\vartheta$$

$$dt = \frac{C \cdot d\vartheta}{Q - A \cdot \vartheta}.$$

Интегрируя получаем:

$$t - t_0 = -\frac{C}{A} \cdot \ln(Q - A \cdot \vartheta),$$

где t_0 — подинтегральная постоянная, определяемая из начальных условий. При $t = 0$ превышение температуры в общем случае $\vartheta = \vartheta_0$.

Очевидно, что

$$t_0 = \frac{C}{A} \ln(Q - A \vartheta_0),$$

следовательно

$$t = \frac{C}{A} \cdot \ln \frac{Q - A \cdot \vartheta_0}{Q - A \cdot \vartheta}$$

или

$$\frac{Q - A \cdot \vartheta_0}{Q - A \cdot \vartheta} = e^{\frac{A}{C} \cdot t},$$

где e — основание натуральных логарифмов. Производя дальнейшие преобразования, получаем для закона изменения превышения температуры двигателя экспоненциальную логарифмическую кривую:

$$\vartheta = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-t/C/A} \right) + \vartheta_0 \cdot e^{-t/C/A}.$$

Если в начале работы двигателя температура его равнялась температуре окружающей среды, то $\vartheta_0 = 0$. При этом уравнение нагрева упрощается и получает вид:

$$\vartheta = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-t/C/A} \right).$$

Экспоненциальная кривая нагрева представлена на рис. 91а.

Из последнего равенства видно, что теоретически превышение температуры двигателя достигает конечного значения, равного $\vartheta_{\max} = \frac{Q}{A}$,

через бесконечно долгое время. Однако практически температуру можно считать установившейся по истечении промежутка времени $t = (4 \div 5) \frac{C}{A}$.

В двигателях открытых малой мощности и в двигателях с искусственной вентиляцией конечная температура достигается практически через 2—3 часа. В двигателях открытых средней и большой мощности и закрытых равновесное состояние устанавливается через 4—8 час., а иногда и более.

Величина $\frac{C}{A}$, представляющая отношение теплоемкости к теплоотдаче, для каждого двигателя при малом изменении скорости его вращения есть величина постоянная и от нагрузки машины не зависит. Физически она представляет то время, в течение которого двигатель достиг бы максимального допустимого превышения температуры ϑ_{\max} , если бы не было отдачи тепла в окружающую среду. Для того, чтобы машина нагрелась от $\vartheta = 0$ до $\vartheta = \vartheta_{\max}$ при отсутствии излучения в окружающую среду, она должна получить количество тепла, равное $C \cdot \vartheta_{\max}$. Обозначим эту величину через θ . Очевидно, что

$$\theta = \frac{C}{A} = \frac{C \cdot \vartheta_{\max}}{A \cdot \vartheta_{\max}} = \frac{C \cdot \vartheta_{\max}}{Q};$$

Q представляет количество тепла, которое выделяется в машине в 1 сек. и, при отсутствии излучения, всецело идет на ее нагрев. θ имеет размерность времени. Численно θ представляет то время, в течение которого

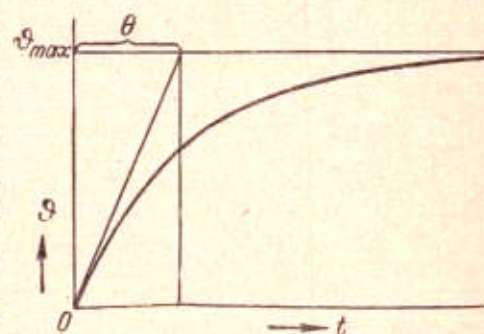


Рис. 91а. Кривая нагрева электродвигателя при длительной неизменной нагрузке.

машина, при излучении тепла в окружающую среду, достигает превышения температуры, равной $0,632 \vartheta_{\max}$. При $t = \theta$

$$\vartheta = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}} \right) = \frac{Q}{A} \left(1 - \frac{1}{e} \right) = 0,632 \vartheta_{\max}.$$

Графически постоянная времени нагрева находится, как отрезок асимптоты, между осью ординат и касательной к кривой нагрева в начале координат (рис. 91а).

Постоянную нагрева можно считать за величину неизменную лишь при работе машины с мало меняющейся скоростью. Теплоотдача непод-

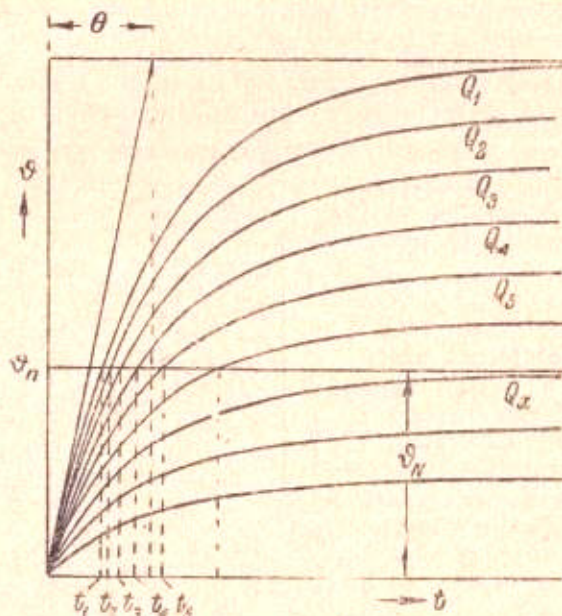


Рис. 91а. Семейство экспоненциальных кривых нагрева электродвигателя при различных длительных нагрузках.

вижной машины (во время ее остановки) и в периоды пуска и торможения меньше, чем при вращении. Обычно считают, что постоянная времени для покоя

$$\theta_0 = (1,2 \div 1,4) \theta.$$

Рассмотрим рост температуры двигателя при разных режимах длительной неизменной нагрузки, т. е. при нагрузках $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ и соответствующих им потерях $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$. Построение кривых нагрева для разных неизменных нагрузок дает семейство экспоненциальных (логарифмических) кривых с одной и той же постоянной времени нагрева $\theta = C/A$. Это семейство представлено на рис. 91б.

Очевидно, что допустимые для двигателя длительные потери Q_x мы получим, переводя горизонтальную прямую, отстоящую от оси абсцисс

(рис. 91б) на расстоянии $\vartheta_{\max} = \vartheta_N$, где ϑ_{\max} — максимальное допустимое превышение температуры для примененной в машине изоляции. При длительных потерях $Q_x^i < Q_x$, т. е. при $p < p_x$, двигатель будет недогружен, при $Q > Q_x$, т. е. при $p > p_x$, машина в тепловом отношении будет перегружена. При $p > p_x$ она может работать лишь ограниченный промежуток времени, например промежуток t_4 при потерях Q_4 и притом если нагрузка начата с холодного состояния машины. В противном случае при длительности $t = t_4$ и при потерях Q_4 машина уже перегружается. При переменной нагрузке температура двигателя меняется непре-

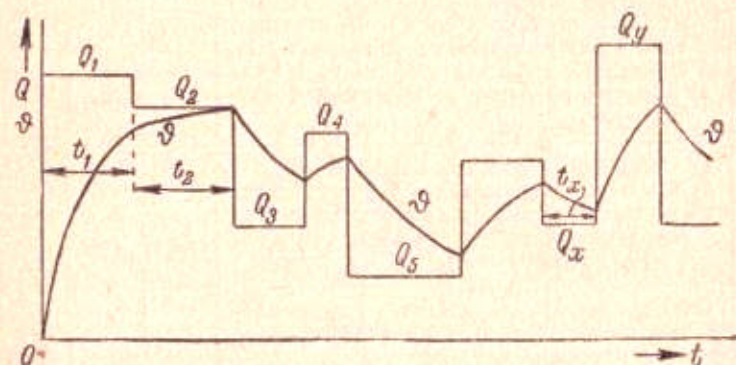


Рис. 91б. Изменение температуры электродвигателя при переменной нагрузке.

рывно по экспоненциальным кривым. Пример такого изменения для некоторого графика нагрузки, состоящего из прямоугольников, представлен на рис. 91в.

Для нормальной безаварийной эксплуатации машины ее температура ни в один момент времени не должна превосходить некоторого максимума, допустимого для переменного в машине рода изолирующих материалов.

66. Предельные допускаемые превышения температуры частей двигателя

Предельные допускаемые в двигателях превышения температуры частей двигателя над окружающей средой, при предельной установленной ГОСТ 183-41 температуре окружающей среды в 35°C , зависят от рода примененной в двигателях изоляции. Ввиду трудности определенных указаний для разных типов и разных конструкций электродвигателей, ни ГОСТ 183-41, ни иностранные нормы никакого повышения мощности при снижении температуры окружающей среды ниже 35° не предусматривают. Согласно ГОСТ 183-41, применяемая в электрических машинах изоляция делится на пять классов: А, В, ВС, СВ и С.

Класс изоляции А: хлопок, шелк, бумага и тому подобные органические материалы, пропитанные либо погруженные в масло, а также состав, называемый эмалью и применяемый при изготовлении эмалированной проволоки.

(выдержка из ГОСТ 183-41)

Таблица 17

№№ по пор.	Части машин	Изоляция класса А		Изоляция класса В	
		метод термометра	метод сопротивления	метод термометра	метод сопротивления
1	а) Обмотки машины переменного тока с мощностью меньше 5000 ква. б) Обмотки возбуждения (многослойные) машины постоянного тока и переменного тока с возбуждением постоянным током, кроме п. 2 и 3. в) Якорные обмотки, соединенные с коллектором.	60° С	65° С	75° С	85° С
2	а) Однорядные обмотки возбуждения. б) Обмотки возбуждения турбогенераторов и стержневые обмотки роторов асинхронных машин при числе стержней в пазу не более двух.	70° С	70° С	95° С	95° С
		—	70° С	—	95° С
3	Обмотки возбуждения малого сопротивления, имеющие один или несколько слоев и компенсационные обмотки.	65° С	65° С	85° С	85° С
4	Изолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя.	65° С	—	85° С	—
5	Неизолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя.	Превышение температур этих частей ни в коем случае не должно достигать величины, которая создавала бы риск повреждения изолирующих или других смежных материалов			
6	Железные сердечники и другие части, не соприкасающиеся с обмотками.				
7	Железные сердечники и другие части, соприкасающиеся с обмотками.	65° С, если изоляция обмоток принадлежит к классу А 65° С, если изоляция обмоток принадлежит к классу В			
8	Контактные кольца как защищенные, так и не защищенные.	70° С	—	90° С	—
9	Коллекторы (класс изоляции относится к обмотке, соединенной с коллектором).	65° С	—	85° С	—
10	Подшипники скольжения.	45° С	—	45° С	—
11	Подшипники качения.	60° С	—	60° С	—

Класс изоляции В: изделия из слюды и асбеста, содержащие вяжущие вещества.

Класс изоляции ВС: изделия из слюды, стеклянной пряжи и асбеста на термостойких лаках.

Класс изоляции СВ: изделия из слюды, стеклянной пряжи и асбеста на термостойких лаках без применения изолирующих материалов класса А.

Класс изоляции С: слюда и стеклянная пряжа без вяжущих веществ, фарфор, кварц и другие подобные материалы.

Пределы допустимых превышений температур частей машины на температуру окружающей среды, установленные ГОСТ 183-41, даны ниже для изоляции класса А и В в табл. 17. Для изолирующих материалов класса С пределы для превышения температуры не установлены. Применение для обмоток изоляции из хлопка, шелка и бумаги и других подобных материалов без пропитки или погружения в масло не рекомендуется; в тех случаях, когда изоляция выполнена этим способом, пределы допускаемых превышений температур, указанные в табл. 17, должны быть снижены на 15°.

Для обмоток, изолированных материалами класса ВС, и прикасающихся с ними железных сердечников и других частей пределы допускаемых превышений температур устанавливаются на 15° больше пределов, указанных в табл. 27 для материалов класса В.

Для обмоток, изолированных материалами СВ, пределы допускаемых превышений температур повышаются по сравнению с указанными в табл. 17 для материалов класса В соответственно повышению термостойкости лаков, примененных при изготовлении изоляции класса СВ.

67. Значения мгновенных перегрузочных мощностей электродвигателей

Мгновенно допустимые перегрузки электродвигателей характеризуются отношением максимального мгновенно допустимого вращающего момента M_{\max} или тока I_{\max} , соответственно к номинальному моменту M_N или току I_N . Коэффициент мгновенной перегрузки по моменту

$$\lambda_M = \frac{M_{\max}}{M_N}, \text{ или } \lambda_{M\%} = \frac{M_{\max}}{M_N} \cdot 100\% = \nu_{\max\%}$$

Перегрузка по току

$$\lambda_I = \frac{I_{\max}}{I_N} \text{ или } \lambda_{I\%} = \frac{I_{\max}}{I_N} \cdot 100\% = i_{\psi\%}$$

В большинстве электрических двигателей (кроме шунтового) перегрузка по току не равна перегрузке по моменту. В серийных и компаундных двигателях постоянного тока $\lambda_M > \lambda_I$. Мгновенная электромагнитная перегрузочная способность разных типов электродвигателей зависит от различных факторов.

Перегрузка двигателей постоянного тока определяется условиями коммутации. В асинхронных и синхронных двигателях перегрузка определяется их опрокидывающим электромагнитным моментом, по достижении которого эти типы двигателей останавливаются. Перегрузка коллек-

торных двигателей переменного тока зависит как от условий коммутации, так и электромагнитных свойств. Нормально значения мгновенных перегрузочных мощностей двигателей различных типов даны в табл. 18.

Таблица 18

Нормальные значения коэффициента мгновенной перегрузки по моменту

Тип двигателя	Значения λ_M
1. Двигатели постоянного тока	Нормально 2, в специальных типах двигателей до 3—4
2. Асинхронные двигатели с кольцами	2—2,5
3. Обыкновенные короткозамкнутые двигатели	1,8—2
4. Короткозамкнутые двигатели с повышенным скольжением	2—3
5. Двигатели Бушера и с глубоким пазом	1,8—2,7
6. Синхронные двигатели	Нормально 2, в специальных типах 3,5—4
7. Коллекторные двигатели переменного тока	2—2,5

68. Общие основы выбора мощности двигателя и выбор мощности двигателя при продолжительной неизменной нагрузке

Выбор мощности двигателя в самом общем случае может быть сделан лишь после решения уравнения движения электропривода, на основании условий его нагрева и мгновенных перегрузок. Однако само решение уравнения движения привода требует знания параметров двигателя — его механической характеристики $M_d = f(n)$ и величины его махового момента. Поэтому при расчете электроприводов, мощностью (габаритом) и конструктивным типом двигателя приходится предварительно задаваться, пользуясь каталогами на основании ориентировочных подсчетов по статическим моментам рабочей машины или на основании данных аналогичных существующих установок. С намеченным таким образом двигателем производятся детальные подсчеты по динамике привода. В результате получается необходимая по нагреву для данного механизма мощность электродвигателя P_2 . Полученная мощность проверяется на мгновенную перегрузку в рабочих режимах и на достаточность пускового момента. Иногда для удовлетворения этим условиям мощность двигателя приходится повышать по сравнению с той, которая определяется нагревом. Если эта мощность P_2 совпадает с предварительно выбранной мощностью P_1 , то расчет закончен. Если же $P_2 \geq P_1$, то решение уравнений движения привода должно быть проделано вновь, и так до совпадения с предварительно выбранной мощностью. Обычно второй подсчет приводит уже к окончательным результатам. Наиболее просто решается вопрос для двигателей, предназначенных для продолжительного режима работы при неизменной или мало меняющейся нагрузке.

Если мы подсчитаем потребную для вращения рабочей машины мощность двигателя, то двигатель этой мощности и должен быть принят для данного привода. Решение уравнений движения привода в этом случае не требуется. Необходима лишь проверка двигателя на пусковой момент.

Так, для простейшего случая привода насоса мощность двигателя в киловаттах

$$P = \frac{Q \cdot \delta \cdot H}{102 \cdot \eta_{нас} \cdot \eta_{пер}}, \quad (112)$$

где Q — количество нагнетаемой жидкости в $м^3/сек$, δ — удельный вес жидкости в $кг/м^3$, H — полная высота подачи в метрах, равная $H_1 + H_2 + H_3$, где H_1 — высота всасывания, H_2 — высота нагнетания, H_3 — напор с учетом сопротивления труб и вентилей. Так как указываемая на щитке двигателя мощность представляет его полезную мощность, то в формулу (112) к. п. д. двигателя не входит.

Приведенный пример является простейшим. Во многих случаях для подсчета статической мощности двигателя при продолжительной нагрузке приходится прибегать к более сложным расчетам или к эмпирическим формулам, основанным на результатах большого числа исследований.

69. Выбор мощности двигателя по нагреву при любой нагрузке методом эквивалентного тока

Огромное число рабочих машин имеет совершенно периодический регулярный или нерегулярный график нагрузки. В течение одного рабочего периода — так называемого цикла t_2 — мощность двигателя меняется по какому-то определенному закону, далее непрерывно повторяющемуся. Так, на рис. 92 представлен график работы привода ткацкого станка для одного цикла. На рис. 93 — график работы в течение одного цикла электропривода ножниц для резки железа.

Мощность, которую можно взять от данного габарита двигателя при переменной нагрузке, определяется его нагревом. Нагрев же в основном зависит от Джоулевых потерь в медных обмотках двигателя. Эти потери пропорциональны квадрату силы тока, полезная же мощность двигателя приближенно пропорциональна первой степени тока ($P = UI$). Поэтому выбор мощности двигателя для переменного режима работы по средней мощности нагрузки производить нельзя. Необходимая для подобных приводов мощность двигателя превышает среднюю обычно в 1,2—1,3 раза, а при резко пиковых нагрузках даже в 1,8—2 раза.

При переменном режиме работы выбор мощности двигателя производится по методу эквивалентного тока.

Положим, что в течение каждого цикла рабочей машины мы имеем изменение тока двигателя по графику рис. 94. Закон этого графика определяется в результате решения уравнения движения привода. В выбранной машине определенной продолжительной мощности медные потери при переменном режиме работы должны быть одинаковыми с таковыми при продолжительном режиме работы с током I_N . В таком случае

$$I_N^2 \cdot R \cdot t_2 = I_N^2 \cdot R (t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n) = I_1^2 \cdot R \cdot t_1 + I_2^2 \cdot R \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot R \cdot t_n, \quad (113)$$

где t_2 — длительность цикла, R — сопротивление обмотки, в которой выделяются потери. В машинах постоянного тока обычно считают

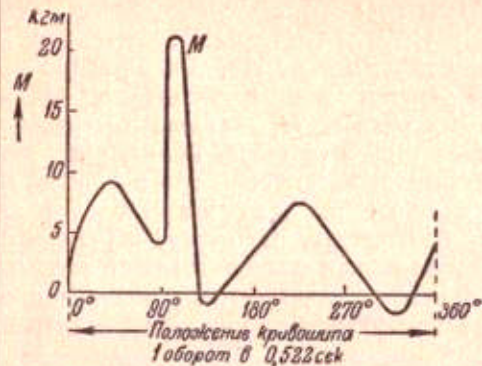


Рис. 92. График момента привода ткацкого станка за один цикл.

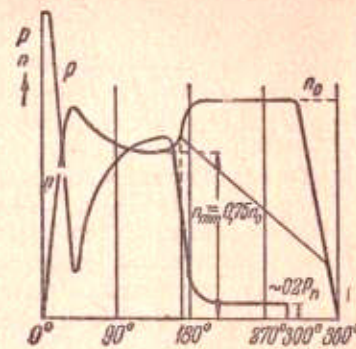


Рис. 93. График скорости и мощности привода ножиц за один цикл.

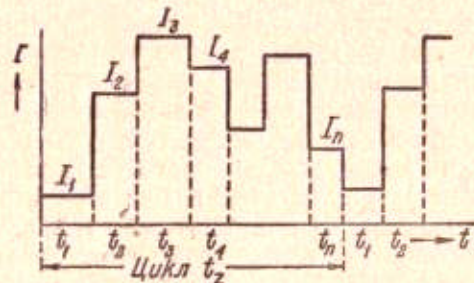


Рис. 94. График тока привода для некоторой рабочей машины.

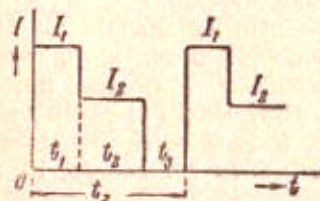


Рис 95. График переменной нагрузки.

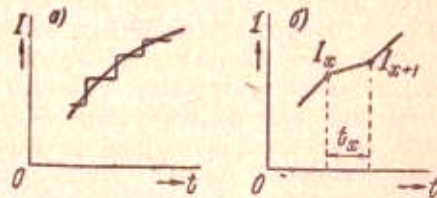


Рис. 96. Разбивка криволинейного графика на прямолинейные участки.

для обмотки якоря, в синхронных машинах для обмотки статора, в асинхронных двигателях должны быть учтены потери или в обмотке статора или в обмотке ротора. Отсюда следует, что номинальный—в данном случае эквивалентный (I_N) по нагреву двигателя ток

$$I_N = I_s = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (114)$$

При любом, но одинаковом для каждого цикла t_x изменении тока $I = f(t)$

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{t_x} \int_0^{t_x} I^2 \cdot dt} \quad (115)$$

В знаменатель подкоренного количества (114) должны входить и времена пауз и остановки, так как двигатель за это время охлаждается. Так, для графика рис. 95

$$I_s = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2}{t_1 + t_2 + t_3}}$$

Величина I_s при сложной форме кривой тока, например полученной осциллографом, может быть определена специальным механическим интегратором Амслера. При отсутствии такового график $I = f(t)$ может быть разбит на ряд прямолинейных участков (рис. 96). Для каждого участка, длительностью t_x с начальным значением тока I_x и конечным I_{x+1} , соответствующий данному участку член числителя подкоренного количества (114) может быть определен по приближенной, но достаточно точной для практических целей формуле:

$$\left[I_x \cdot I_{x+1} + \frac{(I_{x+1} - I_x)^2}{3} \right] \cdot t_x.$$

Полученное по формуле (114) или (115) значение номинального (эквивалентного) тока I_N двигателя должно быть проверено на мгновенную нагрузку. Если максимальный ток графика за цикл I_{max} , то

$$\frac{I_{max}}{I_N} \leq \lambda_I,$$

где λ_I — перегрузка данного двигателя по току.

Если при расчете окажется, что $\frac{I_{max}}{I_N} > \lambda_I$, то мощность двигателя должна быть повышена так, чтобы $\frac{I_{max}}{I_N} \leq \lambda_I$. Далее двигатель должен быть проверен на достаточность пускового момента.

Если в цикл работы (рис. 97) с общей продолжительностью t_2 входит пуск продолжительностью t_p и меняющимся током I_{px} , работа при переменной нагрузке длительностью t_1 и меняющимся током I_{1x} , торможение электрическое длительностью t_t и меняющимся током I_{tx}

и остановка длительностью t_0 , то эквивалентный ток двигателя за цикл определяется по формуле:

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_p} I_{\text{рх}}^2 dt + \int_{t_p}^{t_p+t_1} I_{\text{лх}}^2 dt + \int_{t_p+t_1}^{t_p+t_1+t_t} I_{\text{тх}}^2 dt}{t_p + t_1 + t_t + t_0}} \quad (116)$$

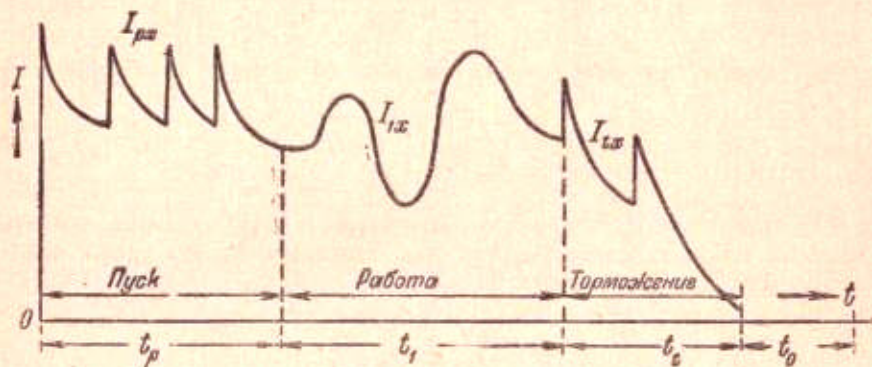


Рис. 97. Цикл работы некоторого привода.

70. Метод выбора мощности двигателя по средним потерям

Метод эквивалентного тока не учитывает влияния изменений так называемых «постоянных» потерь в электродвигателе, т. е. потерь в железе и на трение. В наиболее ответственных случаях должно быть

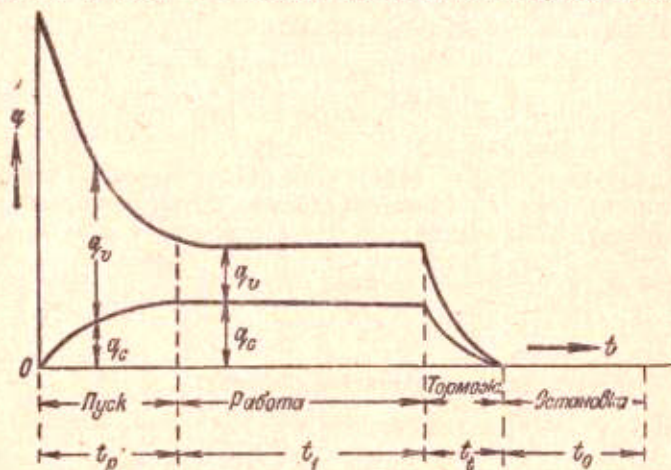


Рис. 98. Применение метода средних потерь.

учтено также и изменение этих потерь. В этом случае, на основании нагрузочных диаграмм переходных режимов и на основании графиков изменения переменных (медных) и постоянных потерь в двигателе строят

кривую изменения потерь в двигателе q_x (рис. 98) для одного цикла продолжительностью t_x :

$$q_x = q_c + q_v = f(t),$$

где q_c — постоянные потери, а q_v — переменные. Понятно, что этот метод может дать тогда необходимый результат, если при подсчете используются вполне надежные заводские данные об изменении потерь в двигателе q_c и $q_v = f(I)$.

Имея график потерь, можно определить среднее значение потерь двигателя за цикл. Положим, что в цикл работы общей продолжительностью t_x входит пуск длительностью t_p , работа при переменной нагрузке длительностью t_1 , торможение длительностью t_t и остановка длительностью t_0 ; средние потери в двигателе за цикл будут:

$$q_m = \frac{\sum_0^{t_p} q_x \cdot \Delta t_x + \sum_{t_p}^{t_p+t_1} q_x \cdot \Delta t_x + \sum_{t_p+t_1}^{t_p+t_1+t_t} q_x \cdot \Delta t_x}{\alpha(t_p + t_t) + t_1 + \beta \cdot t_0} \quad (117)$$

Числитель в (117) дает энергию, потерянную в двигателе за цикл t_x . Коэффициенты α и β учитывают ухудшение охлаждения двигателя в период пуска, торможения и покоя. Ориентировочно для открытых двигателей постоянного тока с самовентиляцией $\alpha = 0,75$, $\beta = 0,5$. Для асинхронных двигателей $\alpha = 0,5$, $\beta = 0,25$. Точные величины коэффициентов α и β могут быть даны лишь электромашиностроительным заводом.

Полученное значение средних потерь двигателя за цикл должно быть равно номинальным потерям в выбираемом двигателе при номинальной нагрузке

$$q_N = \frac{P_N}{\eta_N} - P_N,$$

где η_N — к. п. д. при той же нагрузке

$$q_m \leq q_N.$$

Если $q_m < q_N$ или если $q_m > q_N$, то необходимо взять следующий больший или меньший габарит двигателя, и расчет должен быть сделан вновь до примерного совпадения величин q_m и q_N .

71. Методы эквивалентного момента и мощности

Во всех двигателях, в которых магнитный поток постоянен (практически это относится к шунтовому двигателю постоянного тока и синхронному), момент двигателя $M = c \cdot \Phi \cdot I = c' \cdot I$. При этом в выражении (114) вместо токов могут быть введены соответствующие им моменты двигателя. Получаем формулу для эквивалентного момента

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (118)$$

Вместо формулы (115) получаем:

$$M_s = \sqrt{\int_0^{t_s} \frac{M_d^2 \cdot dt}{t_s}}$$

Полученный таким образом M_s должен быть проверен на перегрузку по равенству $\frac{M_{\max}}{M_N} \leq \lambda_M$ и на пусковой момент. Номинальный момент двигателя $M_N \geq M_s$. Требуемая для данной рабочей машины номинальная мощность двигателя

$$P_N = M_N \cdot \omega_N = M_N \cdot \frac{2\pi n_N}{60}$$

Для серийных и компаундных двигателей постоянного тока, а также для пусковых и тормозных режимов короткозамкнутых асинхронных

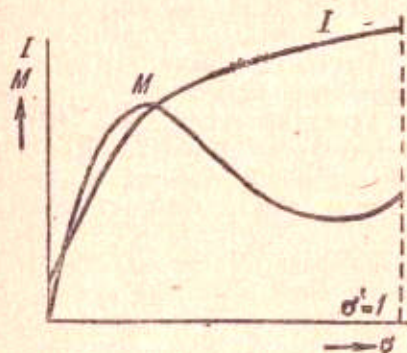


Рис. 99. Зависимость момента и тока от скольжения в асинхронных двигателях.

двигателей метод эквивалентного момента неприменим из-за нарушения в них пропорциональности между моментом и током (рис. 99). Для рабочих режимов асинхронных двигателей высокого $\cos \phi$ до $\sigma < \sigma_m$ метод эквивалентного момента может быть использован.

В тех случаях, когда при работе скорость привода меняется мало или совсем не меняется (шунтовые двигатели постоянного тока или синхронные), формула эквивалентного момента (118) умножением на ω_N может быть преобразована в формулу для эквивалентной мощности:

$$P_s = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (119)$$

Найдя P_s и выбрав P_N , проверяют двигатель на перегрузку по равенству $\frac{P_{\max}}{P_N} < \lambda_P$ и на достаточность пусковой мощности. Методом эквивалентной мощности можно пользоваться лишь тогда, когда в рассматриваемый период не входят пусковые режимы. В противном случае нужно внесение некоторых поправок.

72. Выбор мощности двигателя при кратковременной работе

Двигатели для такого режима работы должны выбираться по особым каталогам двигателей кратковременной мощности. Методика выбора сводится к следующему. Согласно некоторому рассчитанному по уравнению движения привода графику кратковременной работы

(рис. 100) длительностью $t_k = t_1 + t_2 + t_3$ применяют метод эквивалентного тока или момента. Для графика рис. 100:

$$M_s = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + M_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} \quad (120)$$

Для привода выбирается двигатель с $M_N \geq M_s$, предназначенный для кратковременной работы длительностью t_k . Двигатель должен быть проверен на перегрузку по равенству:

$$\frac{M_{\max}}{M_N} \leq \lambda_M$$

73. Выбор мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме работы

Идеальный график такого режима работы (п. 42) представлен на рис. 101. Отношение

$$\zeta = \frac{a}{a+b} = \frac{a}{t_s}$$

носит название продолжительности включения или работы. В практике проектных организаций СССР эту величину часто сокра-

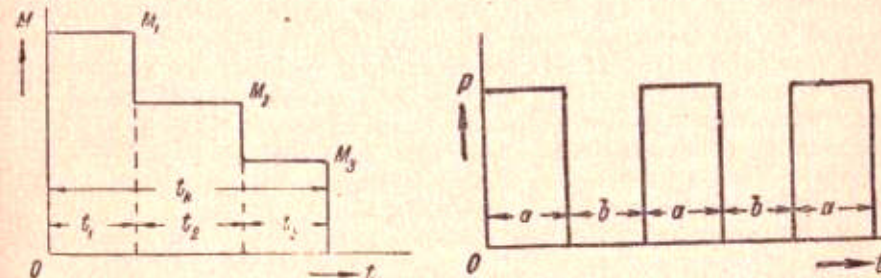


Рис. 100. График кратковременной работы.

Рис. 101. График повторно-кратковременной работы.

тельно обозначают ПВ. Относительная продолжительность в процентах

$$\zeta^0 /_0 = \frac{a}{a+b} \cdot 100 \%$$

Двигатели для такого режима работы конструируются специально для трех стандартных продолжительностей включения $\zeta = 15\%$, 25% и 40% и должны выбираться по особым каталогам двигателей повторно-кратковременной работы. Тепловые условия работы этих двигателей сильно различаются от таковых для двигателей продолжительного режима работы, из-за особенностей охлаждения и нагревания при частых пусках и остановах. При повторно-кратковременном режиме работы от двигателя можно получить большую мощность, чем при длительном режиме работы. Один и тот же тип двигателя дает разные номинальные мощности при разных продолжительностях включения

P_{15}, P_{25}, P_{40} . Номинальная мощность, естественно, тем меньше, чем больше продолжительность включения:

$$P_{N15} > P_{N25} > P_{N40}$$

Соответственно также разнятся и номинальные токи:

$$I_{N1} > I_{N25} > I_{N40}$$

Каждому значению ζ соответствует свое номинальное число оборотов в минуту, так как у всех двигателей, кроме синхронных, которые в повторно-кратковременном режиме не работают, число оборотов в минуту снижается. Поэтому

$$n_{N15} < n_{N25} < n_{N40}$$

Это обстоятельство очень существенно в серийных и компаундных двигателях постоянного тока.

Так как мгновенные перегрузочные электромагнитные и механические свойства двигателя данного габарита неизменны, то с изменением номинальной мощности двигателя меняется его перегрузочная способность:

$$\lambda_{15} < \lambda_{25} < \lambda_{40}$$

При наиболее высокой номинальной нагрузке, т. е. при $\zeta = 15\%$, перегрузочный момент любого двигателя повторно-кратковременного режима не может быть меньше 1,6.

Согласно ГОСТ 183-41, в крановых трехфазных асинхронных короткозамкнутых двигателях при $\zeta = 25\%$ кратность начального пускового вращающего момента должна быть не ниже 1,65, а кратность минимального вращающего момента в процессе пуска не ниже 1,4. Соответственно кратности максимальных вращающих моментов крановых трехфазных асинхронных двигателей при $\zeta = 25\%$ должны быть не ниже:

а) при мощности до 8 квт включительно:

- у двигателя с контактными кольцами не ниже 2,2
- у двигателя короткозамкнутого не ниже 1,9

б) при мощности свыше 8 квт:

- у двигателя с контактными кольцами не ниже 2,75
- у двигателя короткозамкнутого не ниже 2,3

Пересчет мощности двигателя повторно-кратковременного режима от одной продолжительности включения ζ_1 к другой ζ_2 может быть произведен по формуле (121), базирующейся на условии равенства тепловых потерь за один и тот же период времени.

$$x = \sqrt{(\gamma + 1) \cdot \frac{\zeta_1}{\zeta_2} \cdot \frac{\zeta_2(\delta - 1) + 1}{\zeta_1(\delta - 1) + 1} - \gamma}; \quad (121)$$

в этой формуле $x = \frac{P_{2N}}{P_{1N}}$, где P_{2N} — номинальная мощность при ζ_2 , P_{1N} — номинальная мощность при ζ_1 . Коэффициент γ представляет отноше-

ние постоянных потерь двигателя q_{Nc} к переменным потерям его q_{eN1} при нагрузке P_{1N} . Коэффициент $\delta = \frac{1}{\beta}$ является обратной величиной величине β , характеризующей степень ухудшения отдачи тепла в неподвижном состоянии по сравнению с отдачей тепла при нормальном вращении. Значения β были приведены в п. 70. Точные значения γ могут быть получены лишь от заводов, конструирующих двигатели. Ориентировочные значения величины γ :

Для серийных двигателей постоянного тока	0,5 — 1,0
Для шунтовых двигателей постоянного тока	1,0 — 2,0
Для обыкновенных асинхронных двигателей	1,5 — 1,0
Для крановых асинхронных двигателей	0,5 — 1,5

Меньшие цифры относятся к тихоходным двигателям, большие — к быстроходным.

При небольших отклонениях ζ от нормальной продолжительности включения перерасчет мощностей от одной продолжительности к другой может быть проделан и по более простым приближенным формулам:

$$P_{15} = 1,29 \cdot P_{25} \quad (122)$$

$$P_{40} = 0,79 \cdot P_{25} \quad (123)$$

Выбор мощности двигателя для повторно-кратковременного режима работы сводится к следующему. Возьмем совершенно регулярно чередующийся график повторно-кратковременного режима типа рис. 102. Применим к периоду работы в одном цикле (без учета паузы) метод эквивалентного момента, получаем необходимый от двигателя эквивалентный момент повторно-кратковременного режима:

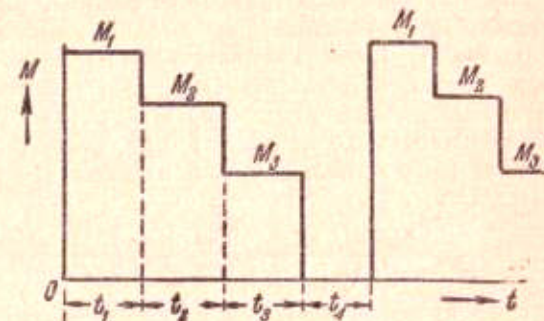


Рис. 102. Применение метода эквивалентного момента к повторно-кратковременному режиму.

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} \quad (124)$$

Далее необходимо по каталогу найти двигатель с $M_N \geq M_3$ для продолжительности включения

$$\zeta_x = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}$$

Таким образом, в определении величины M_3 величина ζ непосредственно не участвует. Причина этого заключается в том, что каталожные моменты и мощности двигателей уже отнесены к соответствующей продолжительности включения. Выбранный таким образом двигатель обязательно должен быть проверен на перегрузку и пусковой момент.

В случае переменных значений a и b за относительную продолжительность включения берут величину

$$\zeta = \frac{\sum a_x}{\sum a_x + \sum b_x}, \quad (125)$$

взятую за большой период работы. Однако величина любой суммы ($a_x + b_x$) не должна быть больше 10 мин. В противном случае двигатель должен быть взят из серии двигателей продолжительного режима.

74. Определение допустимого числа включений в час короткозамкнутых двигателей при повторно-кратковременном режиме работы

Для этой цели наиболее подходит метод средних потерь, примененный одновременно к статору и ротору. Соответствующая методика заключается в следующем. Строим нагрузочные диаграммы $I=f(t)$ и $n=\varphi(t)$ для рассматриваемого режима. Далее по этим диаграммам строим кривые изменения потерь энергии в меди статора (Q_{s1}) и ротора (Q_{r1}) для указанных условий. Если длительность пуска двигателя будет t_1 при потерях Q_{s1} и Q_{r1} , длительность работы при установленном режиме при потерях Q_{s2} и Q_{r2} соответственно будет t_2 и длительность торможения t_3 при потерях Q_{s3} и Q_{r3} , то средние потери за цикл длительностью t_z в ваттах или в киловаттах будут:

$$q_m = \frac{\sum_0^{t_1} (Q_{s1} + Q_{r1}) + \sum_{t_1}^{t_2} (Q_{s2} + Q_{r2}) + \sum_{t_2}^{t_3} (Q_{s3} + Q_{r3})}{t_z}. \quad (126)$$

При проверке двигателя на нагрев мы должны убедиться в том, что средние потери за цикл q_m должны быть равны или во всяком случае не более допустимых потерь за цикл q_d . Эти допустимые потери

$$q_d = q_N \cdot \frac{\alpha(t_1 + t_2 + t_3) + t_0}{\alpha(t_1 + t_2 + t_3)}, \quad (127)$$

где q_N — медные потери в статоре и роторе двигателя при номинальной нагрузке, t_0 — время паузы за цикл $t_z = t_1 + t_2 + t_3 + t_0$.

Коэффициент α учитывает ухудшение охлаждения двигателей во время остановки, пуска и торможения. Величина его зависит от типа и конструкции двигателя. Для грубых подсчетов можно принимать $\alpha = 3$.

Во многих случаях переходных режимов ротор перегревается сильнее статора. При этом целесообразно с запасом сделать проверку на нагрев по средним потерям ротора. Совершенно естественно, что повышение нагрева ротора будет обуславливать и повышение нагрева статора. Степень этого повышения с полной точностью может быть установлена лишь детальным исследованием двигателя или указаниями соответствующего электромашинностроительного завода. Обычно такой метод проверки по роторным потерям дает некоторый небольшой запас в мощности двигателя. При проверке по роторным потерям

$$q_{mr} = \frac{\sum_0^{t_1} Q_{r1} + \sum_{t_1}^{t_2} Q_{r2} + \sum_{t_2}^{t_3} Q_{r3}}{t_z} = q_{dr} = q_{Nr} \cdot \frac{\alpha \cdot t_p + t_0}{\alpha \cdot t_p}. \quad (128)$$

Определение средних потерь двигателя за цикл позволяет найти допустимое число включений в час z . Так как $t_z \cdot z = 3600$ сек., то, согласно предыдущему, при $t_p = t_1 + t_2 + t_3$

$$\frac{(q_m \cdot t_z) z}{3600} = q_N \cdot \frac{\alpha \cdot t_p + \frac{3600}{z} - t_p}{\alpha \cdot t_p},$$

откуда

$$z = \frac{3600}{\alpha} \cdot \frac{q_N}{q_m \cdot t_z} \left(\frac{\alpha - 1}{2} + \sqrt{\left(\frac{\alpha - 1}{2} \right)^2 + \frac{\alpha \cdot q_m \cdot t_z}{q_N \cdot t_p}} \right). \quad (129)$$

Глава X

Виды управления электродвигателем

75. Роль аппаратуры управления в электроприводе и процессы, подлежащие управлению

Аппаратура управления является вторым главнейшим звеном электропривода. Назначение аппаратуры заключается в проведении процессов включений и выключений двигателей, переключения и регулирования в их цепях, защиты двигателей от ненормальных режимов.

Основные процессы, подлежащие управлению, следующие: 1) пуск двигателя в ход; 2) остановка двигателя; 3) электрическое торможение; 4) реверсирование; 5) регулирование скорости; 6) защита двигателей и механизма от перегрузок и повреждений; 7) осуществление определенной последовательности операций; 8) сигнализация состояния системы; 9) автоматическое поддержание постоянства скорости; 10) работа по шаблону.

Наилучшим образом все эти задачи выполняются автоматическим управлением, которое в современной промышленной практике является преобладающим, а в ряде производств — единственным. В отдельных случаях, в силу характера производственного процесса (например краны, вспомогательные механизмы металлургических заводов, некоторые металлорежущие станки), применяется полуавтоматическое управление.

Автоматическое управление дает огромные преимущества и прежде всего обеспечение наиболее высокой производительности рабочих машин и высокой точности производственных операций. Автоматика устраняет или уменьшает влияние личных качеств рабочего на производительность рабочих машин и, упрощая обслуживание, уменьшает количество обслуживающего персонала. Автоматика электропривода дает простую возможность дистанционного управления мощными механизмами, в том числе и при очень большом числе пусков в час. Ручное управление электроприводами с мощностью свыше 50 квт при большом числе пусков в час становится вообще неосуществимым.

Автоматика может обеспечить строгую последовательность различного сочетания производственных операций с применением соответствующих блокировок.

Автоматическое управление приводом может производиться: 1) посредством контакторно-релейной автоматики прерывистого действия, в которой основными управляющими аппаратами являются контакторы (на большие силы тока) и реле (на малые); 2) посредством электрических машин регуляторов непрерывного действия (амплидины, рототролы, регулексы и т. п.); 3) посредством ионно-электронной автоматики также непрерывного действия, в которой управление ведется электронными лампами (на очень малые силы тока) и ионными аппаратами — на большие силы тока. В отдельных схемах применяется комбинированное контактно-релейное, электромашинное и ионно-электронное управление.

Преимуществом ионно-электронного управления является его практическая безинерционность, исключительно высокая чувствительность. Вместе с тем, в отличие от контактно-релейного, электронно-ионное управление дает возможность иметь непрерывное управление, т. е. менять тот или другой фактор, определяющий работу двигателя, непрерывно, а не скачками (как, например, при ступенчатом шунтировании сопротивлений при пуске двигателя в ход). Применение непрерывного управления ведет к увеличению производительности механизмов и повышению точности их работы. Так, при непрерывном управлении легко получить постоянное динамическое момента при пуске и торможении электроприводов.

Ионно-электронное управление обладает высокой чувствительностью, возможностью простого усиления получаемых импульсов. В самые последние годы стали применять непрерывное управление посредством электромагнитных механизмов — амплидинов, рототролей и регулексов. Опыт показывает существенные преимущества непрерывного управления. В современной промышленной практике наибольшее распространение имеет контактно-релейное управление. Применяемая в электроприводе аппаратура управления отличается исключительным разнообразием как по принципам действия, так и по конструкции.

77. Основная номенклатура аппаратуры управления

Неавтоматическая аппаратура управления охватывает рубильники (для включения), предохранители (для защиты электроприводов и механизмов), сопротивления, реостаты и контроллеры (для целей управления), универсальные выключатели, пакетные выключатели, распределительные ящики.

К автоматической аппаратуре относятся контакторы, реле управления, реле защиты, командоаппараты, путевые выключатели, тормозные электромагниты, регуляторы, усилительные и выпрямительные лампы, фотозлементы, тиратроны, игнитроны, ртутные выпрямители, неоновые лампы, электронно-лучевые трубки, селеновые и купроксные выпрямители, некоторые специальные электрические машины и т. д. Комплектные скомбинированные для управления каким-либо приводом схемы аппараты называются станциями управления. Конструктивно они осуществляются в виде панелей управления.

Неавтоматическое управление электроприводами

78. Основные операции по управлению

Основные операции по управлению сводятся к включению и выключению двигателя, для осуществления его пуска в ход или электрического торможения посредством выключения или включения сопротивлений в той или иной цепи двигателя, к регулированию скорости или переключением обмоток или изменением сопротивления.

В целях защиты двигателей от токов короткого замыкания, при недопустимых перегрузках или каких-либо аварийных случаях, в цепь двигателя вводятся плавкие предохранители, которые, перегорая, разрывают цепь двигателя и отключают последний от сети. Переключение в главных цепях двигателя (двигателей средней и большой мощности) осуществляется особыми аппаратами — так называемыми контроллерами (от слова контроль — управление). Предельные выключения двигателей (например, при достижении краном или каким-либо органом металлорежущего станка крайнего допустимого положения) производятся конечными выключателями. Для включения и выключения маленьких двигателей применяются универсальные и пакетные выключатели. При неавтоматическом управлении все переключения в цепи двигателя производятся вручную теми или иными переключающими аппаратами. В этом случае схема управления имеет лишь одну цепь — цепь главного тока двигателя.

79. Плавкие предохранители

При неавтоматическом управлении защита двигателей может быть практически осуществлена лишь плавкими предохранителями. Этот тип защиты, по существу, имеет целью защитить двигатель и сеть от токов короткого замыкания от их цепи.

От всякого другого рода мгновенных и длительных перегрузок предохранитель защитить двигатель практически не может. Основным защищающим элементом предохранителя служит плавкая вставка. Она осуществляется из легкоплавкого металла или сплава. Для безопасности обслуживающего персонала при перегорании плавкой вставки она обычно прикрывается полым цилиндром или коробкой из огнеупорного материала. Типичная

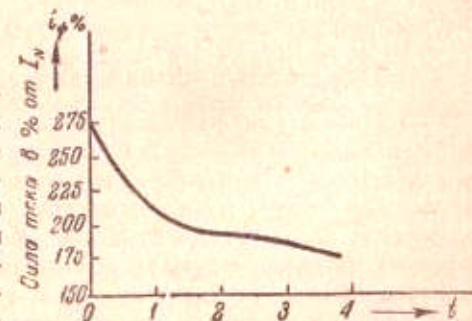


Рис. 103. Типичная характеристика плавкой вставки.

зависимость времени, по истечении которого вставка перегорает от силы проходящего через нее тока, представлена на рис. 103. Каждая вставка изготавливается для некоторой номинальной силы тока. „Правила

устройства электроустановок промышленных предприятий" (1944 г.) дают следующие указания по выбору плавких вставок (§§ 482—486):

"Плавкие вставки рекомендуется выбирать на наименьший номинальный ток, допускаемый условиями эксплуатации установки".

"Наименьшая, допустимая условиями эксплуатации, величина номинального тока требуемой вставки определяется:

- а) величиной расчетного тока сети;
- б) величиной тока перегрузки".

"Выбор производится по тому из указанных условий, которое требует вставку наибольшей величины".

"Номинальный ток плавкой вставки (I_{bc}) не должен быть меньше расчетного или рабочего тока цепи".

"Во избежание отключения при кратковременных перегрузках номинальный ток плавкой вставки должен удовлетворять соотношению

$$I_{bc} = \frac{I_{\max}}{\alpha},$$

где

I_{bc} — номинальный ток плавкой вставки,
 α — коэффициент, обусловленный режимом перегрузок и характеристикой предохранителей".

"Для ответвлений к короткозамкнутым двигателям с нормальными условиями пуска (редкие пуски при небольшой длительности разгона) коэффициент α может быть принят равным 2,5, а в установках с тяжелыми условиями пуска (частые пуски и большая длительность разгона) — от 1,6 до 2".

Следовательно, при защите предохранителем и ограниченных перегрузках двигатель, работая при перегретой изоляции, от сети предохранителем отключен не будет. Это обстоятельство является главным недостатком плавких предохранителей. Таким образом, неавтоматическая защита электроприводов плавкими предохранителями не может обеспечить надежную защиту двигателя от могущих возникнуть различных условий работы. Она не может обеспечить реально и зависимую от времени перегрузку.

80. Пакетные выключатели

Пакетными выключателями называются выключатели, состоящие из набора колец — пакетов из изолирующего материала. Внутри колец располагается контактное устройство. Оно состоит из одного или нескольких ножей, помещенных внутри колец. При включениях и выключениях ножи поворачиваются на 90° и производят замыкание или размыкание цепей между контактными пластинами, располагаемыми противоположно по диаметру. Для производства быстрых мгновенных выключений в крышке выключателя помещены сильные пружины. Внешний вид выключателя показан на рис. 104.

На рис. 105 дана схема пакетного переключателя из трех сидящих на одной оси колец, применяемая для включения в цепь короткозамкнутого асинхронного двигателя. В переключателе ножи поворачиваются на 120° , а в выключателе на 90° . R, S, T — фазы сети, $U, W, Y_{вз}$ — зажимы двигателя. В показанном на рис. 105 положении двигатель отклю-

чен. При повороте выключателя вправо или влево получается вращение двигателя в ту или другую сторону.

Пакетные выключатели могут использоваться для токов до 60 а при 220 в и до 25 а при 500 в. Применяются они как включающие

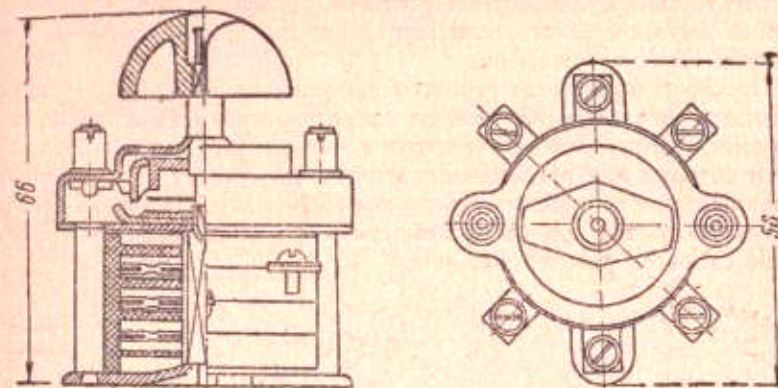


Рис. 104. Внешний вид пакетного выключателя.

(и выключающие) двигатель в сеть аппараты при реостатном пуске двигателей. Они могут быть включающими аппаратами для короткозамкнутых двигателей при числе включений до 15—20 в час мощности

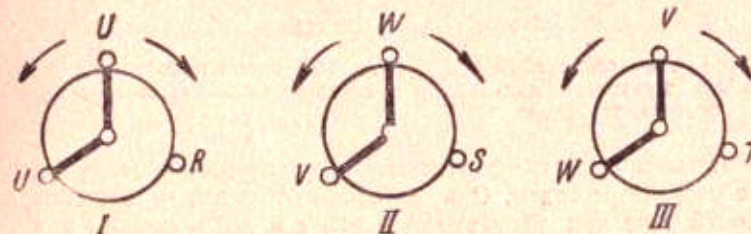


Рис. 105. Схема пакетного выключателя.

двигателей до 4 квт. Они служат для отключения электроприводов от сети при отсутствии в них тока. Наконец, они могут использоваться в качестве выключателей цепей управления при автоматическом управлении.

81. Реостаты для управления электродвигателями

В практике электропривода применяются четыре основные категории реостатов:

1) Пусковые реостаты, используемые лишь для пусковых режимов электродвигателей. Применяемые в них сопротивления рассчитаны по нагреву лишь на короткое, весьма ограниченное время пуска, почему для регулировки скорости двигателя они совершенно использованы быть не могут, так как быстро перегорят.

2) Регулировочные реостаты. Этот тип реостата рассчитан на длительное включение сопротивлений в цепь. Служат эти реостаты для

регулирования скорости двигателей постоянного тока изменением сопротивлений в цепи якоря и для регулирования скорости асинхронных двигателей с кольцами изменением сопротивления в цепи ротора. Те же регулировочные сопротивления используются и для пуска.

3) Шунтовые регулировочные реостаты, используемые для продолжительной регулировки скорости шунтового двигателя постоянного тока изменением тока возбуждения.

4) Пускорегулировочные реостаты постоянного тока. Посредством их пуск двигателей ведется изменением сопротивлений в цепи якоря, а регулирование скорости изменением тока возбуждения. Смотря по условиям, с учетом которых они изготовлены, эти реостаты могут быть рассчитаны или нерассчитаны на продолжительную регулировку. Подобные реостаты иногда используются при необходимости иметь низкие заправочные или ползучие скорости рабочей машины.

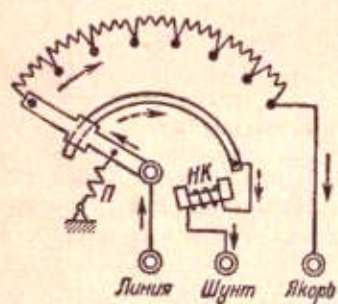


Рис. 106. Схема соединений реостата для шунтового двигателя постоянного тока.

Для малых мощностей применяются наиболее экономичные и наиболее дешевые плоские реостаты. Они изготавливаются для мощностей двигателей до 25 *квт* при напряжении в 115 *в* и до мощности в 40 *квт* при напряжении в 230 и 550 *в*. Нормальное число пусковых ступеней для двигателей мощностью до 0,75 *квт* — 7, до 3,7 *квт* — 8, до 15 *квт* — 10, при больших мощностях — 13.

Типичная схема соединений плоского пускового реостата для шунтового двигателя постоянного тока представлена на рис. 106. Положение ручки реостата в покое двигателя крайнее левое, рабочее — крайнее правое. При пуске двигателя в ход по ряду контактов реостата перемещается связанная с рычагом-ручкой реостата щетка. К контактам присоединены пусковые сопротивления. Обычно современные пусковые реостаты постоянного тока снабжаются небольшим автоматически действующим электромагнитом с так называемой нулевой катушкой НК. Ручка реостата пружиной П все время оттягивается в крайнее левое пусковое положение. В правом положении ручка удерживается нулевой катушкой, включаемой в цепь возбуждения. В случае исчезновения напряжения в сети, рукоятка автоматически возвращается в крайнее левое пусковое положение. Такая схема гарантирует от включения двигателя на сеть при выведенном сопротивлении пускового реостата.

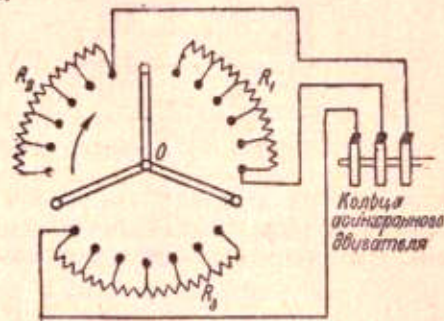


Рис. 107. Схема пускового реостата для асинхронного двигателя с кольцами.

На рис. 107 дана схема включения пускового реостата в ротор трехфазного асинхронного двигателя с кольцами.

При больших мощностях двигателей, в случае постоянного тока, ручное управление может быть осуществлено лишь применением так называемых контакторных реостатов, состоящих из рычажных выключателей. Каждый выключатель имеет щеточный контакт, перекрывающий две пластины. Число ступеней в таких реостатах дается табл. 19.

Таблица 19

Мощность двигателя <i>квт</i>	Число пусковых ступеней
7,5—22	3
25—55	4
60—85	5
90—150	6
165—300	7
340—450	8
Выше 450	9

В асинхронных двигателях с кольцами применяются также жидкостные реостаты с плавной регулировкой пускового сопротивления.

82. Контроллеры

Контроллер — это переключатель для управления главными цепями двигателей. При средних мощностях двигателей контроллеры являются более удобными и надежными аппаратами управления, чем пусковые и пуско-регулирующие реостаты. Контроллеры применяются почти во всех случаях, где требуется получение промежуточных скоростей. Контроллер дает возможность простого осуществления любой сложной схемы неавтоматического управления приводом. Конструкция контроллеров более прочна и груба, чем конструкция плоских реостатов. В контроллерах легко могут быть размещены искрогасительные катушки; закрытие токопроводящих частей контроллера просто, место, требуемое для их установки, мало.

Контроллеры бывают двух типов: барабанные и кулачковые. Наибольшее распространение имеют первые. Барабанный контроллер, одна из конструкций которого дана на рис. 108, включает следующие основные элементы, заключаемые в общий кожух: 1 — контактные пальцы; 2 — вал с подвижными контактами; подвижные контакты дают те или иные электрические соединения между неподвижными контактными пальцами; 3 — искрогасительные катушки, служащие для гашения дуги, возникающей при переключениях; 4 — маховичок для поворота вала.

Кулачковые контроллеры надежнее барабанных, требуют за собой меньшего ухода, срок службы их в 5—6 раз выше, чем у барабанных.

Кулачковые контроллеры состоят из элементов контакторного типа. Эти элементы замыкаются и размыкаются кулачковыми шайбами, которые насажены на вал контроллера. Процесс работы кулачкового контроллера виден из рис. 109. На нем показаны три положения кулачка:

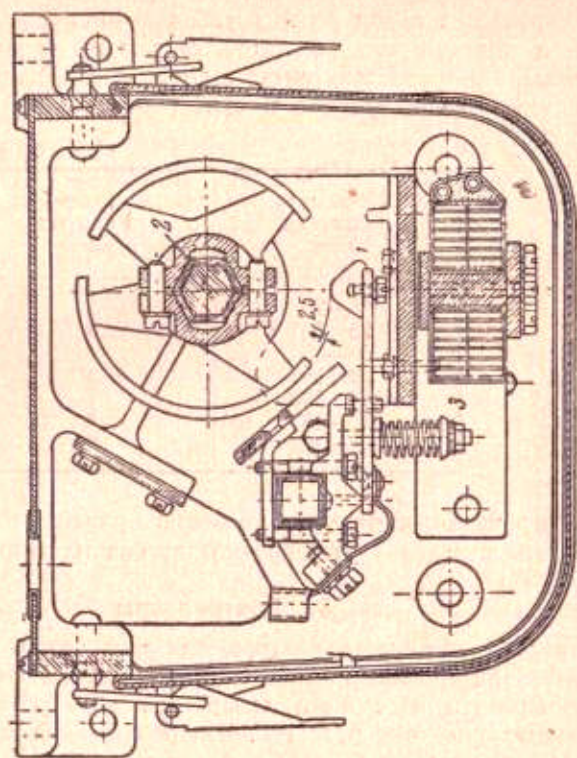
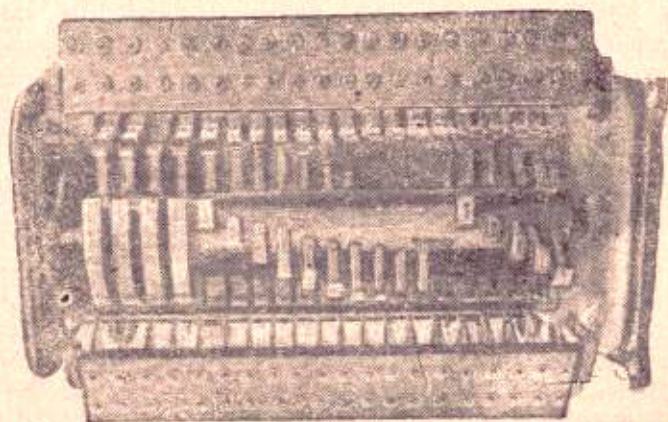


Рис. 108 а и б. Конструкция барабанного контроллера.



выключение, промежуточное и включение. Каждый контакторный элемент снабжен искрогасительной катушкой. Большой срок службы кулачковых контакторов по сравнению с барабанными обусловлен отсутствием тру-

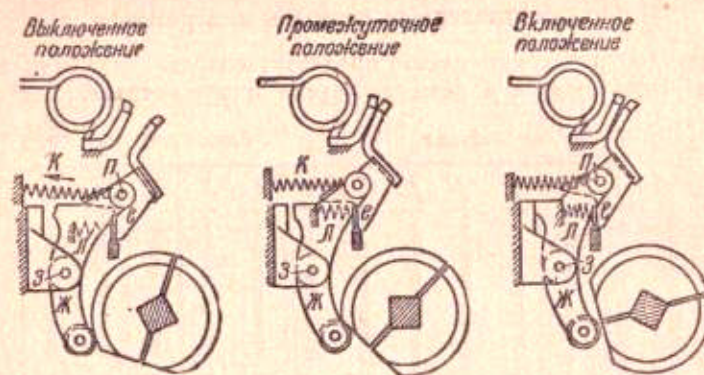


Рис. 109. Процесс работы кулачкового контроллера.

щихся частей и лучшим искрогашением. Частота включений контроллера в сеть, естественно, отзывается на работе его контактов, являющихся основными токопроводящими элементами контроллера. В зависимости

Таблица 20

Наибольшие допустимые мощности контроллеров

Характер работы	Частота включений в час	Допустимая мощность в % от номинальной		Примеры
		барабанные контроллеры со скользящими контактами	контроллеры кулачкового типа	
Обыкновенная работа без особой регулировки	до 30 до 120	120 110		Краны машинных помещений Транспортные краны
Работа с регулированием пуска в ход (плавный пуск с тонкой регулировкой)	до 120 до 240	100 80	120	Монтажные краны Литейные краны
Работа с быстрым ускорением значительных маховых масс	до 240 до 300 до 600 до 1000	60 — — —	115 110 100 80	Вспомогательные механизмы металлургических заводов

от режима работы контроллера каждая конструкция допускает различную мощность управляемого двигателя. В табл. 20 показано, как изменяется мощность контроллера в зависимости от характера его работы.

83. Контроллерные схемы и диаграммы

Каждая контроллерная схема предназначена для производства определенных переключений в цепи двигателя и обеспечивает возможность

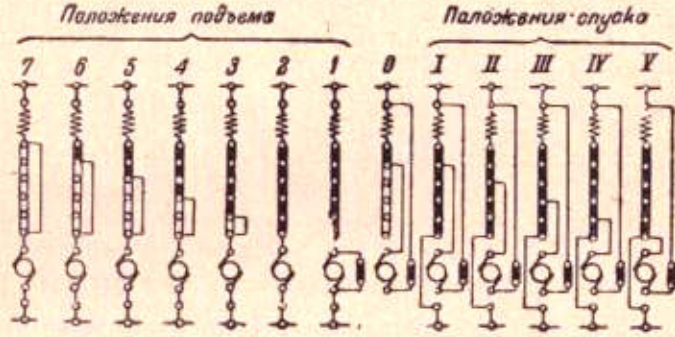


Рис. 110. Последовательность переключения контроллером схемы с серийным двигателем.

получения определенного комплекса механических характеристик двигателя. Для примера на рис. 110 представлена последовательность переключений серийного кранового двигателя для подъема и спуска.

Контроллер имеет нулевое положение (покой — 0), семь положений для подъема при разной скорости и пять положений — для спуска. Так как условия работы двигателя при спуске и подъеме не одинаковы, то схема контроллера — для поворота вправо (спуск) и поворота влево (подъем) — несимметрична. На положении спуска, для обеспечения надлежащей тормозной работы, двигатель включается по сложной комбинированной схеме, когда обмотка якоря и обмотки возбуждения включены параллельно.

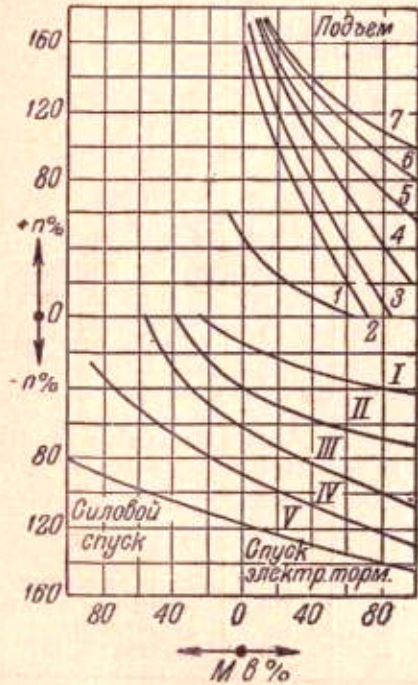


Рис. 111. Комплекс механических характеристик серийного двигателя постоянного тока, обеспечиваемых некоторым контроллером.

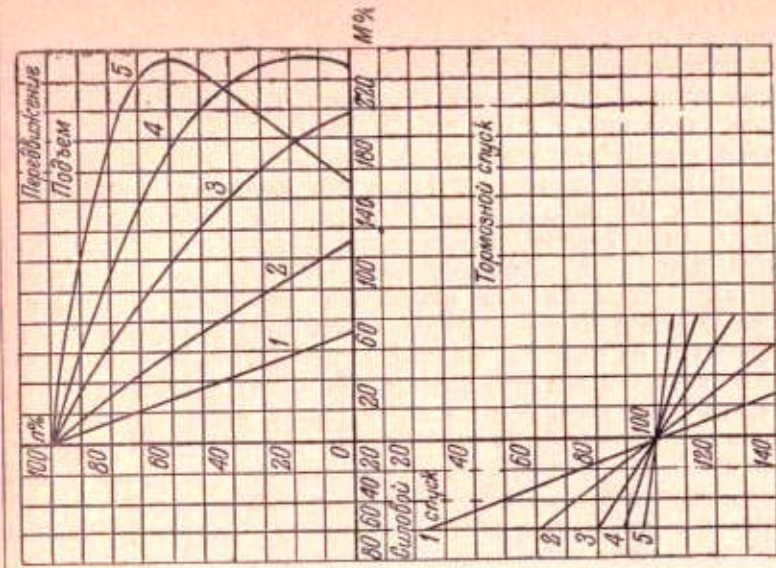


Рис. 114. Механические характеристики асинхронного двигателя для контроллера рис. 112

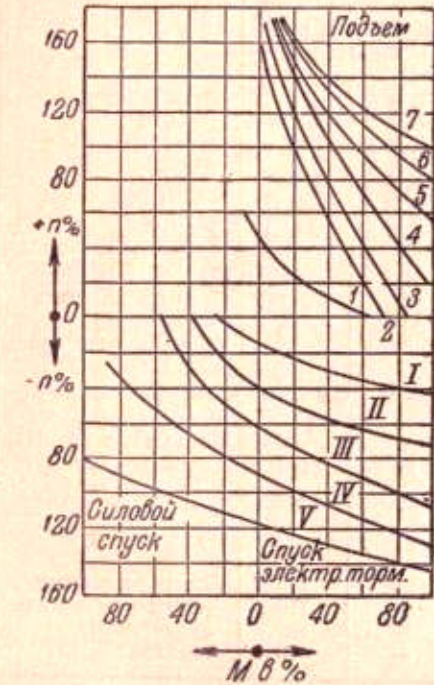


Рис. 112. Развертка барьбанного контроллера.

Рис. 113. Элементы схемы управления для контроллера рис. 112.

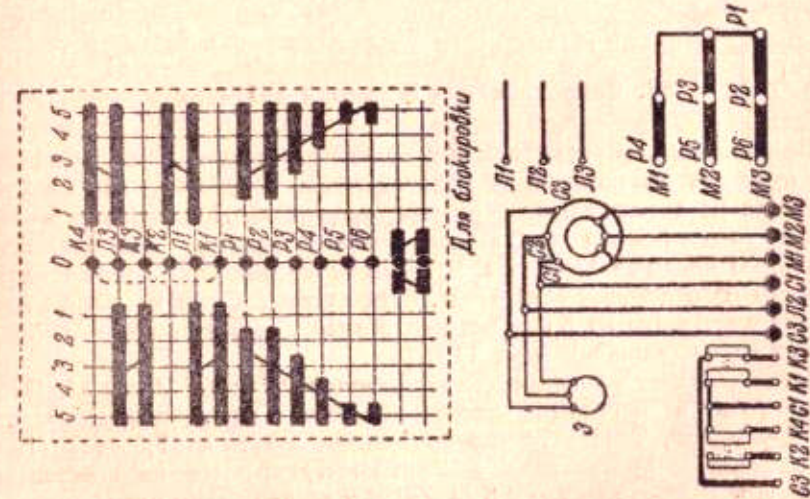


Схема рис. 110 дает комплекс характеристик (рис. 111). Положения контроллера и соответствующие им механические характеристики пронумерованы одинаковыми цифрами римскими и арабскими. На тормозных характеристиках ($I - V$) двигатель, в зависимости от веса груза и скорости, может работать как в двигательном режиме (силовой спуск при низших скоростях), так и в генераторном с рекуперацией (тормозной спуск при высших скоростях).

Комплекс характеристик рис. 111 часто называют контроллерной диаграммой, так как он показывает возможности и последовательность операций, даваемые данным контроллером. В целях упрощения чтения схем контроллерного управления, контроллеры показывают на чертежах развернутыми, получается так называемая развертка контроллерной схемы. При этом цилиндрическая поверхность поворачивающегося барабана разрезается по образующей между крайними положениями контроллера. Развернутый вид этой поверхности и показывается на рисунке. Пальцы контроллера изображаются по вертикали в середине развернутой схемы черными кружками. Среднее положение контроллера соответствует покою двигателя, т. е. выключенному контроллеру и двигателю. Число возможных положений контроллера характеризуется соответствующим числом тонких вертикальных линий с нумерацией цифрами, указывающими соответствующее положение контроллера.

Рис. 112 и 113 дают развернутую симметричную схему барабанного контроллера типа КТ завода „Динамо“ для асинхронного кранового двигателя, служащего для перемещения тележки. На схеме показан оттормаживающий электромагнит Э переменного тока. Подача тока к перемещающемуся двигателю происходит через контактные провода — троллеи. Во избежание загромождения схемы, электрические провода, соединяющие отдельные ее элементы, на схеме не показаны. Все элементы, которые должны быть связаны вместе, на рис. 112 и 113 имеют одни и те же буквенные обозначения. На рис. 113 показаны элементы схемы управления для контроллера рис. 112. На рис. 114 представлены механические характеристики двигателя, управляемого контроллером данного типа.

84. Сопротивления в схемах двигателей

Применяемые в схемах управления двигателями металлические сопротивления бывают или проволочные, или ленточные, или же изготовляются из литых зигзагообразных элементов. Проволочные и ленточные сопротивления оказываются целесообразными для двигателей мощностью не выше 4—6 квт. Чугунные сопротивления комбинируются в группы из отдельных элементов. Устанавливаются они на высоте одно под другим, однако не более четырех в высоту, во избежание перегрева верхних групп (ящиков) (рис. 115).

Чугун обладает удельным сопротивлением $0,75:0,8 \text{ } \Omega \cdot \text{мм}/\text{м}^2$. Плотность тока в чугунных элементах при длительной работе — $1,2-1,8 \text{ а}/\text{мм}^2$. Температурный коэффициент чугуна — $(7,5-15) \cdot 10^{-4}$. Проволочные сопротивления обычно конструируются из константана с удельным сопротивлением $0,5 \text{ } \Omega \cdot \text{мм}/\text{м}^2$ и температурным коэффициентом

$5 \cdot 10^{-6}$. Применяются они лишь в случае необходимости больших сопротивлений.

Нужные для схемы, рассчитанные по механическим характеристикам, сопротивления выбираются по соответствующим каталогам с учетом:

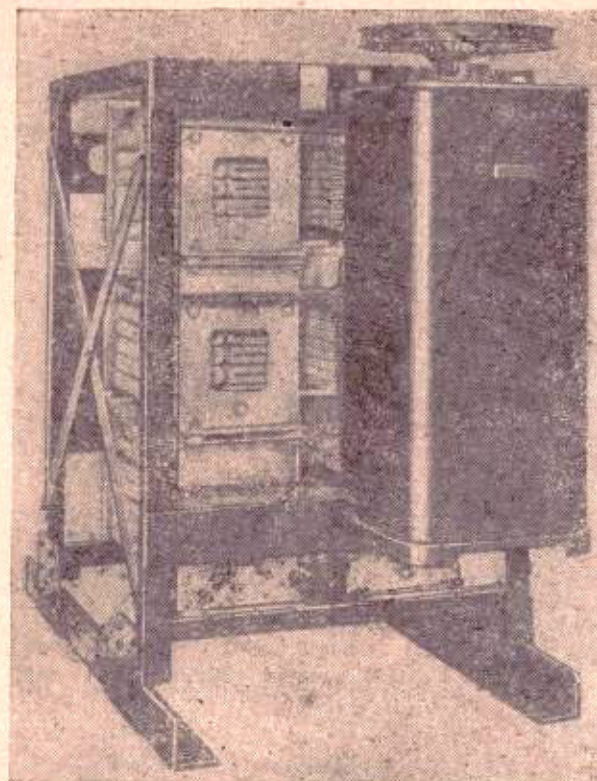


Рис. 115. Расположение сопротивления.

1) характера режима работы — продолжительный, повторно-кратковременный напряженный или ненапряженный; 2) нужной величины сопротивления; 3) силы проходящего через них тока.

85. Тормозные приспособления

Специальные тормозные приспособления приходится использовать в ряде установок электропривода или для быстрой точной остановки электроприводов или по соображениям безопасности. Так, тормозы оказываются обязательными в подъемных устройствах для удерживания груза в неподвижном состоянии при отключенном двигателе.

Наиболее часто применяются тормозные электромагниты. Они состоят из трех основных частей: 1) тормозных колодок или ленты с фрикционными прокладками; 2) механизма для перемещения колодок

или ленты; в качестве прокладок применяется намотанная на бронзовой проволоке спрессованная ткань из асбеста с добавкой хлопчатобумажной пряжи со связывающим веществом; 3) оттормаживающего электромагнита.

Затяжка тормоза достигается нормально посредством пружины. Освобождаются колодки или лента электромагнитом при подаче в его обмотку тока.

Вид тормозного электромагнита постоянного тока представлен на рис. 116. При постоянном токе, обмотки тормозных электромагнитов могут включаться в цепь или последовательно с двигателем (серийные) или параллельно (шунтовые).

Преимущество серийных электромагнитов перед шунтовыми заключается в их большей скорости действия. В шунтовых электромагнитах, вследствие большой их самоиндукции, ток спадает медленнее. В свою очередь шунтовые электромагниты имеют преимущество независимости работы от нагрузки двигателя. Надежность работы шунтовых электромагнитов следует считать меньшей, чем серийных, так как при случайном возможном обрыве в якорной цепи двигателя и при наличии напряжения в сети шунтовый электромагнит продолжает оставаться под током, не отпуская тормозных колодок. Серийный же электромагнит сработает одновременно с перерывом тока в цепи двигателя.

Шунтовые электромагниты используются для электроприводов с сильно меняющейся нагрузкой в том случае, когда ток якоря двигателя не может обеспечить удерживание серийного тормоза во втянутом положении. Для обеспечения работы шунтовых тормозов при перегреве тока в цепи якоря двигателя используются автоматические последователь-

ные реле, включаемые в цепь якоря. Контакты этого реле включаются последовательно в цепь катушки электромагнита. При перерыве тока в цепи якоря контакты реле размыкают катушку электромагнита.

В случае приводов высокой скорости и при требовании точной остановки, только при постоянном токе применяются короткоходовые тормозные электромагниты (рис. 117) с очень малым ходом в 2—6 м.м. Эти тормоза обладают большой быстротой действия. К этим тормозам предъявляются очень высокие требования тщательности изготовления, установки и эксплуатации. Короткоходовые электромагниты изготавливаются совместно с тормозом.

При трехфазном токе тормозные приспособления всегда включаются в цепь параллельно. При этом могут быть использованы тормоза с электромагнитами (рис. 118) или тормоза с серводвигателями. Тормозные электромагниты трехфазного тока характеризуются большими толчками, что при наличии в тормозе механических неисправностей может вызывать

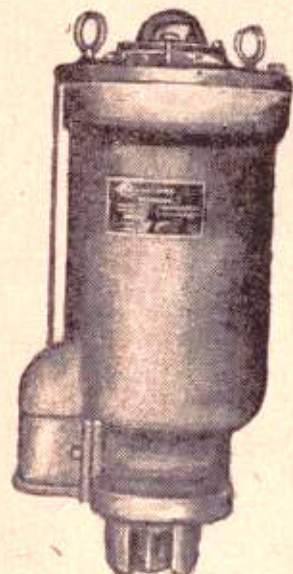


Рис. 116. Тормозной электромагнит постоянного тока.

перегорание катушек. В силу этой причины при переменном токе часто используются тормоза с приводом от вспомогательного короткозамкнутого асинхронного двигателя.

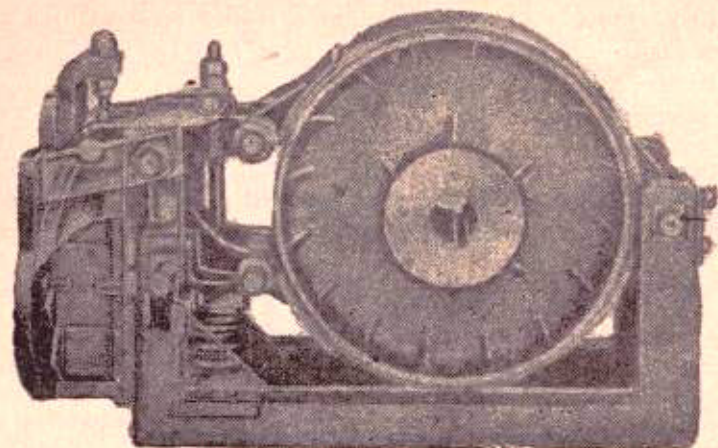


Рис. 117. Короткоходовой электромагнит.

Этот двигатель рассчитывается на нормальный нагрев при работе под током в неподвижном состоянии, т. е. в положении короткого замыкания. При отсутствии тока двигатель находится всегда в исходном

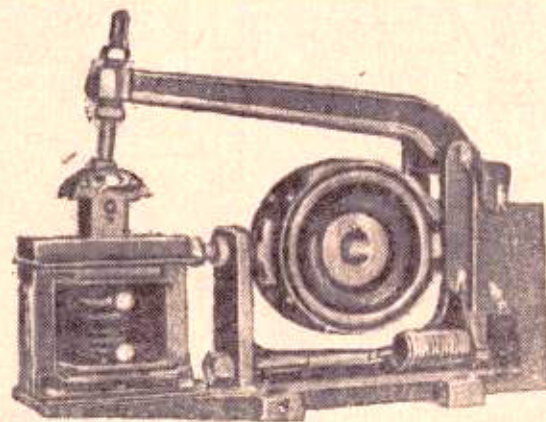


Рис. 118. Тормозной электромагнит переменного тока.

положении за счет груза на тормозном рычаге. Двигатель сочленяется с зубчатым сектором, перемещающим рычаг, который вызывает движение тормозных колодок. При подаче в двигатель тока он для освобождения тормозных колодок должен сделать всего 1,5—2 оборота, после чего двигатель будет стоять в этом положении под током до отключения главного двигателя от сети.

Выбор тормозных устройств по каталогам производится по величине тягового усилия, необходимого для освобождения тормоза, с одной стороны, и по величине хода, с другой. Полное тяговое усилие, на которое выбирается тормоз, получается из суммирования полезного тягового усилия с весом электромагнита. Выбор производится с запасом в 20—30%.

Глава XII

Автоматическое управление двигателями и автоматическая аппаратура управления

86. Шунтовые контакторы

Контактором называется электромагнит, служащий для производства переключений (включение, выключение, шунтирование сопротивлений и т. п.) в основном в главной цепи двигателей. Контакторы применяются также в цепях возбуждения синхронных машин и машин

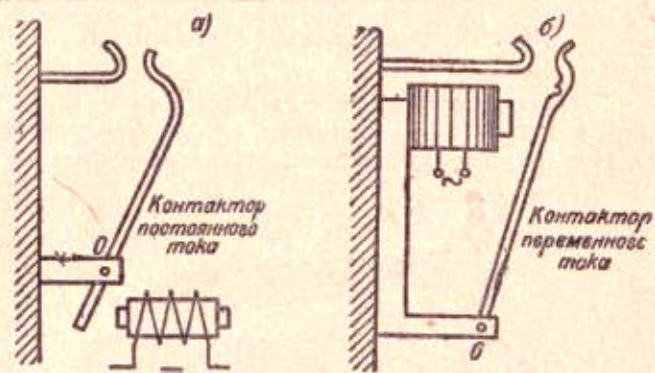


Рис. 119. Принципиальные конструкции контакторов постоянного и переменного тока.

постоянного тока больших мощностей. Наиболее распространенные типы контакторов изготавливаются на силы тока от 20 до 600 а с примерной градацией 20, 40, 80, 100, 150, 300 и 600 а. Менее распространены маленькие контакторы на 3 и 10 а (переменного тока). Функции контактора заключаются в замыкании или размыкании его электромагнитом при подаче в катушку последнего тока двух контактов — одного неподвижного и второго подвижного, скрепленного с якорем электромагнита. Принципиальная конструкция контакторов постоянного тока дана на рис. 119, а, контакторов переменного тока — на рис. 119, б.

Контакторы конструируются как с нормально разомкнутыми (открытыми) контактами, так и с нормально замкнутыми (закрытыми) контактами. Нормальным состоянием контактов считают

их положение при отсутствии тока в катушке контактора. Применение в автоматической схеме одного или другого типа контактора зависит от задач, которые ставятся ему схемой. Кроме главных контактов, которые производят переключение в цепи двигателя, контакторы обычно имеют дополнительные вспомогательные блокконтакты на малые силы тока. Эти контакты предназначаются для производства переключений в цепях управления. Число пар блокконтактов контактора зависит от структуры автоматической схемы электропривода.

Конструкция контактора постоянного тока характеризуется рис. 120. Контакттор содержит три основных элемента: электромагнит с сердечником и катушкой 1, главные токопроводящие контакты 2 и искрогасительную катушку 3. Контакты защищены асбестовой коробкой 4. Через искрогасительную катушку протекает тот же ток, что и через главные контакты. Создаваемый искрогасительной катушкой поток взаимодействует с током дуги, возникающей между контактами при их размыкании. Раздуванием этой дуги, т. е. ее удлинением, и обеспечивается скорейшее ее погасание. В последнее время в некоторых конструкциях контакторов вместо искрогасительных катушек начали применять постоянные магниты, играющие ту же самую роль в гашении дуги. Конструкция получается при этом более компактной.

Шунтовые контакторы конструируются как для постоянного, так и для переменного тока и включаются в цепь двигателя или отдельную цепь управления параллельно. Контактторы постоянного тока конструируются обычно однополюсными, контакторы переменного тока — многополюсными (трехполюсными). Срок службы современных контакторов с вращением тела якоря на призмах определяется цифрами: при постоянном токе от $12 \cdot 10^6$ до $30 \cdot 10^6$ включений, при переменном токе — от $1 \cdot 10^6$ до $10 \cdot 10^6$. Срок службы контакторов переменного тока меньше, чем контакторов постоянного тока, и работа их тяжелее вследствие влияния токов Фуко и легкого дрожания контактов.

Одни и те же конструктивные типы контакторов в схемах автоматизированного электропривода могут выполнять разнообразные переключения, в соответствии с чем они получают разные схемные наименования. Так, контакторы, включающие двигатель на сеть, называются линейными, меняющие направление вращения двигателя переключением фаз в двигателях переменного тока или изменением полярности якоря в двигателях постоянного тока называются реверсирующими, шунтиру-

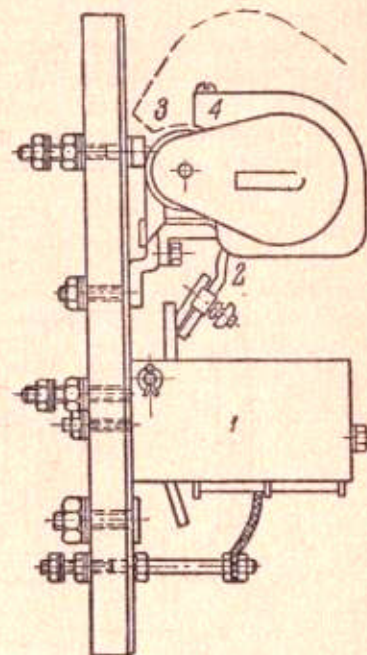


Рис. 120. Конструкция шунтового контактора постоянного тока.

ющие пусковые сопротивления в цепи двигателя — пусковыми. Наименование контактора по выполняемым им функциям не характеризует конструкции контактора. Она остается той же самой.

Собственные времена включений контакторов, т. е. времена, протекающие от подачи тока в катушку контактора до замыкания им контактов, для постоянного тока лежат в пределах 0,04—0,25 сек. Собственные времена выключения, т. е. времена от прекращения протекания тока через катушку до разрыва цепи контактов, для тех же контакторов составляют 0,16—0,07 сек.

87. Серийные контакторы

Катушки серийных контакторов включаются последовательно в главную цепь двигателя, поэтому работа их зависит от силы протекающего через двигатель тока. Замыкание или размыкание

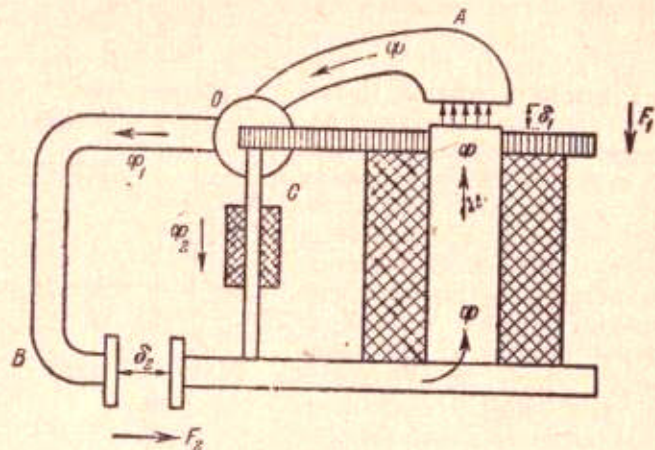


Рис. 121. Магнитная цепь серийного контактора постоянного тока.

контактов в этих контакторах производится не при наибольшей, а некоторой наименьшей силе тока. Серийные контакторы применяются лишь при постоянном токе. Конструкция их несколько сложнее, чем шунтовых, почему они в приводе применяются сравнительно редко и преимущественно в схемах двигателей малых и средних мощностей. Работа серийного контактора основана на шунтировании его магнитной цепи.

Эскиз магнитной цепи для одного типа серийных контакторов приведена на рис. 121. Якорь контактора состоит из двух, жестко связанных одна с другой, частей — верхней *A* и нижней *B*, поворачивающихся вместе вокруг точки *O*. Магнитный поток, выходя из главного сердечника и попадая в часть *A* якоря, далее разветвляется на две части: часть потока идет по магнитопроводу *B*, другая — по магнитопроводу *C*. Далее оба магнитных потока соединяются вместе. На якорь действуют две силы притяжения: сила F_1 , которая стремится

сократить магнитные линии, повернуть якорь вправо и замкнуть контакты контактора, и сила F_2 , действующая навстречу силе F_1 и стремящаяся повернуть якорь влево, т. е. противодействующая замыканию контактов. Меняя соотношение между силами F_1 и F_2 , можно при определенных условиях получить замыкание контактов. Достигается это подбором сечения магнитопровода *C*. Пока сила тока в катушке контактора, равная силе тока двигателя, большая, магнитопровод *C* оказывается насыщенным. Большая часть магнитных линий при этом ответвляется через участок *B*. Сила F_2 при этом больше силы F_1 , и контакты не замыкаются. При падении силы тока до некоторой минимальной величины, через участок *B* с большим магнитным сопротивлением (из-за наличия воздушного промежутка δ_2) проходит малое число магнитных линий, сила F_1 оказывается больше силы F_2 , и контакты замыкаются. Существуют также другие конструкции серийных контакторов с двумя катушками.

88. Контактторы с защелкой

В ряде схем электропривода требуется обеспечение определенного программного управления с некоторой задаваемой последовательностью операций. Эта последовательность должна быть выдержана совершенно независимо от возможных временных перерывов в подаче электрической



Рис. 122. Схема включения контактора с защелкой.

энергии. В таких случаях применяются контакторы с защелкой. При их применении работа электропривода после возобновления подачи энергии начинается с той самой операции, на которой произошла остановка механизма из-за выключения тока. Происходит это в силу того, что в этом типе контактора якорь последнего удерживается механической защелкой.

Схема включения контактора с защелкой дана на рис. 122. Он имеет две обтекаемые током катушки: 1) тяговую, обеспечивающую включение контактора, и 2) выключающую, служащую для освобождения защелки. Главные контакты контактора на рис. 122 не показаны. Кроме главных контактов, контактор имеет две пары вспомогательных $1'$ и $2'$. Как в замкнутом, так и в разомкнутом положении главных контактов обе катушки контактора обесточены. При этом одна пара вспомогательных контактов замкнута ($2'$), а вторая ($1'$) разомкнута. Импульс в схему катушек подается какими-либо контактами *A* и *B* того или другого командного аппарата, например кнопками. Замыкание кнопки *A*

вызывает включение тяговой катушки. Эта последняя замыкает главные контакты и вспомогательные контакты I' . Механическая защелка запирает якорь контактора и одновременно своими блок-контактами $2'$ отключает тяговую катушку. В дальнейшем импульс подается на контакт B . Так как контакт I' замкнут, то выключающая катушка получает ток, освобождает защелку, в результате чего якорь возвращается в исходное положение.

89. Основные понятия о реле

Реле называется автоматически действующий механизм, производящий при своем срабатывании те или иные переключения в управляемых им электрических цепях. В схемах привода реле нормально управляют работой контакторов, хотя при малых силах тока, т. е. при очень малых мощностях электродвигателей реле сами могут производить шунтировки или переключения отдельных цепей двигателей. По принципу действия реле, применяемые в электроприводе, могут быть разделены на: 1) электромагнитные; 2) ионно-электронные; 3) тепловые; 4) механические.

Каждое реле конструктивно распадается на три элемента: 1) главный рабочий элемент, получающий возбуждающий импульс; 2) контактный элемент, производящий соответствующие переключения в цепях; 3) вспомогательный рабочий элемент, связующий главный рабочий элемент и контактное устройство.

Функции реле могут быть вообще весьма различны. Для электропривода наибольшее значение имеют три категории функций: 1) управление переходными процессами привода (пуск, торможение, реверсирование и др.); реле, выполняющие эти функции, называются реле управления; 2) защита двигателя и механизма от перегрузки, аварий; эту роль выполняют реле защиты; 3) осуществление нужных блокировок; соответствующие реле могут быть названы блокировочными.

90. Защитные реле

Назначение защитных реле заключается в отключении двигателя от сети в случае коротких замыканий в цепи двигателя, в случае перегрузки и т. п. В схемах электропривода защитные реле своими контактами размыкают обычно цепь катушек контакторов, приключающих двигатель к сети. Наиболее распространенные в приводе защитные реле бывают или электромагнитного или термического типа.

В электромагнитных реле перемещение якоря и связанных с ним подвижных контактов происходит под влиянием электромагнитных усилий, создаваемых магнитным потоком, который возбуждается током катушки реле. Электромагнитные защитные реле могут действовать мгновенно по достижении силой тока двигателя определенной величины. Включаются такие реле в цепь двигателя последовательно. Они называются максимальными реле независимого действия. Подобная защита применяется против токов короткого замыкания в цепи двигателя и очень больших перегрузок приводимых механизмов (застопоривание).

Реле защиты могут срабатывать также с некоторой выдержкой времени. В этом случае они называются зависимыми.

Выдержка времени может достигаться различными способами. Иногда якорь реле связывают с масляным демпфером, т. е. с поршнем с регулируемым числом отверстий, через которые должно пройти масло, иногда используют возможности изменения натяжения пружины, оттягивающей якорь, или изменения начального положения якоря в магнитной системе.

Термические реле срабатывают (размыкают свои контакты) по достижении реагирующим элементом определенной температуры. Эти реле бывают двух основных типов. В одном из них реагирующий измерительный элемент нагревается непосредственно проходящим через него током двигателя. В другом типе через реагирующий элемент ток не проходит. Этот элемент нагревается за счет получения тепла некоторым нагревательным элементом, по которому проходит ток двигателя. Реагирующим элементом термического реле обычно является биметаллическая пластинка. В результате нагрева эта пластинка изгибается и размыкает соответствующие контакты цепи управления. Применение для рассматриваемой цели биметалла дает возможность получить от реле тепловые характеристики, близкие к тепловым характеристикам двигателей. Применяются также нагревательные элементы из некоторых сплавов.

В периоды кратковременных, допустимых по термическим свойствам, перегрузок двигателей термическое реле не отключает двигатель от сети. Оно отсоединяет двигатель лишь тогда, когда температура изоляции его обмоток начинает повышаться над предельно допустимой. В практике последнего времени такие термические реле, называемые термостатами, иногда встраивают непосредственно в корпус двигателя, достигая тем самым наилучшего соответствия между термическими свойствами двигателя и реле.

91. Электромагнитные реле управления — основные и промежуточные

Электромагнитные реле являются наиболее распространенными аппаратами управления в схемах автоматизированного привода. Реле управления по принципу действия могут быть различными. Основными из них являются реле напряжения или независимые, действующие при определенном напряжении, или зависимые, действующие с определенной выдержкой времени, токовые реле — точно также независимые или с выдержкой времени, работающие при определенной силе тока, частотные, производящие включение при определенной частоте переменного тока. Все они представляют электромагниты того или другого рода, втягивающие и отпускающие свой сердечник (якорь) с прикрепленными к нему замыкающими или размыкающими контактами при определенных значениях силы тока в катушке. Напряжение втягивания в реле напряжения постоянного тока составляет 30—70% номинального. Коэффициент возврата этих реле, под которым понимается отношение тока отпадания якоря к току притяжения, составляет около 0,3.

Частотные реле применяются преимущественно для автоматизации управления синхронными и асинхронными двигателями. Они являются электромагнитами, включаемыми в цепь переменного тока переменной частоты и напряжения. Реле отпускает свой якорь при вполне определенной частоте и напряжении. Применяются также такие конструкции частотных реле, в которых, наоборот, при малых частотах получается притяжение якорька. Иногда используют поляризованные частотные реле, в которых один поток создается катушкой постоянного тока или постоянным магнитом. Второй поток создается катушкой, включаемой в цепь переменной частоты.

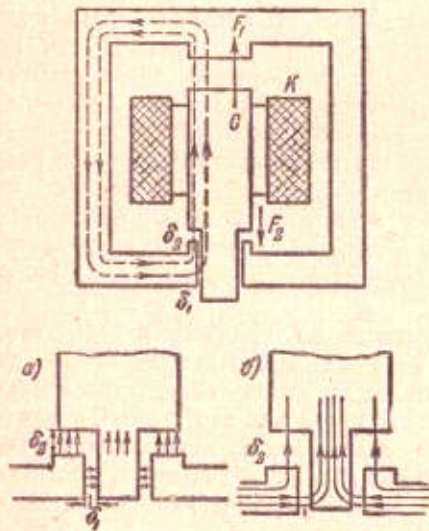


Рис. 123. Магнитная цепь сериесного реле постоянного тока.

дают практически тяжения (рис. 123, а). При спадении силы тока до некоторой величины нижняя часть сердечника становится насыщенной и через зазор δ_2 идет малое число магнитных линий (рис. 123, б). Сила F_1 становится больше силы F_2 , и сердечник поднимается. Подобная конструкция сериесных реле применяется лишь для постоянного тока.

Принцип действия одного из типичных сериесных реле для переменного тока показан на рис. 124. Оно обладает тремя катушками. В одной из них (I) проходит главный ток двигателя. Две другие (II и III) включены на неизменное напряжение сети переменного тока. Сериесная (I) и главная шунтовая катушка (II) действуют навстречу одна другой. При спадении силы тока двигателя до некоторой величины контакт реле K замыкается. Далее якорь реле удерживается в поднятом положении удерживающей катушкой (III). Последняя может лишь удерживать якорь, но не притягивать его. Контакт K замыкает цепь катушки контакторов, шунтирующих сопротивления в роторной цепи.

В ряде случаев электрические импульсы, руководящие работой некоторого электропривода, оказываются настолько малыми, что не могут

быть использованы для прямого воздействия на схему управления. Тогда между прибором, подающим импульс, и управляемым аппаратом включается промежуточное реле. Эти реле рассчитываются на очень

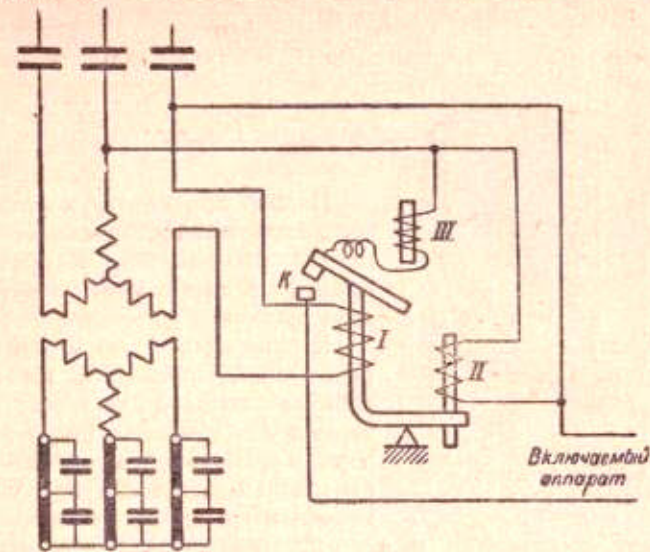


Рис. 124. Включение сериесного реле переменного тока.

малые силы тока и конструируются для всех стандартных напряжений. Наибольшее число пар контактов, с которыми могут изготовляться такие реле, шесть, причем возможна любая комбинация нормально открытых и нормально закрытых контактов.

92. Реле времени

При управлении электроприводами целый ряд переключений в схемах при пуске, торможении и других процессах необходимо производить с выдержкой времени. Для этой цели используются специальные реле времени. Наиболее распространенные из них: 1) электромагнитные (реле напряжения) постоянного тока; 2) механические — маятниковые, применяемые для цепей переменного тока; 3) двигательные, применяемые в цепях постоянного и переменного тока; 4) электромагнитные токовые (реле Райта) постоянного тока. Последние, ввиду малого распространения у нас, мы описывать не будем.

Электромагнитные реле времени применяются только в цепях постоянного тока. Работа их основана на том, что при включении в цепь постоянного тока катушки с самоиндукцией — ток, а стало быть и сила притяжения электромагнита, к которому принадлежит эта катушка, нарастает не мгновенно, а по экспоненциальному закону. Сила тока в катушке

$$I = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L} \cdot t} \right).$$

где U — приложенное к катушке напряжение, R — ее омическое сопротивление, L — коэффициент самоиндукции, t — время, e — основание натуральных логарифмов. Соответственно, если контур включенной в какую-то цепь катушки замкнуть на себя, то сила тока будет спадать по равенству

$$I = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$$

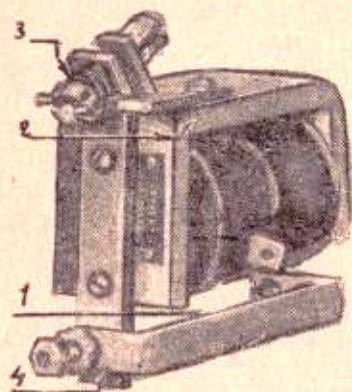


Рис. 125. Электромагнитное реле постоянного тока.

Подбор при конструировании реле соответствующего значения коэффициента самоиндукции и обеспечивает нужную в переходных режимах привода выдержку времени.

Конструкция электромагнитного реле дана на рис. 125. На нем 1 — рабочая катушка, 2 — якорь, 3 — пружина и 4 — контакты. Регулировку выдержки времени этого реле можно вести изменением натяжения пружины и изменением толщины немагнитной прокладки между сердечником и якорем. При этом представляется возможным регулировать выдержку времени в пределах от 0,2 до 1,5 сек. Электромагнитное реле времени в схемах привода обычно включается по схеме рис. 126 параллельно той или другой ступени пускового со-

сложения между сердечником и якорем. При этом представляется возможным регулировать выдержку времени в пределах от 0,2 до 1,5 сек. Электромагнитное реле времени в схемах привода обычно включается по схеме рис. 126 параллельно той или другой ступени пускового со-

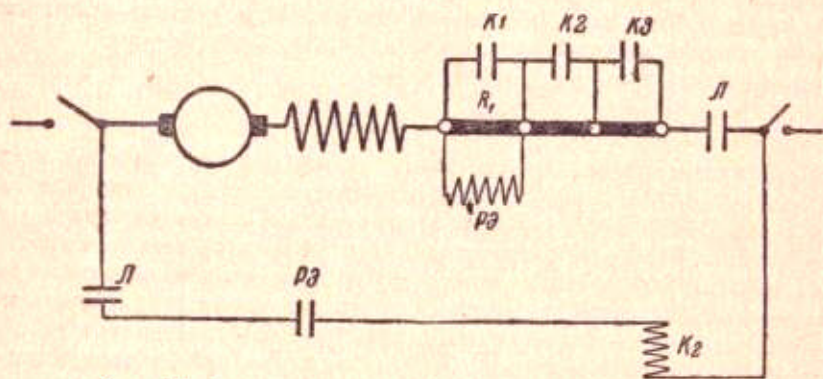


Рис. 126. Включение электромагнитного реле времени.

противления. При замыкании контактом K_1 ступени R_1 реле P_2 , будучи замкнуто на себя, постепенно терзет свой магнитный поток и в некоторый момент времени отпускает свой якорек, замыкая своими контактами цепь катушки следующего контактора K_2 .

Реле электромагнитное может быть выполнено также с демпфером, т. е. с дополнительным медным кольцом, охватывающим сердечник магнитной системы. Роль кольца заключается в увеличении эквивалентного коэффициента самоиндукции. Такое реле дает выдержку времени при отключении его от сети.

Применяются и такие электромагнитные реле времени, в которых выдержка времени достигается связью якоря реле с поршнем, перемещающимся в цилиндре с маслом. Регулировка реле ведется изменением числа отверстий в поршне. Изготавливаются еще электромагнитные реле со спускным механизмом, в которых выдержка времени достигается часовым механизмом. Якорь реле, растягивая пружину, стремится повернуть некоторый зубчатый сектор. Движение последнего затормаживается маятником. Регулировка такого реле ведется изменением груза маятника.

Электромагнитные реле простейшего типа, описанные выше, в цепях переменного тока не применимы. Поэтому для приводов переменного

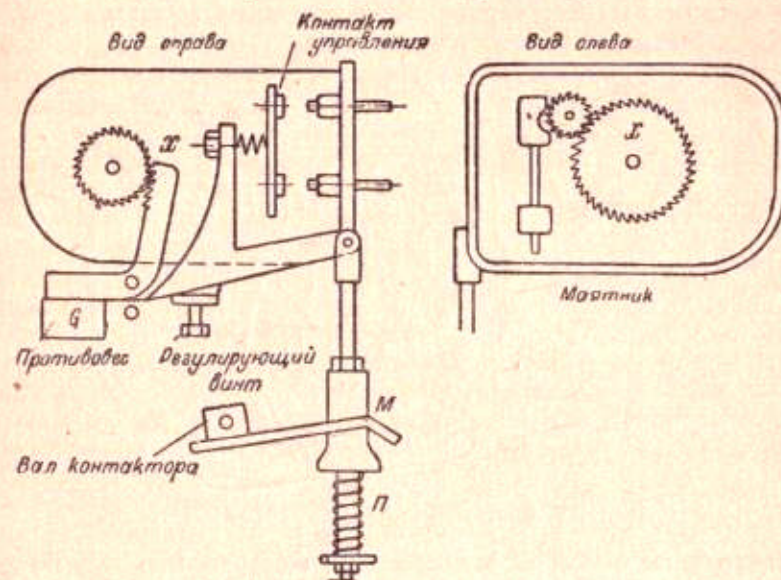


Рис. 127. Маятниковое реле времени.

тока часто используют механические маятниковые реле времени. Они могут конструироваться с соленоидным приводом или не иметь самостоятельного приводного механизма. В последнем случае они пристраиваются к контакторам переменного тока. При этом на ось контактора насаживается жестко связанный с ней хомутик. При включении контактора хомутик поворачивается и нажимает на муфту M реле (рис. 127). Муфта, сжимая пружину Π , через храповичок X заводит часовой механизм с маятником. Подобный механизм обеспечивает замыкание или размыкание контактов реле через определенный промежуток времени. Перемещая груз на маятнике часового механизма и упорный винт для хода зубчатого сектора, можно регулировать выдержку времени маятникового реле от 1 до 10 сек.

При больших выдержках времени и при осуществлении какого-либо программного регулирования производственного процесса применяются двигательные реле постоянного и переменного тока. В этих реле маленький двигатель, через зубчатые передачи с очень большим передаточным числом в виде планетарной передачи, доходящим до 10 000, приводит

во вращение конечный элемент реле. После поворота на некоторый угол этот элемент производит замыкание контактов реле. Один оборот этого элемента может происходить за время от 1 мин. до 1 часа. Регулировка выдержки времени достигается или изменением передаточного числа от двигателя к конечному элементу или перестановкой положения замыкаемых контактов реле. Реле ХЭМЗ для постоянного тока дают возможность регулировать выдержку времени от 5 сек. до 30 мин. и для переменного тока — от 5 сек. до 40 мин.

Реле ХЭМЗ представлено на рис. 128. Двигатель реле через червяк приводит во вращение червячное колесо 1 и шестерню 2. На осях O и O' попарно насажены скрепленные между собой шестерни 3—4, 5—6, 7—8 и т. д. Парные шестерни на своих осях насажены свободно.

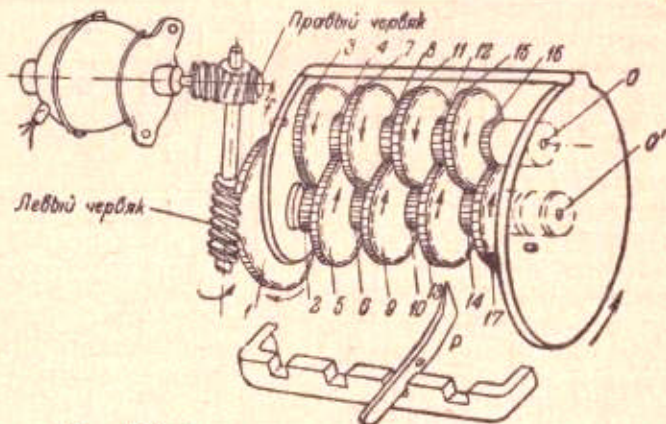


Рис. 128. Двигательное реле времени ХЭМЗа.

Застопоривание любой из этих шестерен может быть выполнено рычагом P , вдвигаемым в соответствующее гнездо скобы. Остановка тех или других шестерен ведет к изменению передаточного числа передачи. Регулировка также уточняется или перестановкой рычага P или начального положения штифта, укрепленного на оси O' и воздействующего на контактную систему реле.

93. Реле для учета механических параметров и счетные реле

При автоматизации электропривода рабочих машин встречается потребность в таких механических реле, которые бы учитывали технологические условия работы механизма того или иного производственного процесса. Вообще эти реле по конструкции могут быть довольно разнообразны. У нас наибольшее распространение нашли реле: 1) поплавковые; 2) манометрические; 3) направления вращения и 4) скорости.

Поплавковые реле используются для автоматизации насосных установок. Реле пускает электропривод насоса в ход при снижении уровня воды в резервуаре ниже некоторой определенной высоты и выключает двигатель при наполнении бака. Нормальная конструкция реле состоит из связанных цепочкой реле поплавок и противовеса и электрического переключателя.

Манометрические реле предназначены для автоматического управления установками в зависимости от давления жидкости или газа. Эти реле, по существу являющиеся регуляторами давления, комбинируются обычно из мембраны, которая воспринимает давление скрепленного с ней поршня с пружиной и электрического переключателя.

Реле направления вращения применяется в реверсивных электроприводах для переключения привода с одного направления вращения на другое. Используемая обычно у нас конструкция этого реле представляет два диска, из которых один скреплен с валом двигателя, второй же может свободно поворачиваться между упорами и обладает контактной системой. Оба диска размещаются в коробке, наполненной маслом, и отделяются один от другого узкой щелью. При вращении ведущий диск увлекает за собой ведомый, чем и достигается замыкание той или другой пары электрических контактов.

Реле скорости используется для переключений, зависящих от скорости вращения рабочей машины. Они служат для автоматизации управления замедлением двигателя, его остановкой, а также для предупреждения от чрезмерного увеличения скорости привода. Эти реле бывают двух основных типов: 1) механическое на центробежном принципе; использование четырех пружин дает возможность устанавливать работу реле в пределах 400—2000 об/мин с точностью до $\pm 1\%$; 2) электрическое, так называемый тахометрический генератор, т. е. маленькая машинка постоянного тока с независимым возбуждением. При постоянном магнитном потоке эта машинка развивает напряжение, пропорциональное числу оборотов в минуту. Это напряжение приключается к реле напряжения, контакты которого замыкаются или размыкаются при определенной скорости. Недостатком тахогенератора является то обстоятельство, что при исчезновении электрической энергии оно не гарантирует контроль за электроприводом при чрезмерном разгоне.

При автоматизации целого ряда приводов, в частности приводов металлорежущих станков, требуется выполнять счетные задачи по ходу производственного процесса. Для этого применяются специальные счетные реле. Конструкция счетного реле в изготовлении завода ХЭМЗ дана на рис. 129. В нем в результате каждого включения катушки электромагнит 2 притягивает его якорек 1, от чего храповое колесо 4 поворачивается собачкой 3 на один зуб. Фиксация нового положения колеса 4 достигается собачкой 6. Счет количества поданных в электромагнит 2 импульсов осуществляется поворачивающимся рычагом 5. После определенного количества импульсов рычаг 5 нажимает на собачку 6, эта собачка давит на контакт 9, переводя его из нижнего положения в верхнее. Поворачиваясь, собачка 6 своим выступом заскакивает за пружинную защелку 7. После размыкания цепи электромагнита, колесо 4, не будучи удерживаемо собачкой 6, возвращается пружиной 8 в первоначальное положение.

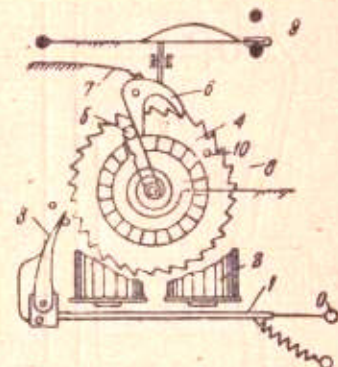


Рис. 129. Счетное реле ХЭМЗа.

чальное положение и ударяет при этом штифом 10 собачку 6. Тем самым последняя теряет сцепление с пружиной 8, и реле оказывается готовым к повторению цикла.

94. Таймтакторы

Таймтактор является автоматически действующим аппаратом постоянного тока, совмещающим в себе функции контактора и электромагнитного реле времени. Таймтакторы используются для управления процессами ускорения и торможения двигателей постоянного тока. Преимуществом таймтакторов перед шунтовыми контакторами с отдельными реле ускорения является уменьшение и удешевление аппаратуры. По весу и размерам таймтактор меньше, чем обычный шунтовой контактор. В целях уменьшения трения, якорь таймтактора вращается на острие призматической формы, а не в подшипниках, как у контакторов. Вследствие этого срок службы таймтактора увеличивается до 75 млн. включений вместо 30 млн. у контакторов постоянного тока.

Таймтакторы конструируются: 1) с двумя магнитными системами и нормально открытыми контактами; 2) с одной магнитной системой и нормально закрытыми контактами.

На рис. 130 представлен таймтактор ХЭМЗ с двойной магнитной системой и нормально открытыми контактами. Катушка I производит включение главных контактов, катушка II обеспечивает нужную выдержку времени от периода включения катушки II до момента замыкания контактов. Первоначально ток подается в катушку II, и она притягивает

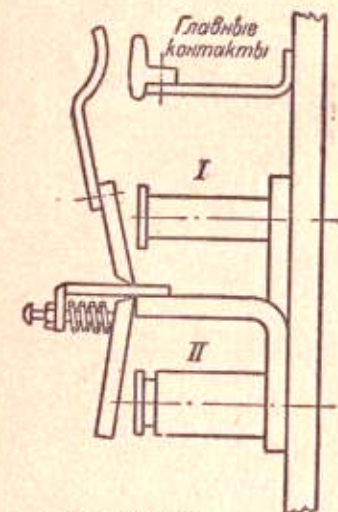


Рис. 130. Таймтактор ХЭМЗа.

якорь. При шунтировании катушки II контактами цепи управления эта катушка постепенно, как электромагнитное реле времени, отпускает якорь. Этот якорь, поворачиваясь, замыкает вспомогательные контакты (на рисунке они не показаны), которые включают катушку I. Последняя притягивает сердечник и замыкает главные контакты. При возбуждении обеих катушек удерживающая сила катушки II в несколько раз больше силы катушки I, и контакты остаются разомкнутыми. Выдержка времени в таймтакторах может составлять 0,2—5 сек. Регулировка выдержки может производиться изменением натяжения пружины и изменением зазора в нижней магнитной системе.

95. Различные командоаппараты

Для управления автоматизированным и полуавтоматизированным электроприводом широко используются различные командоаппараты. Они представляют введенные в цепи управления двигателями различные включающие и переключающие аппараты. По своей конструкции они могут

быть разделены на три основных типа: 1) кнопочные, 2) барабанные, 3) кулачковые — а) нерегулируемые и б) регулируемые.

Кнопочные командоаппараты или кнопочные станции представляют контактное устройство, дающее возможность производить лишь простые



Рис. 131. Типичные схемы простейших кнопочных станций.

переключения. Они применяются там, где производственные операции просты или где требуется управление электроприводом из разных мест. Они приводятся в действие в результате нажатия на кнопку. Кнопки

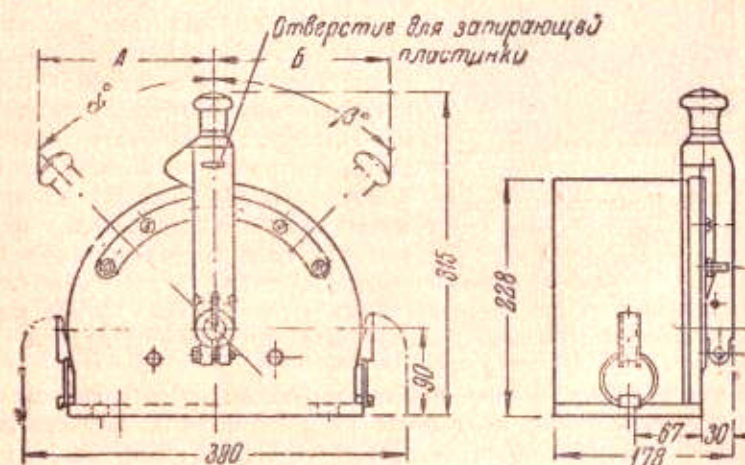


Рис. 132а. Командоконтроллер.

бывают ручные и ножные. На рис. 131 показаны типичные схемы кнопочных станций, причем 1, 3, 4, 5, 6 относятся к управлению из одного места, а 2 — из разных мест. Варианты 7—14 показывают примеры более сложных кнопочных станций.

Барабанные командоаппараты по конструкции похожи на контроллеры, но только значительно меньше и проще их, так как управляют малыми токами. Барабанные аппараты могут осуществлять значительно более сложные переключения, чем кнопочные станции. Однако практическое применение их очень ограничено, так как они могут работать удовлетворительно лишь при небольшом числе включений и отсутствии требований к высокой точности работы.

Для сложных переключений в цепях управления двигателями и при большой частоте включений в час чаще применяются нерегулируемые кулачковые командоаппараты, называемые также командоконтроллерами. Управление ими производится главным образом вручную.

Внешний вид командоконтроллера дан на рис. 132а и 132б. Переключающее устройство командоконтроллеров осуществляется из ряда неподвижных контактов, с которыми соединяются или от которых отсоединяются подвижные контакты. Подвижные контакты смещаются при повороте вала контроллера закрепленными на нем кулачковыми шайбами. Эти последние профилируются в зависимости от нужного комплекса переключений. Каждое положение вала контроллера фиксируется храповым приспособлением.

На рис. 133 показана для примера схема некоторого командоконтроллера с контактными элементами и соответствующая ему контроллерная диаграмма. Последняя показывает, какие контакты контроллера замкнуты в каждом положении. Показанный контроллер имеет семь положений: одно нулевое, три для хода вперед и три для хода назад.

Реле нулевого напряжения служит для отключения системы при исчезновении напряжения. Для последующего пуска системы в ход командоконтроллер должен быть поставлен в нулевое положение.

В более сложных, вполне автоматизированных электроприводах применяются регулируемые кулачковые командоаппараты. Приводятся они в действие или ножной педалью, или серводвигателем, или, наконец, звеньями исполнительного механизма, обслуживаемого данным приводом. Наиболее часто они используются, когда требуется управление приводом в зависимости от пройденного механизмом пути. Преимущество этих регулируемых аппаратов в том, что они обеспечивают очень высокую точность переключений и допускают простые дальнейшие изменения схемы. Для целей переключения используются не профилированные шайбы, а круглые, с прикрепленными к ним кулачками. Последние можно легко

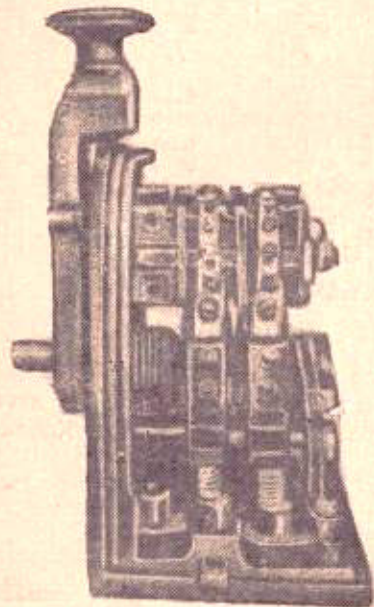


Рис. 132б. Командоконтроллер.

переставлять по окружности шайбы и тем самым регулировать момент переключения. Храпового устройства эти аппараты не имеют. Разрыв контактов в них производится практически мгновенно. Во многих слу

Контроллерная диаграмма

Обозн. конт.	Назад			0	Вперед		
	3	2	1		3	2	1
K1				×			
K2	×	×	×		×	×	×
K3					×	×	×
K4	×	×	×				
K5	×	×				×	×
K6		×					×

× — контакт закрыт

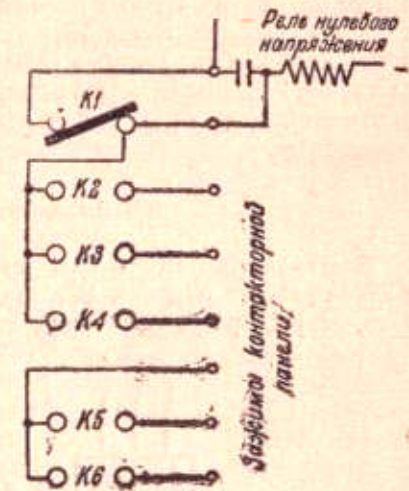


Рис. 133. Схема командоконтроллера и его контроллерная диаграмма.

чаях эти аппараты, будучи приводимы серводвигателем, играют роль автоматических командоконтроллеров.

В том случае, когда регулируемые кулачковые командоаппараты должны производить переключение в зависимости от пройденного пути (повышать скорость двигателя, снижать ее, переходить на торможение и т. д.), они носят название путевых выключателей. Путевые выключатели, осуществляющие лишь переключения двигателя в крайних положениях пути, называются конечными выключателями.

Схема путевого выключателя, как и контроллеров, представляется обычно в виде развертки (рис. 134). В развертке кулачки путевого выключателя, которые производят включение, обозначаются наполовину заштрихованными треугольниками с вершинами, направленными вниз; отключающие кулачки имеют вершины треугольников, также заштрихованные.

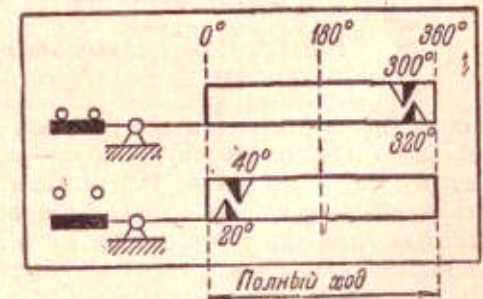


Рис. 134. Развертка схемы путевого выключателя.

ванных наполовину, направленные вверх. Заштрихованная половина треугольников наглядно показывает, какая сторона кулачков производит замыкание или размыкание контактов при работе. Стоящие у кулачков числа градусов показывают, при каком угле поворота вала путевого выключателя кулачки дают воздействие на контакты.

В тех случаях, когда нужно осуществить простое конечное выключение, применяются также рычажные выключатели, размыкающие контакт поворотом рычага, или шпindelные, размыкающие контакт перемещением шайбы. Ось винта шайбы через передачи связывается с валом двигателя. Надежность шпindelного выключателя несколько меньше рычажного.

96. Электромагнитные муфты

Электромагнитные муфты служат для сцепления вала двигателя с валом рабочей машины. Изготавливаются они пока лишь для постоянного тока, ведутся разработки муфт для питания переменным током. Муфты

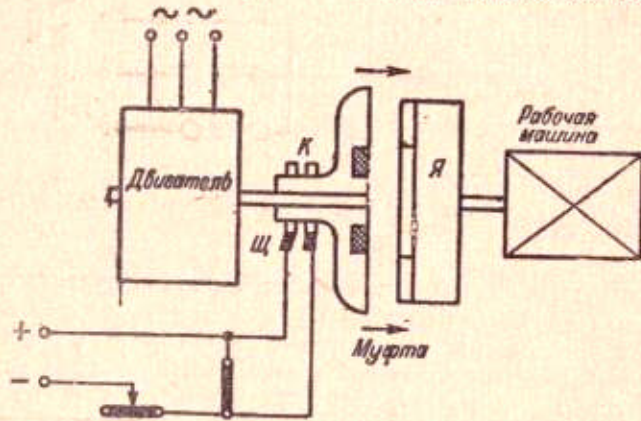


Рис. 135. Неревверсивная электромагнитная муфта.

бывают неревверсивные и реверсивные. Первые обеспечивают вращение механизма в одну сторону, вторые — в обе при неизменном направлении вращения двигателя. Реверсивные муфты дают то преимущество для механизмов повторно-кратковременного режима работы, что при их использовании требуется разгон лишь маховых масс механизма, массы двигателя находятся все время во вращении. Такие муфты применяются, например, в копировально-фрезерных станках Келлера.

Неревверсивная электромагнитная фрикционная муфта показана на рис. 135. На валу двигателя насажен железный сердечник муфты с обмоткой, вал же механизма несет якорь в форме мембраны с наружным кольцом. Для соединения одного вала с другим, через контактные кольца *К* и щетки *Щ* в катушку муфты подается постоянный ток. Якорь муфты *Я* притягивается к сердечнику, обеспечивая на по-

верхности кольца необходимую силу трения, которое и сцепляет оба вала.

На рис. 136 представлена реверсивная электромагнитная муфта. Ее ведомая часть *А*, скрепленная с валом механизма, располагается между двумя ведущими частями *В* и *С*, из которых каждая соединена с двигателем и несет отдельную обмотку. Ведущие части вращаются в разные стороны, что достигается введением соответствующих зубчатых передач *1*, *2*, *3*. Для получения нужного направления вращения механизма, при неизменном направлении вращения двигателя, ток подается в правую или левую ведущую часть муфты.

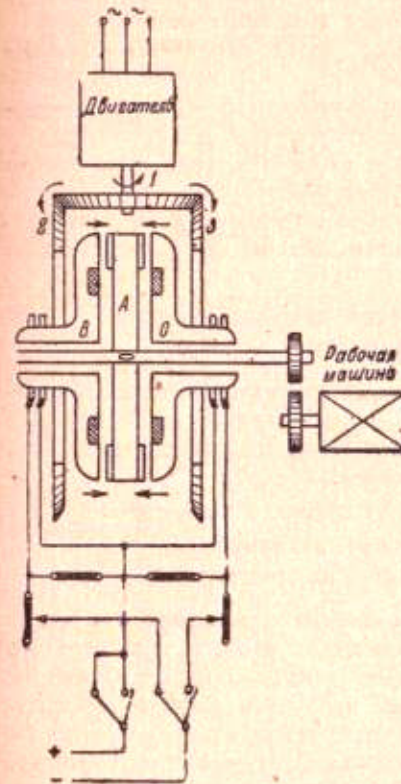


Рис. 136. Реверсивная электромагнитная муфта.

97. Купроксные и селеновые выпрямители

Купроксные выпрямители применяются в приводе для выпрямления переменного тока в постоянный для цепей управления или для подачи постоянного тока в цепь ко-

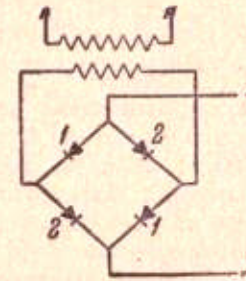


Рис. 137. Схема включения купроксных выпрямителей.

роткозамкнутых асинхронных двигателей при динамическом торможении. Схема питания некоторой цепи постоянного тока через купроксные выпрямители от сети переменного тока через трансформатор дана на рис. 137. При приведенной схеме в течение одного полупериода переменного тока ток проходит через одну пару комплектов купроксных выпрямителей *1—1*, в течение второго полупериода — через другую *2—2*.

Сухой купроксный выпрямитель осуществляется из медных пластин, покрытых с одной стороны слоем окиси меди. Эта сторона является катодом. Каждый элемент выпрямителя допускает напряжение всего 5 в. При больших напряжениях элементы соединяются последовательно в ба-

тарей. Этим и вызвано включение выпрямителей на рис. 137 в сеть переменного тока через трансформатор. Нормальная плотность тока в купроксных выпрямителях — от 0,2 до 0,4 a/cm^2 , с возможностью кратковременных перегрузок — до 0,6—1,2 a/cm^2 . При больших силах тока купроксные батареи включаются параллельно. В целях наилучшего охлаждения, купроксные выпрямители изготавливаются с отдельными пластинами, отводящими тепло. В практике последнего времени стали находить широкое применение также сухие селеновые выпрямители.

Преимущества селеновых выпрямителей перед купроксными заключаются:

- 1) в большей величине обратного напряжения (16—18 v у селеновых вместо 8—10 v у купроксных);
- 2) в большей допускаемой температуре (75—80°C селеновых вместо 45—50°C у купроксных);
- 3) в уменьшении с течением времени внутреннего сопротивления, у купроксных выпрямителей сопротивление постепенно растет.

98. Изображения элементов схем автоматического управления приводом

Условные изображения элементов схем автоматизированного управления электроприводом даны в табл. 21. При начертании схем положение всех элементов аппаратуры (в частности контактов) показывается для обесточенного состояния реле и контакторов.

99. Основная структура схем автоматизированного электропривода и контроллерные диаграммы

Каждая сложная схема автоматизированного электропривода может быть разделена на четыре главные электрические цепи: 1) цепь главного тока двигателя; 2) цепь вспомогательного тока или цепь управления; 3) цепь взаимных блокировочных связей и 4) цепь сигнализационная. Обязательное наличие цепи управления и отличает схему автоматического или полуавтоматического управления приводом от неавтоматического. Цепь взаимных блокировочных связей вообще входит в цепь управления и появляется тогда, когда необходимо установление блокировок между отдельными звеньями рабочей машины или отдельными входящими в систему механизмами. Блокировочные связи того или иного рода, по соображениям безопасности двигателя или механизма или по характеру работы, имеются в большинстве автоматических схем.

Сигнализационные цепи показывают состояние работы автоматизированного агрегата теми или другими сигнализационными приборами, чаще всего электрическими лампами. Удаление из автоматической схемы сигнализационных приборов нормально не нарушает работы схемы.

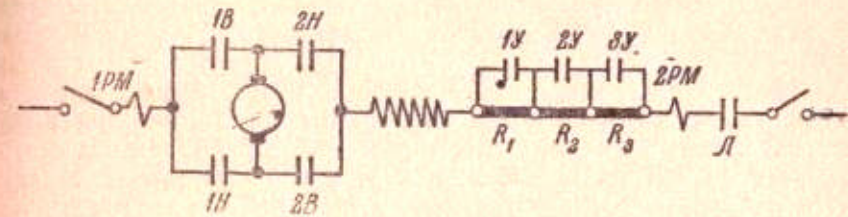
В зависимости от условий питания и типа двигателя, цепь главного тока двигателя и цепь управления могут включаться или на одну общую сеть постоянного или переменного тока или питаться от различных источников электрической энергии. В случае высоковольтных двигателей постоянного и переменного тока цепи управления их, по соображениям безопасности обслуживающего персонала, а также из-за условий боль-

Таблица 21
Условные обозначения основных элементов в схемах автоматизированного электропривода

Обозначение	Наименование	Обозначение	Наименование
	Провод главного тока Провод цепи управления		Нормально открытый контакт контактора или реле
	Отпайка или соединение		Нормально закрытый контакт контактора или реле
	Шунтовая катушка реле		Нормально открытый контакт реле времени с выдержкой при открывании
	Серийная катушка реле		Нормально открытый контакт реле времени с выдержкой при закрывании
	Катушка реле с медной (демагнитизирующей) гильзой		Нормально закрытый контакт реле времени с выдержкой при открывании
	Катушка контактора		Нормально закрытый контакт реле времени с выдержкой при закрывании

Обозначение	Наименование	Наименование	Обозначение
	Контакты командоконтроллера разомкнутые)	Контакты командоконтроллера разомкнутый рубильник	
	Контакты командоконтроллера замкнутые	Сопротивление нерегулируемое	
	Контакты путевого или конечного выключателя открытые	Сопротивление регулируемое	
	Контакты путевого или конечного выключателя закрытые	Кнопка нормально открытая (пусковая)	
	Контакты максимального реле с ручным возвратом	Кнопка нормально закрытая (остановочная)	
	Контакты максимального реле с самовозвратом		

шей надежности и дешевизны аппаратуры автоматического управления, должны питаться напряжением не выше 220—380 в. В отдельных случаях для питания цепей управления в целях большей безопасности и удешевления аппаратуры иногда применяют специальные понизительные трансформаторы. В ряде установок переменного тока оказывается иногда целесообразным осуществлять включение цепей управления двигателями на постоянный ток, из-за большей надежности и точности автоматической аппаратуры постоянного тока. Это имеет место, например, в схемах с синхронными двигателями.



Контакт	Положение								
	Назад		0		Вперед				
	4	3	2	1	0	1	2	3	4
1В						×	×	×	×
2В						×	×	×	×
1Н	×	×	×	×					
2Н	×	×	×	×					
Л	×	×	×	×		×	×	×	×
1У	×	×	×				×	×	×
2У	×	×						×	×
3У	×								×

× — контакт закрыт

Рис. 138. Автоматическая схема главной цепи привода и ее контроллерная диаграмма.

Схемы автоматизированного электропривода при начертании изображаются двояким образом: 1) в форме совмещенных (монтажных) схем и 2) в форме развернутых или элементных схем. В совмещенных (монтажных) схемах каждый автоматический аппарат с относящимися к нему катушками, контактами, внутренними соединениями показывается одним общим символом. В развернутых или элементных схемах отдельные элементы каждого прибора или аппарата изображаются отдельно в различных местах схемы, а именно там, где они выполняют определенные пе-

реключающие функции. Все эти элементы получают общее буквенное или цифровое обозначение. Изучение схем и выяснение принципов их действия удобней производить по развернутым, а не по совмещенным схемам. Развернутые схемы могут быть также названы принципиальными схемами, так как они в наиболее простой форме показывают взаимную связь отдельных элементов и легко позволяют выяснить все условия работы схемы. Совмещенные схемы обычно являются монтажными схемами. Они показывают все соединения между отдельными элементами так, как эти элементы и проводники располагаются на панели управления. Панели, на которых установлены автоматические аппараты управления электроприводом, носят название контакторных панелей или станций управления.

Наиболее краткая характеристика условий работы схемы автоматизированного электропривода может быть представлена контроллерной диаграммой. Каждая схема имеет некоторое число характерных положений замыкания ее главных элементов. Контроллерная диаграмма характеризует число типичных положений схемы и число главных введенных в нее аппаратов, а также показывает, как е аппараты включены на каждом положении основного командного аппарата схемы.

Для примера на рис. 138 представлена автоматическая схема главной цепи реверсивного серийного двигателя постоянного тока, предназначенного для пуска и работы по четырем механическим характеристикам в обе стороны. В схеме имеются два контактора $1B$ и $2B$, включаемые (замыкаемые) при прямом ходе двигателя (вперед), два контактора $1H$ и $2H$, включаемые при обратном ходе двигателя (назад), линейный контактор L , три ускоряющих контактора $1У$, $2У$, $3У$, служащие для пуска двигателя постепенным шунтированием пусковых сопротивлений R_1 , R_2 и R_3 . Схема будет иметь девять характерных положений: 1) среднее — покой — 0; 2) начальное пусковое положение и работа вперед на 1-й характеристике; 3) работа вперед на 2-й характеристике; 4) работа вперед на 3-й характеристике; 5) работа на естественной характеристике; 6—9) четыре положения для работы назад на 1, 2, 3-й и естественной характеристиках. Контроллерная диаграмма показана на том же рис. 138 снизу.

100. Типичные операции схем автоматизированного электропривода

Операции по управлению автоматизированным электрифицированным рабочим агрегатом посредством электропривода весьма разнообразны и многочисленны. Количество и характер необходимых операций зависят от производственных требований исполнительных механизмов, типа электродвигателя и примененной степени автоматизации рабочего агрегата. Чем выше степень автоматизации, тем сложнее оказывается схема цепи управления приводом. Автоматическую схему можно читать, лишь зная хорошо технологический процесс, для которого она предназначена. Сложность главной цепи двигателя зависит преимущественно от числа требуемых механических пусковых, рабочих и тормозных характеристик, условий пуска, требований к регулировке скорости.

Все операции по автоматическому управлению электроприводом могут быть разделены на две основные категории. Первая категория охва-

тывает электромашинные операции управления, вторая — коммандо-производственные. Первая категория определяет необходимые при работе привода переключения в главной цепи двигателя. Эти операции зависят почти исключительно от электрического типа примененного двигателя (шунтовой постоянного тока, синхронный, асинхронный короткозамкнутый и т. д. и т. д.) и обычно почти не связаны с особенностями подачи командного исходного импульса. Особые условия непрерывной постоянной связи получаются лишь в схемах непрерывного электромагнитного управления (с амплидином, гототролем и регулексом). Вторая категория охватывает операции по автоматическому обеспечению выполнения тех или иных производственных требований механизма путем подачи некоторых командных импульсов в систему управления электроприводом. Электрический тип двигателя на самый способ выполнения командных операций во многих случаях почти не влияет.

Чем лучше скомбинировано в схеме управления приводом необходимое сочетание электромагнитных и коммандо-производственных операций, тем совершенней автоматическая схема в целом. Сводка типичных операций электроприводов дана в табл. 22.

Таблица 22

Категория операций	№№ п. п.	Наименование операций	
Электромагнитные операции управления	1	Включение двигателя в сеть	
	2	Ускорение	
	3	Реверсирование	
	4	Регулирование скорости	
	5	Торможение	
	6	Регулирование потока	
	7	Специальное управление тормозным электромагнитом	
	8	Защита от перегрузки	
	9	Нулевая защита (от снижения или исчезновения напряжения)	
	10	Грузовая или упорная защита	
	11	Защита от обрыва поля	
	12	Защита от неправильного начального положения пускового реостата	
	13	Защита от недопустимого противовключения	
	14	Защита от разноса	
Коммандо-производственные операции управления	1а	А. Регулирование в функции пути Путевые выключения Автоматический реверс	
	1б		Точная остановка
	1г		Промежуточное регулирование
	2а	Б. Регулирование в функции времени Промежуточное регулирование Программное регулирование	
	2б		Программное регулирование
	3а	В. Регулирование в функции нагрузки Промежуточное регулирование Программное регулирование	
3б	Программное регулирование		

101. Основные принципы автоматического управления пуском и торможением электродвигателей

Автоматическое управление пуском, реверсом и торможением электродвигателей требует постепенного автоматического шунтирования пусковых сопротивлений в цепи двигателя (двигатели постоянного тока и асинхронные двигатели с кольцами), переключения полярности подводимых к якорю проводов в двигателях постоянного тока и переключений двух фаз в асинхронных двигателях. Для автоматизации пусковых и тормозных режимов могут быть использованы все факторы, изменение которых связано с протеканием переходных режимов.

Соответствующие операции могут быть выполнены на основе следующих шести принципов, определяющих собой структуру цепей автоматического управления электроприводов: 1) принцип обратной электродвижущей силы (E); практически применяется в маленьких двигателях постоянного тока; 2) принцип ограничения тока (I), основанный на применении сериесных контакторов и сериесных реле, используемый в двигателях как постоянного тока, так и переменного тока; при переменном токе могут применяться лишь сериесные реле с шунтовыми контакторами; 3) принцип независимой выдержки времени (t), пригодный для всех типов электродвигателей; 4) принцип зависимой от тока выдержки ($I-t$), используемый ограниченно для двигателей как постоянного, так и переменного тока; 5) принцип частотный (ν), используемый преимущественно в синхронных двигателях, реже в асинхронных; 6) ионно-электронный принцип, применяемый как по линии ионно-электронного управления, так и по линии установки ионного привода. Этот последний рассматривается в следующей главе.

102. Магнитные пускатели для короткозамкнутых электродвигателей

Схемы автоматического управления односкоростными асинхронными короткозамкнутыми двигателями относятся к числу простейших. Здесь не требуется никаких переключений пусковых сопротивлений. Схема должна обеспечить возможность включений двигателя в сеть, его отключение в любое время и автоматическое отключение при перегрузке.

Схема для нереверсивного двигателя дана на рис. 139. Главная цепь двигателя показана жирными линиями, цепь управления — тонкими. Главная цепь двигателя содержит главные контакты трехполюсного линейного контактора L с его искрогасительными катушками и нагревательные элементы термического реле TR , предназначенного для защиты от перегрузки. Цепь управления состоит из кнопок: „пуск“ ($П$), „стоп“ ($С$), катушки контактора L , блокконтактов этого контактора L и контактов термического реле TR . При пуске нажимается кнопка $П$, контактор L замыкает свои контакты и шунтирует кнопку $П$, которая после этого может быть отпущена. Нажатие кнопки $С$ снимает напряжение с катушки контактора L , и двигатель отключается от сети. То же самое производится контактами термического реле TR при возникающей перегрузке двигателя.

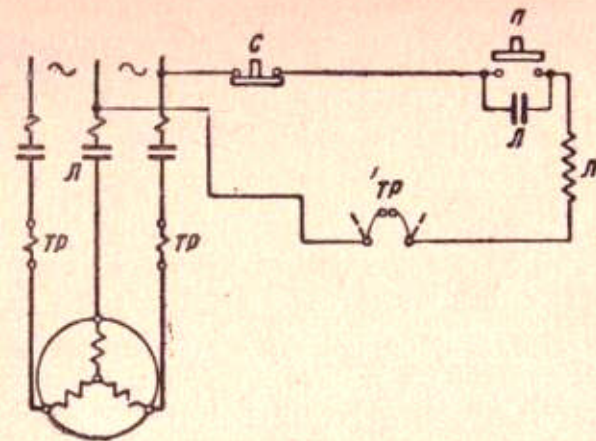


Рис. 139. Схема нереверсивного магнитного пускателя.

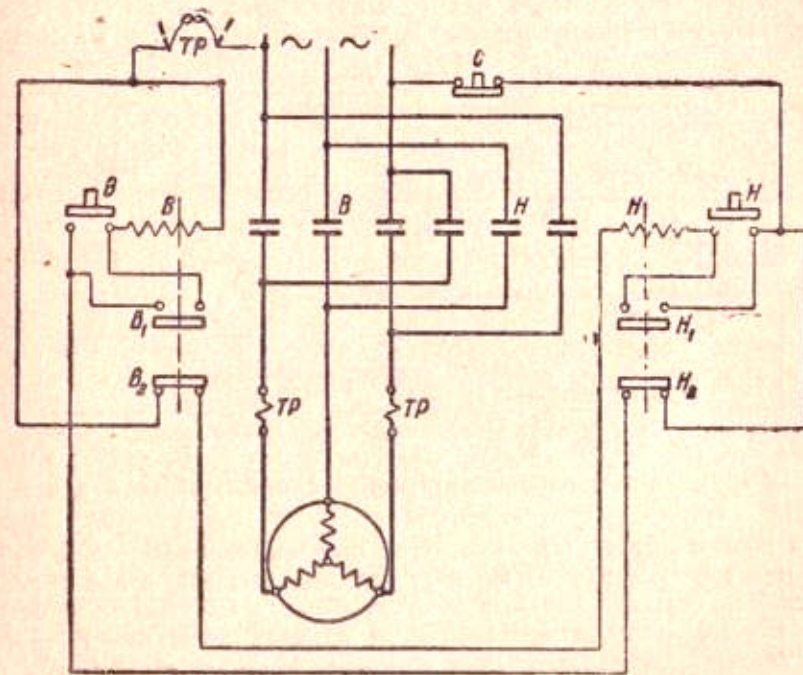


Рис. 140. Схема реверсивного магнитного пускателя.

На рис. 140 дана автоматическая схема управления реверсивным короткозамкнутым двигателем. Схема имеет два комплекта пусковых кнопок для пуска вперед — *В* и для пуска назад — *Н*. Каждая кнопка включает на сеть цепь катушки своего трехполюсного контактора вперед *В* или назад *Н*. Изменение направления вращения двигателем достигается переключением двух фаз сети. Во избежание одновременного включения двух кнопок для пуска вперед и назад, которое могло бы, например, получиться при приваривании контактов одной из кнопок и повело бы к короткому замыканию в сети, кнопки „вперед“ и „назад“ вспомогательными блокконтактами заблокированы так, что при нажатии одной включение второй не оказывает никакого влияния на работу схемы. Кнопка „стоп“ и контакты термического реле *ТР* общие для прямого и обратного включения двигателя.

Подобные схемы в СССР монтируются в чугунных или железных ящиках и носят название магнитных пускателей. Условное их обозначение — марка ПМ для неревверсивных пускателей и марка ПМР — для реверсивных. Изготавливаются они для мощностей двигателей до 75 кВт и напряжений до 500 в.

103. Принцип обратной электродвижущей силы

Схема для пуска неревверсивного серийного двигателя постоянного тока по принципу обратной э. д. с. дана на рис. 141. Схема предусматривает три ступени пускового сопротивления R_1 , R_2 и R_3 . При на-

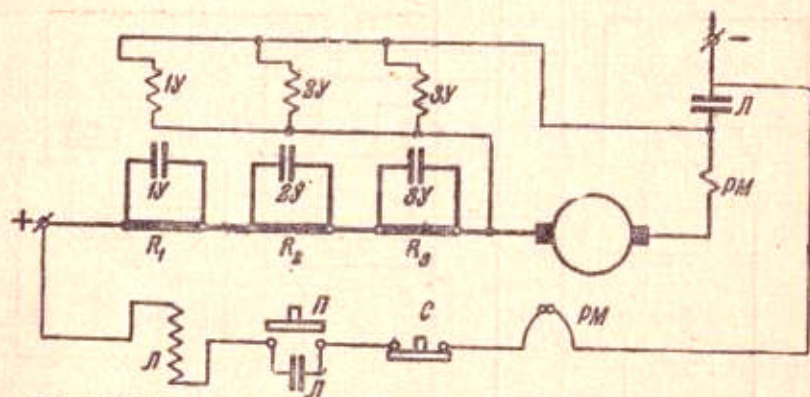


Рис. 141. Схема автоматизации пуска по принципу обратной э. д. с.

жати кнопки „пуск“ (*П*) включается линейный контактор *Л*, и двигатель начинает ускоряться. По мере разгона двигателя, в нем индуктируется все большая обратная э. д. с. $E = c \cdot n \cdot \Phi$. Вместе с ростом этой э. д. с. растет и напряжение на зажимах двигателя $V_d = E + I_a R_a \cong E$. Для автоматизации пускового процесса на зажимы якоря двигателя приключаются катушки трех пусковых контакторов *1У*, *2У*, *3У*, рассчитанных на втягивание своих сердечников, примерно *1У* при 40%, *2У* при 75% и *3У* при 90% номинального напряжения. Замыкание этих контакторов происходит в зависимости от величины обратной

э. д. с. двигателя *E*, отчего и произошло наименование принципа. Пусковые контакторы *1У*, *2У* и *3У* постепенно шунтируют пусковые сопротивления. При работе катушки контакторов нагреваются, сопротивление их увеличивается. Это обстоятельство затрудняет настройку контакторов на включение их при соответствующей скорости. Компромиссная, между холодным и нагретым состоянием катушек, настройка ведет частично к затяжке пуска, частично к чрезмерным толчкам тока. Поэтому данный принцип автоматизации пуска применяется обычно к двигателям постоянного тока мощностью не выше 2,5 кВт.

104. Принцип ограничения тока

С точки зрения предельных возможных толчков тока двигателя принцип ограничения тока обеспечивает наилучшие условия. Для осуществления соответствующей схемы в двигателях постоянного тока могут

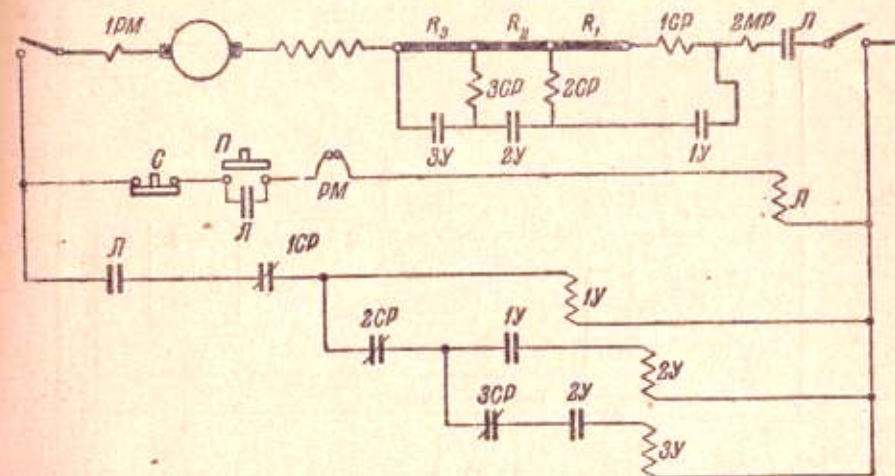


Рис. 142. Схема автоматизации пуска серийного двигателя по принципу ограничения тока.

быть применимы два варианта: 1) серийных контакторов; 2) шунтовых контакторов с серийными реле. В асинхронных двигателях с кольцами может быть применен лишь второй вариант.

Схема по второму варианту для неревверсивного серийного двигателя постоянного тока с тремя пусковыми сопротивлениями R_1 , R_2 и R_3 дана на рис. 142. Три последовательных (серийных) реле *1СР*, *2СР*, *3СР* с нормально закрытыми контактами включены в главную цепь двигателя. Контакты каждого реле включаются последовательно с катушкой соответствующего шунтового контактора *1У*, *2У* и *3У*. После включения двигателя на сеть нажатием кнопки „пуск“ — *П*, двигатель начинает вращаться. При этом через реле *1СР* начинает проходить ток. Реле *2СР* и *3СР* пока обесточены. Реле *1СР*, намагнитившись, вследствие своего быстрогодействия по сравнению с контактором, разорвет свои контакты раньше чем возбудится и сработает контактор *1У*. Когда, при ускоре-

и ин двигателя, сила тока в нем спадет до соответствующей величины: реле *ICP* отпустит свой якорек и замкнет контакты, чем включит катушку контактора. Напомним, что (п. 87) серийные контакторы и реле замыкают (или размыкают) свои контакты не при максимальной, а при некоторой меньшей силе тока. Контактор *IY* шунтирует пусковое сопротивление R_1 . Тем самым в цепь двигателя будет введено серийное реле *2CP*, которое будет работать как и реле *ICP*. В соответствующий период оно включит катушку контактора *2Y*, который зашунтирует сопротивление R_2 и введет в цепь двигатель реле *3CP*. Последнее будет

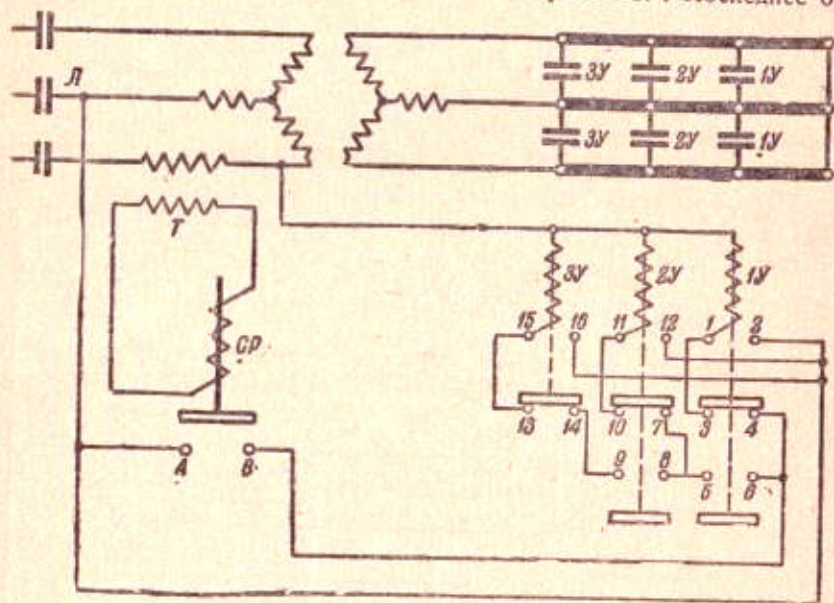


Рис. 143. Схема автоматизации пуска асинхронного двигателя по принципу ограничения тока.

работать аналогично реле *ICP* и *2CP* в соответствующий момент включит катушку контактора *3Y*. Для защиты двигателя в его цепь введены катушки максимальных реле *1PM* и *2PM*. Их контакты находятся в цепи управления. В целях упрощения схем (рис. 142 и аналогичных последующих) блокконтакты контактора *3Y*, отключающие от сети цепи катушек контакторов *1Y* и *2Y* после замыкания контактора *3Y*, не предусмотрены.

На рис. 143 показана схема управления пуском по принципу ограничения тока для трехфазного асинхронного двигателя с кольцами при трех ступенях пускового сопротивления.

Здесь использовано всего лишь одно серийное реле *CP*, введенное через трансформатор в цепь статора. Использование одного реле при трех контакторах *1Y*, *2Y* и *3Y* оказывается возможным потому, что все контакторы имеют добавочные блокконтакты, которыми себя (после включения их реле) блокируют (1—2 у контактора *1Y*, 11—12 у контактора *2Y*, 15—16 у контактора *3Y*). Кроме того, контактор *1Y*

имеет добавочные контакты 5—6, которыми он после своего включения подключает к контактам реле *CP* контакты 7 и 10 и катушку контактора *2Y*, а последний в дальнейшем соответственно контактами 9—8 подключает к контактам реле и катушку контактора *3Y*.

Работа серийного реле происходит последовательно три раза и аналогична работе любого из серийных реле в предыдущей схеме.

105. Принцип независимой выдержки времени

При использовании принципа независимой выдержки времени включение катушек шунтовых контакторов производится соответствующими

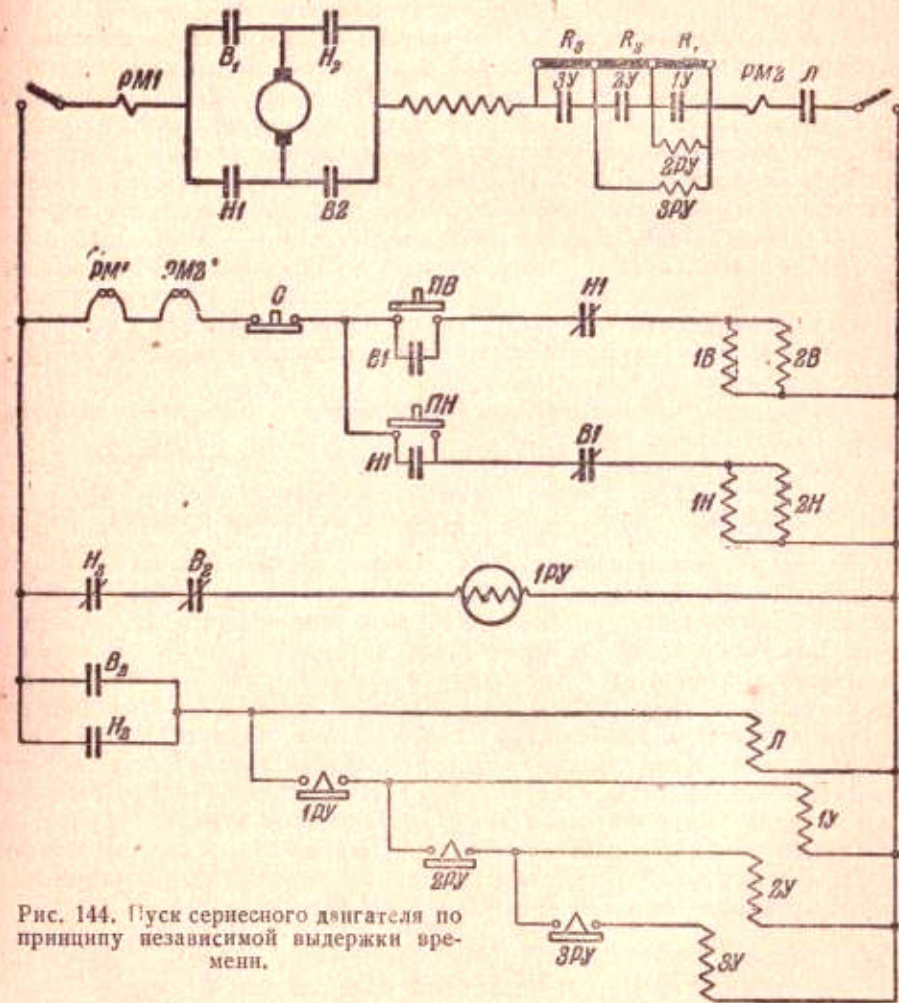


Рис. 144. Пуск серийного двигателя по принципу независимой выдержки времени.

реле времени — или электромагнитными постоянного тока, или реле переменного тока с воздушным или масляным катарактом, или, наконец, маятниковыми реле времени. При больших длительностях пуска, превы-

шающих, примерно, 30 сек., применяется двигательное реле времени. Мы ограничимся здесь лишь приведением схемы с электромагнитными реле постоянного тока, как наиболее распространенными.

Схема пуска реверсивного серийного двигателя постоянного тока с тремя пусковыми ступенями дана на рис. 144. Включение реверсивных контакторов вперед (*B*) производится соответствующими кнопками. Последовательно с кнопкой „стоп“ (*C*) введены контакты максимальных реле *PM*, отключающих двигатель при перегрузке. Катушки *PM1* и *PM2* введены в главную цепь двигателя. При включении контакторов *B* или *H* (последние заблокированы блокконтактами *B₁* и *H₁* так, что одновременно включены быть не могут) их вторые блокконтакты *B₂* или *H₂* снимают напряжение с катушки электромагнитного реле *IPY*. Последнее с определенной выдержкой времени своими контактами включает катушку шунтового контактора *IY*. Этот контактор своими контактами замыкает накоротко катушку электромагнитного реле *2PY*. Это последнее с определенной выдержкой времени включает катушку контактора *2Y*. В свою очередь последний при замыкании своих контактов замыкает на себя катушку реле *3PY*. Последняя, опять-таки с выдержкой времени, включает катушку контактора *3Y*. Для большей надежности работы схемы контакты *IPY* включаются последовательно с контактами *2PY* и *3PY*, а контакты *2PY* последовательно с контактами *3PY*. Выдержки отдельных электромагнитных реле настраиваются при наладке схемы. Так как электромагнитные реле времени могут работать лишь на постоянном токе, то в асинхронных двигателях меньших мощностей пользуются маятниковыми реле времени.

Схемы асинхронных двигателей большой мощности часто проектируют на постоянном токе.

106. Принцип зависимой от тока выдержки времени

Структура автоматических схем привода, построенных по принципу зависимой от тока выдержки времени, аналогична таковым для принципа ограничения тока с применением серийных реле и шунтовых контакторов. Вся особенность их заключается в том, что при использовании принципа зависимой от тока выдержки времени применяются специальные реле (например реле Райта), выдержка времени которых определяется характером изменения тока в двигателе. Принципиально этот метод с точки зрения наилучшего использования динамических свойств двигателя относится к числу наиболее совершенных, однако сложная конструкция соответствующих реле ограничивает пока его распространение. Идеи этого принципа по существу частично нашли свое отражение в современных электромагнитных и нонно-электронных схемах непрерывного управления приводом (амплидин, рототроль, таймотроль).

107. Частотный принцип

Частотный принцип используется иногда для автоматизации пуска асинхронных двигателей с кольцами и синхронных. При пуске этих двигателей в ход (а в асинхронном двигателе и при его работе) в роторе

их индуцируется ток частоты скольжения $\nu_2 = \nu_1 \cdot \sigma$, где ν_1 — частота питающего двигателя переменного тока, а σ — скольжение. Частота

$$\nu_2 = \frac{p(n_s - n_r)}{60},$$

где n_s — число оборотов в минуту вращающегося магнитного поля статора, n_r — число оборотов ротора. По мере разгона указанных типов

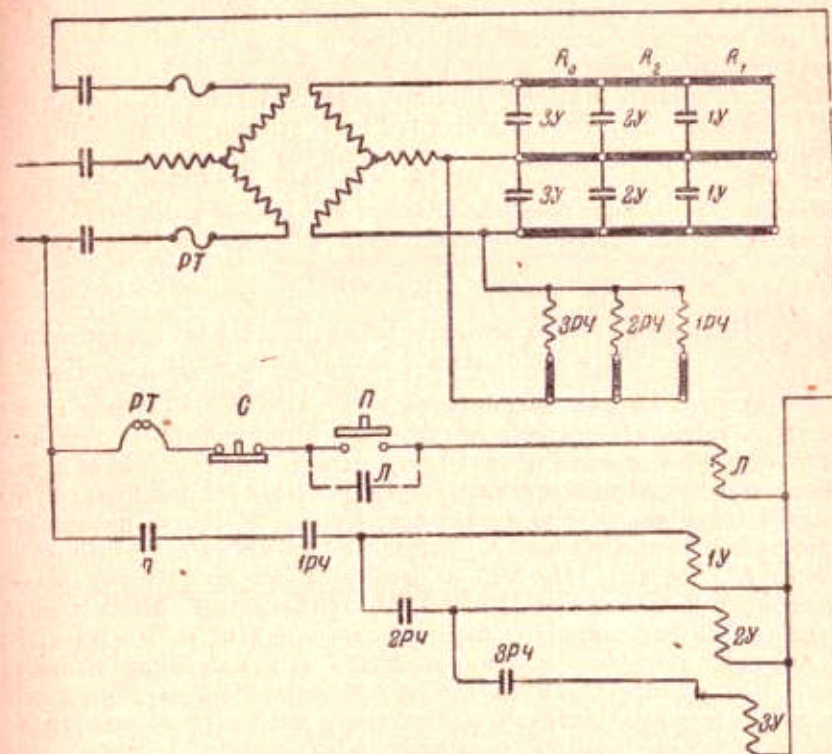


Рис. 145. Схема управления пуском асинхронного двигателя по частотному принципу.

двигателей, частота тока в обмотках их роторов (в случае синхронного двигателя в обмотке возбуждения) меняется от $\nu_2 = \nu_1$ при покое двигателя до $\nu_2 = 1 \rightarrow 3$ пер/сек около синхронной скорости. Одновременно с изменением частоты меняется пропорционально и индуцированная в роторе э. д. с. Это обстоятельство и может быть использовано для автоматизации пуска и торможения.

В цепь ротора включаются частотные электромагнитные реле, которые при определенной частоте ν_2 , т. е. при определенной скорости асинхронного двигателя, своими контактами включают катушки соответствующих контакторов, шунтирующих пусковые сопротивления.

Простейшая схема для автоматизации пуска асинхронного двигателя с кольцами по частотному принципу дана на рис. 145. Схема предусма-

включают первое реле усиления поля *1РУП*. Это реле с выдержкой времени включает второе реле усиления поля *2РУП*. Это последнее шунтирует оставшуюся часть реостата в цепи возбуждения.

Схемы с кнопочным управлением удобны лишь для тех производственных процессов, которые могут быть полностью автоматизированы. В случае невозможности полной автоматизации и необходимости устанавливать несколько скоростей по ходу процесса на основании наблюдения за ним (например крановые установки, некоторые вспомогательные механизмы металлургических заводов) приходится прибегать к схемам с командоконтроллерами.

109. Полуавтоматическое управление электроприводами с командоконтроллерами

При полуавтоматическом управлении командоаппарат служит для установки промежуточных скоростей и определения момента реверсирования на основании наблюдения машиниста за ходом производственного процесса. Во всем остальном работа подобных схем протекает автоматически.

На рис. 147 представлена полуавтоматическая схема управления реверсивным двигателем постоянного тока посредством командоконтроллера. Главная цепь двигателя показана толстыми линиями, цепь управления — тонкими. Автоматизация пуска в схеме рис. 147 производится по принципу независимой выдержки времени с применением двух электромагнитных реле *1РУ* и *2РУ*. Для торможения применено противовключение. Управление торможением ведется по принципу обратной э. д. с. двумя реле торможения *РПВ* для прямого хода и *РПН* для обратного хода. В зависимости от постановки командоконтроллера на то или другое положение двигатель будет работать на той или другой скорости.

Контактор противовключения *КП* и контакторы ускорения *1У* и *2У* возбуждаются лишь в том случае, если командоконтроллер поставлен в соответствующее положение и если возбуждены реле противовключения *РПВ* или *РПН*. Пуск в схеме протекает следующим образом. При постановке командоконтроллера на третье положение вперед замыкаются контакторы прямого хода *1В* и *2В* и линейный контактор *Л*. Приложение к реле противовключения вперед *РПВ* напряжение, суммирующееся алгебраически из обратной э. д. с. двигателя *E* и падения напряжения в сопротивлениях R_1 и R_2 , заставляет возбудиться реле противовключения вперед *РПВ*. Это реле, замкнув свои контакты, сразу возбудит контактор противовключения *КП*. Далее двигатель будет ускоряться автоматически по принципу независимой выдержки времени. Контактор *КП* шунтирует реле *1РУ*, последнее включает контактор *1У*. Этот контактор шунтирует реле *2РУ*, а оно, в свою очередь, включает контактор *2У*.

На случай перегрузки двигателя и исчезновения в сети напряжения, в схеме предусмотрено реле нулевого напряжения *РН*. Катушка этого реле получает намагничивание на нулевом положении командоконтроллера и замыкает свои контакты *РН*. Далее в схему и в само реле *РН* подается напряжение именно через эти контакты.

При перегрузке двигателя и при размыкании контактов максимальных реле *РМ*, т. е. при исчезновении напряжения сети, реле *РН* намагничивается, размыкает свои контакты, и все контакторы выпадают. Для того, чтобы схема вновь начала работать при подаче напряжения, командоконтроллер должен быть обязательно поставлен в нулевое положение.

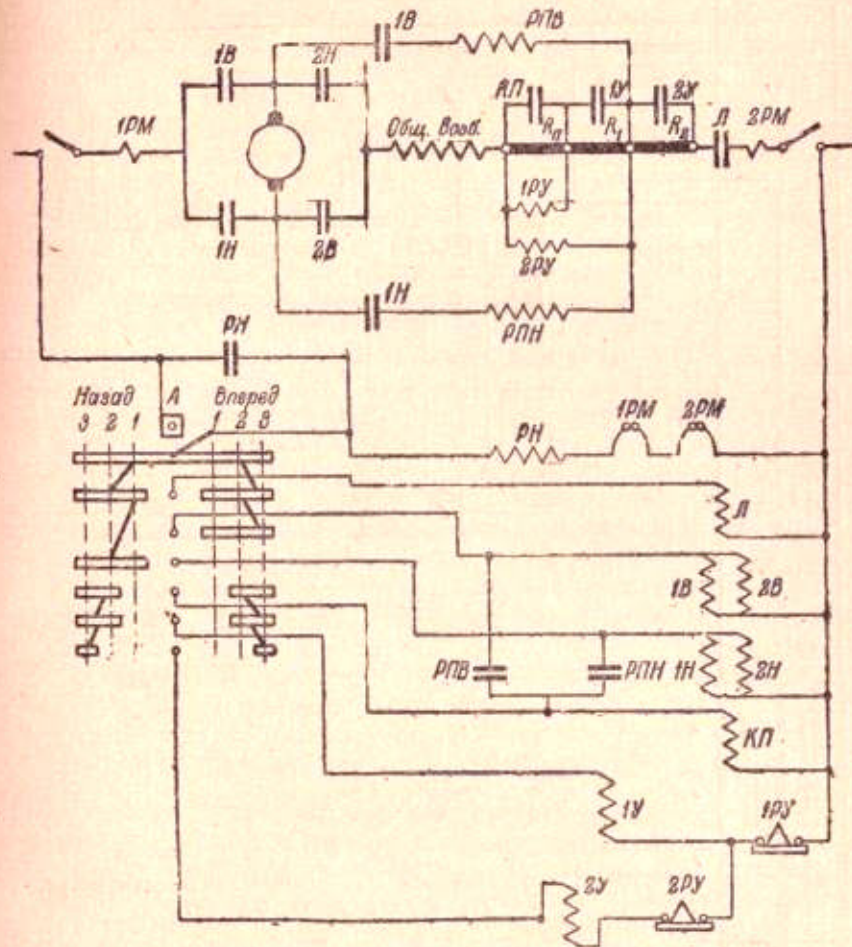


Рис. 147. Управление двигателем постоянного тока посредством командоконтроллера.

Реверсирование двигателя протекает следующим образом. Для торможения и реверса командоконтроллер переставляется с положения вперед на третье положение назад. При этом при переходе через нулевое положение теряют возбуждение контакторы *Л*, *1В*, *2В*, *1У*, *2У*, *КП* и реле *РПВ*. Все они размыкают свои контакты. В положении контроллера «назад» замкнутся контакторы *Л*, *1Н*, *2Н* при прежнем направлении вращения двигателя. Реле противовключения назад *РПН* замкнет свои

контакты не сразу. Двигатель будет работать в режиме противовключения с добавочным сопротивлением в его цепи $R_{Д}$. По достижении некоторой минимальной скорости замкнется реле $РПН$, и далее процесс будет протекать так же, как и при пуске вперед.

На рис. 148 дана схема управления посредством командоконтроллера асинхронным двигателем с кольцами. В ней для автоматизации пуска

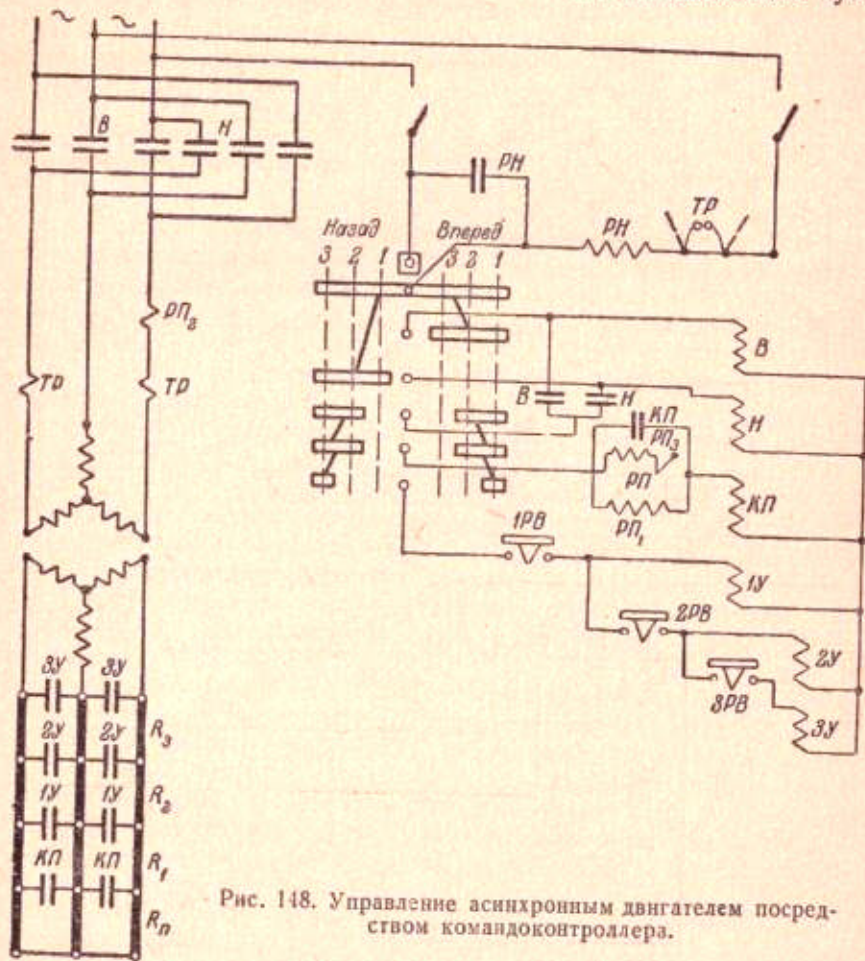


Рис. 148. Управление асинхронным двигателем посредством командоконтроллера.

применен принцип независимой выдержки времени. Торможение осуществляется по принципу противовключения. Для автоматизации торможения использован принцип ограничения тока. В цепи ротора асинхронного двигателя имеется три пусковых сопротивления R_1, R_2, R_3 и одно сопротивление противовключения $R_{Д}$. Принцип независимой выдержки времени осуществлен посредством маятниковых механических реле $1РВ, 2РВ$ и $3РВ$. Эти реле заводятся контакторами (п. 92) и никаких электрических элементов, кроме контактов, замыкающих катушки контакторов, не имеют.

Реле противовключения $РП$ имеет три катушки: шунтовую $РП_1$, серийную $РП_2$ и удерживающую $РП_3$ (см. п. 91). При постановке командоконтроллера на третье положение, например вперед, через катушку $КП$ и блокконтакт $В$ включается шунтовая катушка $РП_1$. Контакт $КП$ при этом не включится, так как большая часть напряжения придется на катушку $РП_1$. Так как при введенном в цепь ротора добавочном $R_{Д}$ сила тока двигателя будет меньше установочной для реле $РП$, то замкнутся контакты $РП$, включится удерживающая катушка $РП_3$ и через нее контактор противовключения $КП$, блокирующая своими блокконтактами серийное реле. Контакт $КП$ обеспечит работу первого маятникового реле времени $1РВ$, которое включит контактор $1У$. Этот последний вызовет работу реле $2РВ$; это реле включит контактор $2У$. Контакт $2У$ введет в действие реле $3РВ$, а оно уже включит контактор $3У$.

Для реверса или торможения командоконтроллер быстро переводится с третьего положения „вперед“ на третье положение „назад“. При этом замкнется контактор назад $Н$. В результате через блокконтакт $Н$ включится шунтовая катушка реле противовключения $РП_1$. Двигатель, вследствие переключения двух фаз, будет сначала работать в режиме противовключения, вращаясь в первый момент с прежней скоростью. Так как сила тока двигателя, несмотря на наличие в роторе добавочного сопротивления $R_{Д}$, будет больше допустимой, то контактор противовключения не замкнется до тех пор, пока сила тока не спадет до некоторой фиксированной установкой реле $РП$ величины тока. Весь дальнейший процесс реверса протекает так же, как и при пуске вперед. Если требуется применить противовключение для быстрой остановки двигателя, то командоконтроллер ставится на крайнее положение другого направления вращения. Когда двигатель подходит к нулевой скорости, командоконтроллер должен быть возвращен на нулевое положение. Роль реле нулевого напряжения та же, что и в предыдущей схеме для двигателя постоянного тока. Защита от перегрузки достигается контактами термического реле $ТР$, введенными в цепь катушки $РН$.

110. Программное управление и регулирование

Программное управление и регулирование в автоматизированном приводе применяется в тех случаях, когда рабочий цикл исполнительного механизма содержит ряд разнородных операций, которые следуют одна за другой в определенной последовательности, требующей изменения режима работы электропривода. Весьма часто программное управление применяется при совместной комплексной автоматизации целой группы электроприводов, вращающих механизмы, которые должны работать с вполне определенной последовательностью. В тех случаях, когда эта последовательность проста и не требует большой точности во времени, необходимая связь достигается простыми блокировками, конечными выключателями. При точной неизменной временной связи отдельных звеньев процесса или рабочей машины или нескольких рабочих машин применяются несколько реле времени, обеспечивающих соответствующие блокировочные связи между связуемыми электроприводами. В тех случаях, когда необходимо менять последовательность работы отдельных

электроприводов, применяют специальные программные контроллеры с приводом от отдельного электродвигателя. Подобные аппараты позволяют произвольную установку нужной последовательности отдельных взаимно блокируемых электроприводов. Иногда в схему включаются счетные реле. Применяется также принцип селекции, т. е. избирательность действия отдельных элементов наподобие автоматических телефонных аппаратов.

Глава XIII

Ионно-электронное управление электроприводами

111. Преимущества и недостатки ионно-электронной автоматики в электроприводе

Ионно-электронные аппараты сравнительно широко стали применяться в электроприводе с конца двадцатых годов нашего столетия. Основными их преимуществами перед контрольно-релейными аппаратами являются их высокая чувствительность и практическая безинерционность. К их плюсам следует отнести также простую возможность выпрямления переменного тока. Важными в ряде случаев являются: возможность управления при отсутствии контактов, отсутствие в этих приборах движущихся частей, вибраций и шума. К некоторым недостаткам их следует отнести относительную неидентичность характеристик ионных ламп одного и того же типа. Применение для целей управления электродвигателями ионно-электронных аппаратов может быть рекомендовано тогда, когда они дают существенные производственные выгоды.

112. Термоэлектронные вакуумные лампы

Двухэлектронная лампа состоит из катода, испускающего электроны под влиянием нагрева, и анода, собирающего электроны. Ток через двухэлектродную лампу (рис. 149) может проходить лишь в одном направлении от анода к катоду, почему эта лампа является выпрямителем переменного тока. Катоды ламп конструируются или из вольфрама или из окислов металлов. Наибольшее распространение из последних получил окисел бария — стронция.

Для техники электропривода наибольшее значение имеют многоэлектродные лампы, в первую очередь трехэлектродная, так называемый триод. В триоде к аноду и катоду добавляется сетка, располагаемая между анодом и катодом. Регулируя напряжение, приложенное между сеткой и катодом, можно мгновенно и притом в очень широких пределах менять ток, протекающий между анодом и катодом. Это дает возможность, кроме выпрямления, получать от трехэлектродной лампы также усиление.

При некоторых условиях основная цепь лампы анод — катод начинает оказывать обратную реакцию на цепь сетка — катод. Это затрудняет управление лампой. В целях устранения этого недостатка, в ряде случаев в лампу вводится дополнительная экранирующая сетка. Лампа

становится четырехэлектродной и называется тетродом. Такая экранированная лампа обладает очень высокой чувствительностью.

Схемы соединений трехэлектродной и четырехэлектродной ламп даны на рис. 150. В этих схемах главная цепь лампы питается аккумулятор-

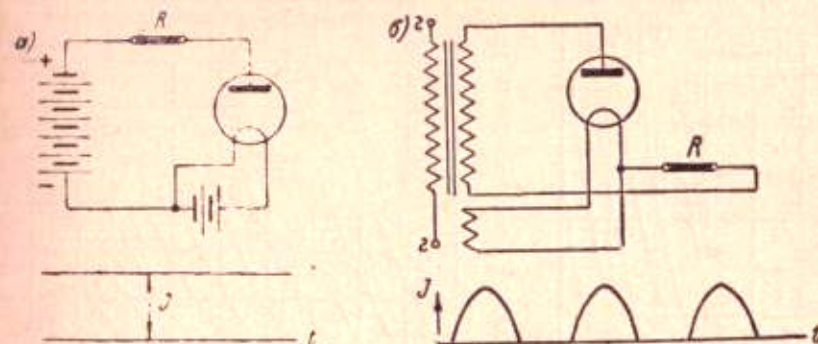


Рис. 149. Схема цепи с двухэлектродной лампой.

ной батареей. Вторая батарея подает напряжение на цепь сетка — катод. В зависимости от величины последнего напряжения меняется ток, проводимый лампой от анодной батареи. На сетку лампы могут подаваться

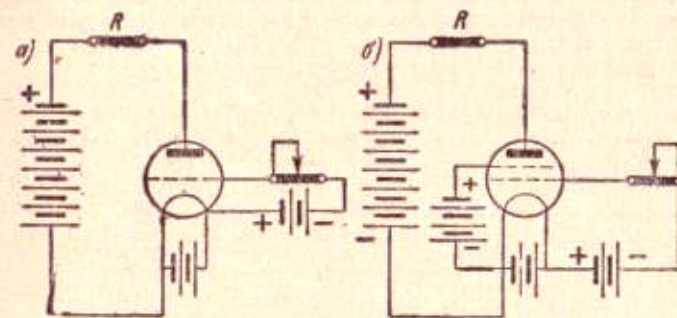


Рис. 150. Схемы включения трех- и четырехэлектродных ламп.

те или другие импульсы. Будучи усилены лампой, они передаются главной цепью лампы тому или другому реле управления или через следующую лампу в цепь возбуждения небольшого двигателя постоянного тока.

113. Характеристики трехэлектродной лампы

Согласно уравнению Ричардсона, ток эмиссии лампы, т. е. количество электронов, испускаемых в 1 сек. с 1 см^2 металлической поверхности катода, равняется:

$$I = A \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{\phi_0}{k \cdot T}} \text{ а/см}^2.$$

В этом равенстве A — некоторая постоянная, равная для всех чистых металлов $60,2$; T — абсолютная температура катода в градусах Кельвина,

e — основание натуральных логарифмов, k — постоянная Больцмана, равная $0,863 \cdot 10^{-4}$ в/градус, Φ_0 — работа выхода металла из катода, для вольфрама равная $4,52$ в (работой выхода металла называется коли-

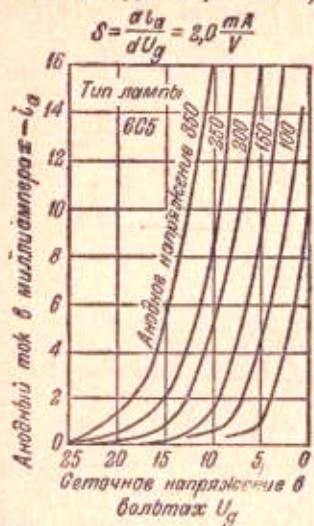


Рис. 151. Характеристики трехэлектродной лампы при параметре — анодном напряжении.

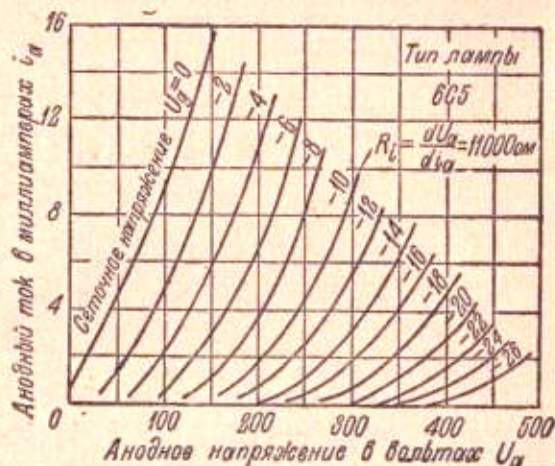


Рис. 152. Характеристики трехэлектродной лампы при параметре — сеточном напряжении.

чество энергии, необходимое для того, чтобы вырвать электрон из металла). Выраженная в эргах эта работа для разных металлов равняется от 10^{-12} до 10^{-11} э.

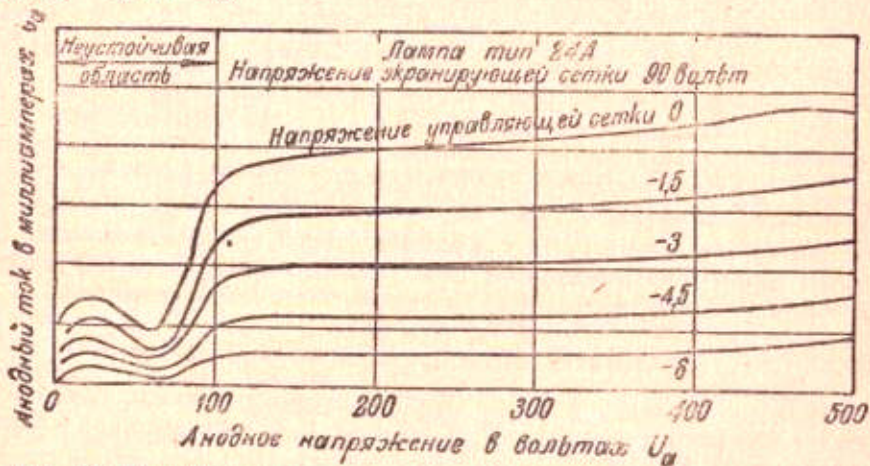


Рис. 153. Характеристики четырехэлектродной экранированной лампы при параметре — сеточном напряжении.

Сеточные характеристики трехэлектродной лампы для различных анодных напряжений, т. е. зависимость анодного тока i_a от сеточного

напряжения U_g , для разных напряжений между анодом и катодом показаны на рис. 151.

На рис. 152 представлены характеристики типичной трехэлектродной лампы, дающие зависимость анодного тока от анодного напряжения. Параметром семейства кривых является сеточное напряжение. На рис. 153 даны зависимости анодного тока от анодного напряжения.

Для экранированной лампы параметром кривых является сеточное напряжение.

Основных параметров трехэлектродных ламп три: внутреннее сопротивление, коэффициент усиления и крутизна характеристики. Под внутренним сопротивлением лампы понимается отношение R_i малого приращения напряжения dU_a к малому приращению анодного тока di_a (при постоянном сеточном напряжении):

$$R_i = \frac{dU_a}{di_a}$$

Внутреннее сопротивление лампы меняется в зависимости от режима ее работы. Обычно его относят к номинальному значению анодного тока лампы.

Коэффициент усиления лампы μ характеризуется отношением малого изменения анодного напряжения dU_a к такому изменению сеточного

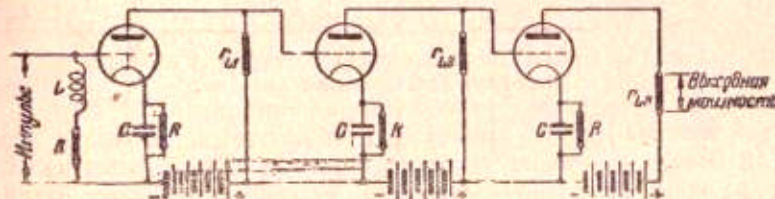


Рис. 154. Схема каскада из трехэлектродных ламп.

напряжения dU_g , которое вызывает такое же изменение анодного тока, как и dU_a (при постоянном анодном токе):

$$\mu = \frac{dU_a}{dU_g}$$

коэффициент усиления современных ламп может колебаться от 3,5 до 1500.

Третий параметр лампы — крутизна характеристики S — представляет отношение коэффициента усиления лампы к внутреннему сопротивлению лампы (при постоянном анодном напряжении):

$$S = \frac{di_a}{dU_g}$$

Если усиление, даваемое схемой с одной лампой, недостаточно, то оно может быть увеличено несколькими ступенями ламп. Коэффициент усиления каскада (нескольких ступеней ламп) равен произведению коэффициентов усиления отдельных ступеней. На рис. 154 дана схема каскада из трех ламп.

Выходное напряжение первой лампы подается на цепь сетка — катод второй, выходное напряжение второй лампы подается в свою очередь на цепь сетка — катод третьей.

114. Некоторые типичные применения электронных ламп в электроприводе

На рис. 155 показана упрощенная схема поддержания постоянства скорости маленького двигателя постоянного тока воздействием на его

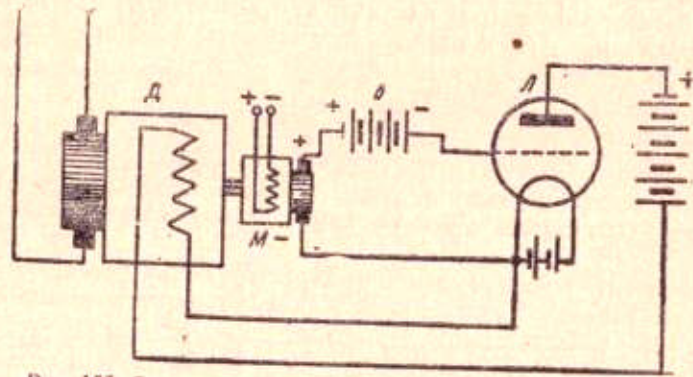


Рис. 155. Схема для поддержания постоянства скорости двигателя электронными лампами.

ток возбуждения. На вал двигателя D насаживается небольшая таходинамо M . Всякое изменение скорости двигателя D отзывается на напряжении машины M . Напряжение этой машинки соединяется навстречу

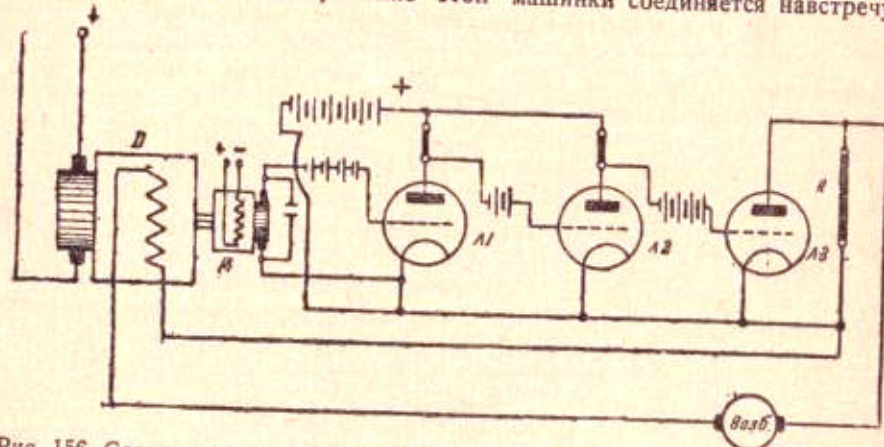


Рис. 156. Схема каскада ламп для поддержания постоянства скорости привода бумагоделательной машины.

напряжению аккумуляторной батареи B . Изменение напряжения машины M вызывает изменение напряжения на сетке электронной лампы L , а стало быть и тока возбуждения двигателя. На рис. 156 представлена принци-

пиальная схема каскада ламп, применяемого для поддержания постоянства скорости привода бумагоделательной машины.

Для управления процессами пуска и торможения электродвигателей, при использовании принципа независимой выдержки времени, используются (п. 92) электромагнитные реле времени РЭ. Однако роль реле времени вполне может быть выполнена электронной лампой. Схема простого электронного реле времени дана на рис. 157. В этом случае анодная цепь электронного реле включается последовательно с обмоткой электромагнитного реле P . Цепь накала лампы питается от сети через трансформатор переменным током. Питание лампы от сети переменного тока, в целях использования двухполупериодного выпрямления, производится через купроксы (п. 97). В цепь катод — сетка включено сопротивление R и конденсатор C_1 . Таким образом, потенциометрическое сопротивление R_1 , изменяющее напряжение на сетке, определяемое ком-

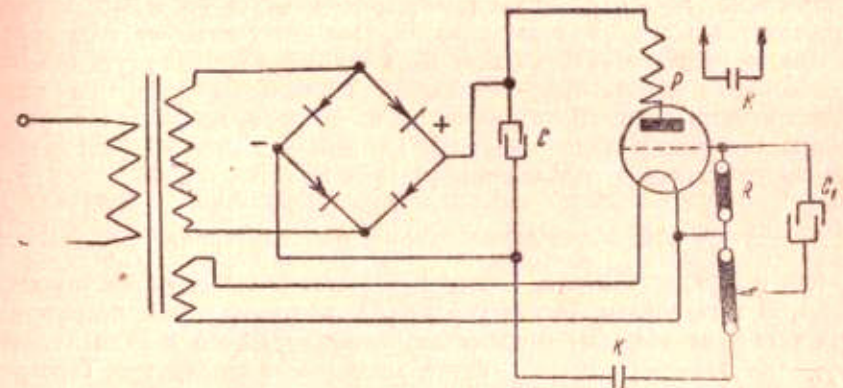


Рис. 157. Схема электронного реле времени.

бинацией величины сопротивления R и емкости C_1 , и фиксирует выдержку реле. Замыкание контактов K определяет начало выдержки времени до замыкания контактов K_1 реле. Выдержки времени в таких реле изменением емкости C_1 и сопротивления R могут регулироваться в пределах 0,045—0,9 сек., 0,15—3 сек., 0,6—12 сек., 3—60 сек., 6—120 сек.

115. Ионные аппараты, применяемые в электроприводе

Электронные лампы нашли распространение в приводе преимущественно в цепях управления. В силу ограниченности протекающих через них токов для питания главных цепей двигателей постоянного тока, кроме маломощных, они применения не получили. Давая возможность плавного, непрерывного управления и высокой точности, вакуумные лампы дают возможность управления лишь незначительными мощностями. Поэтому они нашли преимущественное распространение в радиотехнике. Для целей промышленного привода более подходящими оказались газонаполненные лампы.

Газонаполненные лампы имеют преимущество меньшего потребления энергии в них. Внутри электронных ламп создается большой объемный заряд электронов. Для его преодоления к лампам нужно прикладывать высокое напряжение до 1000 в. В газонаполненных лампах объемный заряд компенсируется получающимися, в результате разложения молекул газа, положительными ионами. Падение напряжения в дуге ионных аппаратов составляет всего 10—20 в. Собственная мощность потребления таких ламп уменьшается почти в 100 раз по сравнению с электронными. Двух-электродная наполненная газом лампа называется газотроном. Газотроны могут проводить ток тоже только в одном направлении. Это определяется свойствами их катода и анода. Обычно газотроны наполняются парами ртути. Обусловленное последним давлением внутри лампы определяется ее температурой и может составлять от 0,0002 мм ртутного столба при 0°C до 0,01 мм при 85°C.

Для промышленного применения наибольшее значение имеют газонаполненные лампы с третьим электродом — сеткой. В этих лампах используется оксидный горячий катод. Они носят название тиратронов. Вместо твердого катода может быть применен жидкий ртутный катод с добавочным зажигателем — игнитром. Такие типы аппаратов называются игнитронами. В промышленном приводе применяются также ионные аппараты с жидким ртутным катодом и с регулируемой сеткой. Это многоанодные и одноанодные ртутные выпрямители.

116. Управление зажиганием тиратрона

Как и всякий газотрон, тиратрон является выпрямляющим ток аппаратом. В электронных лампах управление анодным током посредством воздействия на величину напряжения, прикладываемого к цепи сетки —

катод, можно вести непрерывно. Тиратрон, в силу заполнения его баллона газом, этой способностью не обладает. Если к тиратрону (цепи анод—катод) приложить напряжение переменного тока, то тиратрон будет пропускать ток лишь в одном направлении. При подаче на тиратрон соответствующего напряжения внутри тиратрона происходит ионизация газа. Время ионизации составляет 1—50 микросекунд. При переходе напряжения переменного тока к другому направлению, ток через тиратрон не проходит, и газ ионизируется. Время деионизации доходит иногда до 1000 микросекунд.

Воздействуя на тиратрон подачей напряжения между сеткой и анодом, можно задержать зажигание тиратрона при положительной волне напряжения и даже совсем не допустить зажигания. На рис. 158 показана зависимость зажигающего напряжения на аноде от напряжения между катодом и сеткой. Тиратрон зажигается лишь при напряжениях сетки, лежащих вверх от кривой. При наличии на тиратроне напряжений анодной и сеточной цепей ниже кривой (заштрихованная площадь)

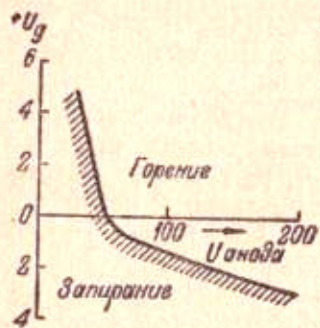


Рис. 158. Зажигающее напряжение тиратрона.

тиратрон не зажигается. Особенность тиратрона заключается в том, что, будучи зажжен в каком-либо полупериоде переменного тока, в течение этого полупериода он погашен уже быть не может. Подобные условия происходят из-за того, что после ионизации пространства тиратрона положительные ионы обволакивают отрицательно заряженную сетку, и последняя воздействует на процесс тиратрона, до прекращения ионизации в данном полупериоде переменного тока, уже не может. В этом основная особенность работы тиратрона по сравнению с электронными лампами. В последних сетка может воздействовать на анодный ток в любой момент времени.



Рис. 159. Регулирование прохождения тока через тиратрон.

На рис. 159 показано, как можно регулировать прохождение тока через тиратрон. Периоды, в течение которых ток не проходит, показаны заштрихованными. Изменение периода зажигания можно производить изменением напряжения на сетке (будем так сокращенно называть напряжение между сеткой и катодом).

Наиболее простой способ регулирования этого напряжения заключается в изменении его фазы. Иллюстрация дается рис. 160. Выше оси

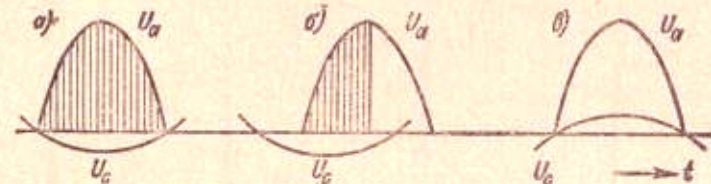


Рис. 160. Регулирование периода зажигания тиратрона сдвигом фазы напряжения.

абсцисс показана положительная волна меняющегося напряжения переменного тока в анодной цепи, ниже оси абсцисс отрицательное напряжение сетки, получаемое от той же сети переменного тока, т. е. той же частоты, что и анодное. Величина сеточного напряжения может быть в соответствии с рис. 158 подобрана так, что (рис. 160, а) ток через тиратрон проходить не будет. Если же мы сместим фазу этого напряжения относительно анодного напряжения (рис. 160, в), то тем самым можем отпереть тиратрон полностью для положительной волны переменного тока. Рис. 160, б дает промежуточные условия.

Изменение фазы сеточного напряжения может производиться или фазорегулятором, или схемой моста Витстона с комбинацией сопротивления, самоиндукции и емкости.

Фазорегулятор представляет заторможенный трехфазный асинхронный двигатель. Статор его включается в сеть и создает вращающееся магнитное поле. Ротор его заторможен. В обмотках ротора индуктируются э. д. силы. Фаза этих э. д. сил зависит от поворота ротора, так как

поворот его вызывает более позднее или более раннее пересечение стержней ротора максимумом поля статора. Схема с фазовым мостом будет рассмотрена ниже.

117. Принципиальные схемы ионного привода постоянного тока

Для практических целей рациональней использовать двухполупериодное выпрямление переменного тока по схеме рис. 161. Для него требуется два тиристора — один для положительной волны напряжения, другой для отрицательной. В схеме предусмотрено изменение фазы сетевого напряжения по схеме моста. В течение первого полупериода переменного тока ток проходит через один тиристор T_1 и через дви-

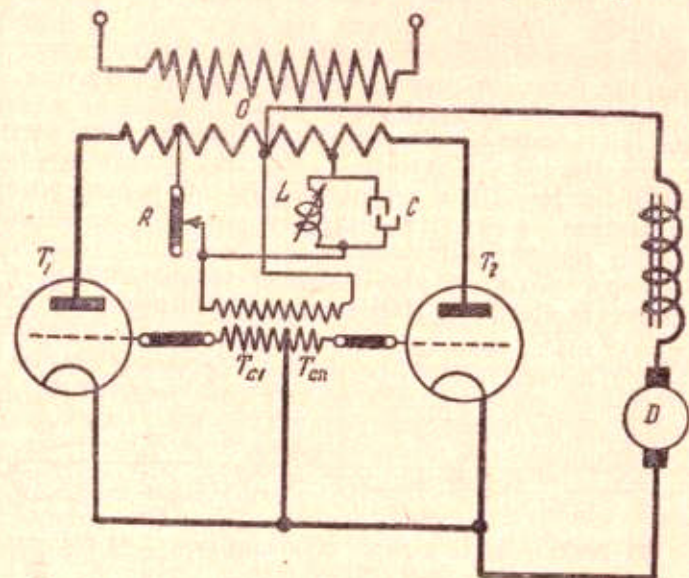


Рис. 161. Схема ионного привода с двухполупериодным выпрямлением.

гатель возвращается к нулевой точке трансформатора O (тиристры всегда включаются на сеть через трансформатор). В течение второго полупериода ток проходит через второй тиристор T_2 (первый не пропускает напряжения этого направления) и далее через двигатель опять к нулевой точке трансформатора. Цепи накала тиристоров (катоды) разогреваются отдельным трансформатором, не показанным на рисунке. Напряжение переменного тока на сетки от части вторичной обмотки трансформатора через сопротивление R и регулирующую самоиндукцию L подается на сеточный трансформатор с двумя вторичными обмотками T_{c1} и T_{c2} . В цепь сеток введены добавочные сопротивления. Меняя величину самоиндукции L , можно регулировать фазу сетевого напряжения, т. е. фазу зажигания тиристора.

Лучшие условия работы двигателя постоянного тока с меньшей пульсацией силы выпрямленного тока получаются при трехфазной схеме,

представленной на рис. 162. Здесь ток поочередно проходит через три тиристора. Для уменьшения пульсации тока в цепь двигателя введена самоиндукция L . Регулирование сетевого напряжения производится фазорегулятором ΦP . Для получения более резкого импульса зажигания между сетками и фазорегулятором введены соответствующие добавочные трансформаторы, называемые пиковыми — $ПТ$.

Величина выпрямленного напряжения постоянного тока является средним напряжением за время работы тиристорных. Численно она равна:

$$E_{no} = \sqrt{2} \cdot E_p \cdot \frac{\sin \pi/p}{\pi/p},$$

где E_p — действующее фазное напряжение переменного тока, p — число фаз установки. В однофазной системе с двумя тиристорами p следует принимать равным 2.

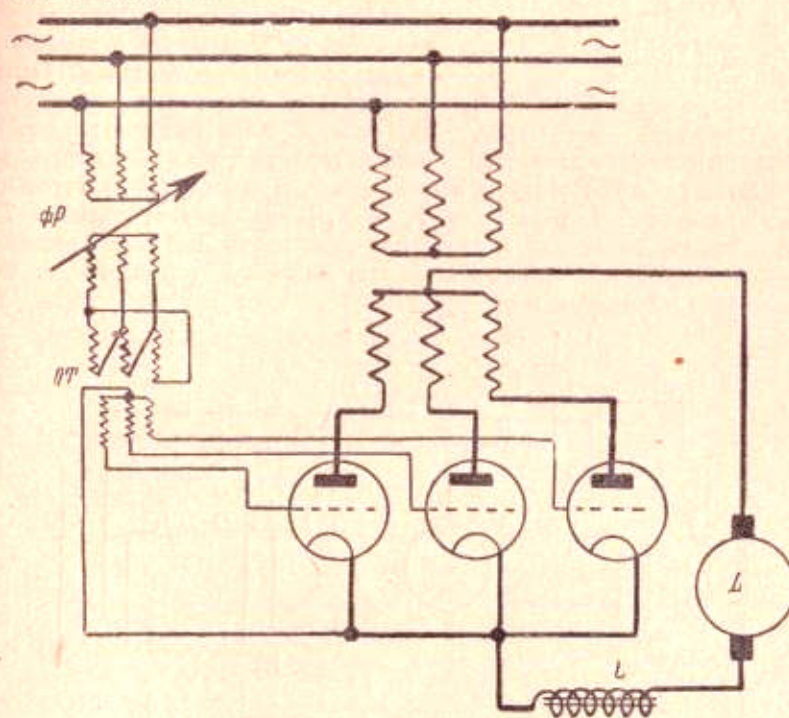


Рис. 162. Схема ионного привода при трехфазном токе.

Регулируя напряжение на сетке тиристоров, можно просто регулировать напряжение постоянного тока от нуля до максимума, т. е. осуществлять безреостатный пуск двигателя постоянного тока.

118. Механические характеристики ионного привода постоянного тока

Ионный электропривод постоянного тока обладает свойствами такой же широкой регулировки напряжения скорости двигателя за счет регулирования напряжения тиристорных, как и система Леонарда. Пре-

делы регулирования в нем достигают от 20:1 до 40:1 и выше. Механические характеристики такого привода, для трех различных углов зажигания тиратронов α , представлены на рис. 163.

Они подобны таковым в системе Леонарда. При малых токах нагрузки двигателя характеристики получают неустойчивый серпиевый характер за счет особенностей горения дуги при малых токах.

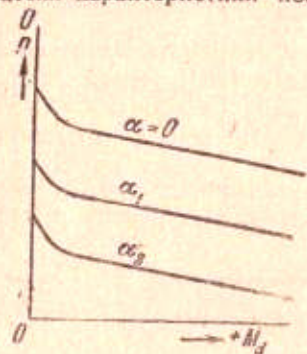


Рис. 163. Механические характеристики ионного привода.

Описанные выше схемы не дают возможности осуществления рекуперации энергии, так как тиратроны не пропускают тока в другом направлении. В приведенных ранее схемах привода (рис. 161 и 162) может быть использовано лишь динамическое торможение с отключением главной цепи двигателя от тиратронов и замыканием ее на особое сопротивление. Однако рекуперация может быть осуществлена, если в схеме применить двойное количество тиратронов — четыре в однофазной схеме (рис. 164) и шесть в трехфазной. При этом для двигательного режима используются тиратроны T_1 и T_1' , для рекуперативного T_2 и T_2' . Все четыре тиратрона должны при этом иметь некоторое связанное общее сеточное управление с помощью фазорегуляторов ΦP_1 и ΦP_2 . Механические характеристики при этом получают вид рис. 165. Здесь

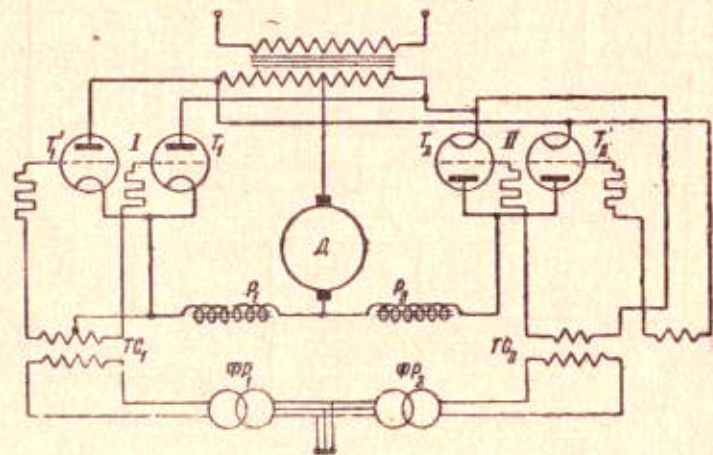


Рис. 164. Схема ионного привода с рекуперативным (инверторным) режимом.

генераторные характеристики параллельны двигательным, но не являются их продолжением. Они смещены по оси ординат на расстояние, соответствующее, примерно, двойному падению в дуге тиратрона $2 \cdot \Delta U$, так как при двигательном режиме падение в дуге покрывается тиратроном, а при рекуперативном, называемом в отношении тиратронов инверторным, — двигателем.

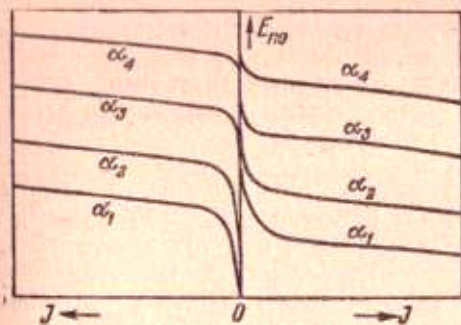


Рис. 165. Механические характеристики ионного привода при валичии инверторного режима.

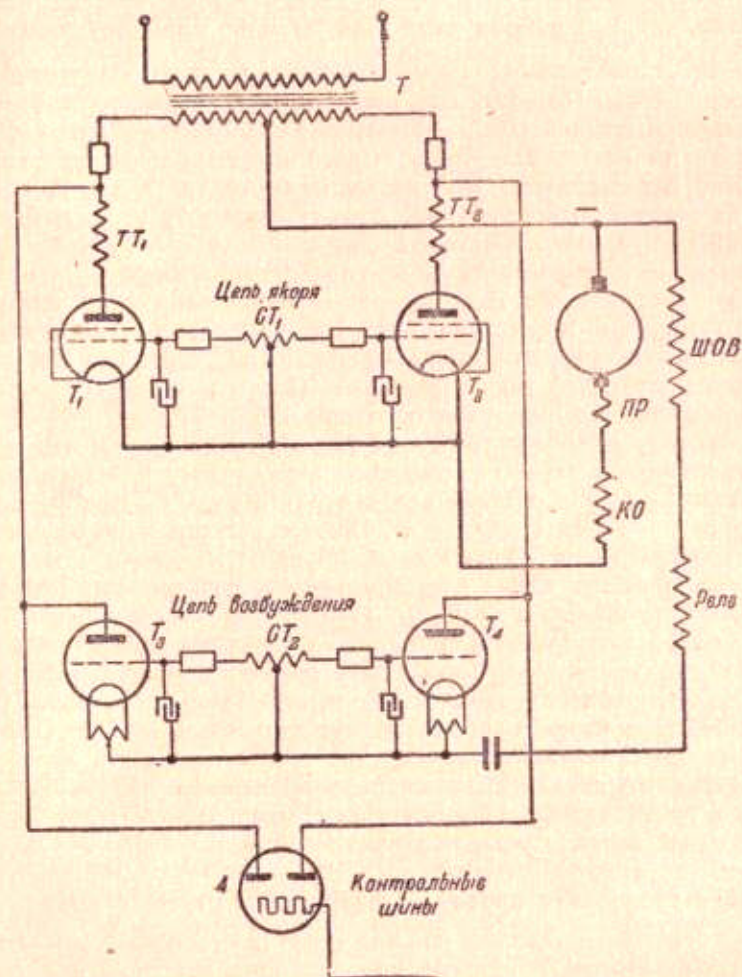


Рис. 166. Главные цепи ионного привода типа «таймтроль».

119. Недостатки ионного электропривода

Ионный электропривод обладает существенным недостатком — низким коэффициентом мощности при низких скоростях. Коэффициент мощности ионного привода, вызванный искажением формы кривой тока,

$$\cos \varphi = \frac{n}{n_0},$$

где n_0 — скорость привода при номинальном напряжении, n — получаемая скорость. При широких пределах регулирования коэффициент мощности на низких скоростях получается малым, и с точки зрения стоимости энергии неэкономичным. Это ограничивает в настоящее время практически применяемые мощности ионного привода значениями 5 — 20 *квт*.

120. Ионный привод типа „таймотроль“ или „мототроль“

Слово „таймотроль“ сокращенно обозначает тиратронное управление электроприводом. Подобная схема предложена для мощностей 5—20 *квт* американской фирмой GEC. „Мототроль“ — аналогичная схема в исполнении фирмы Вестингауз. Схема главной цепи этого типа привода дана на рис. 166. В ней имеются два экранированных тиратрона T_1 и T_2 для питания главной цепи двигателя, два тиратрона T_3 и T_4 для питания обмотки возбуждения. Выпрямительная лампа A обслуживает постоянным током цепь управления. Все упомянутые аппараты питаются от одного трансформатора T . Цепи управления сетками относительно несколько сложны и в схеме рис. 166 не показаны. Они включают 9 электронных ламп. Эти лампы через сеточные трансформаторы CT_1 и CT_2 воздействуют на токи тиратронов. Обратная связь осуществляется через последовательные трансформаторы TT_1 и TT_2 .

Схема дает возможность осуществлять пуск механизма при постоянном динамическом моменте, получать пределы регулирования до 60:1, из них 20:1 — регулированием напряжения главных тиратронов, а 3:1 — регулированием тока возбуждения. Пределы регулирования определяются характером нагрузки. Наличие холостых ходов механизма снижает пределы регулирования. Схема дает возможность поддерживать постоянство скорости с точностью до $\pm 1/2\%$. В основном схема проектируется с динамическим торможением. В последних вариантах схемы добавляются два главных тиратрона, и схема осуществляется с рекуперативным торможением. Схема дает возможность осуществлять нужные режимы работы при колебаниях напряжения на зажимах ламп до $\pm 10\%$. Однако по условиям срока службы ламп предел лучше ограничить колебаниями $\pm 5\%$. В США схема нашла широкое применение при мощностях до 5 *квт* в приводе для металлорежущих станков. В случае перегорания в схеме одной из ламп установка отключается.

121. Применение для привода игнитронов и ртутных выпрямителей

При больших мощностях привода могут применяться ртутные выпрямители и игнитроны, конструируемые в форме металлических сосудов. Ртутные выпрямители, для получения более ровной кривой постоянного тока, конструируются шестифазными с шестью анодами и одним жидким

ртутным катодом, причем все они располагаются в одном сосуде (рис. 167). Регулирование напряжения их производится также сетками. Подобный привод осуществлен, например, шведской фирмой ASEA для прокатных станов мощностью 700 *квт* под названием „Авостат“. Регулировка напряжения постоянного тока, в целях повышения $\cos \varphi$, частично производится изменением числа витков вторичной обмотки трансформатора. Для осуществления рекуперативного торможения необходимо применять второй такой же ртутный выпрямитель. Возникновение в ртутных выпрямителях так называемых обратных зажигания (т. е. аварийных прохождений тока в обратную сторону) повело к тому, что в практике последнего времени стали применяться одноанодные ртутные выпрямители, т. е. с отдельными сосудами для каждого анода и катода.

Широкое распространение в практике нашли игнитроны, т. е. газотроны с ртутным катодом и специальным поджигателем. В них каждый анод со своим катодом располагается в отдельном металлическом сосуде. Зажигание игнитрона производится в каждый период специальным поджигателем — игнитродом.

Простейшая схема питания от сети переменного тока двигателя постоянного тока через игнитроны дана на рис. 168. Сначала ток замыканием контактов 1 или 2 пропускается через поджигатель 3 и жидкий катод, в результате чего и возникает дуга между анодом и катодом на данный полупериод.

На рис. 169 показана схема для двухполупериодного выпрямления игнитронами, в которой зажигание игнитронов осуществляется через тиратроны T_1 и T_2 . Фазы зажигания тиратронов регулируются изменением самондукции, включенной в цепи сетка — катод тиратронов.

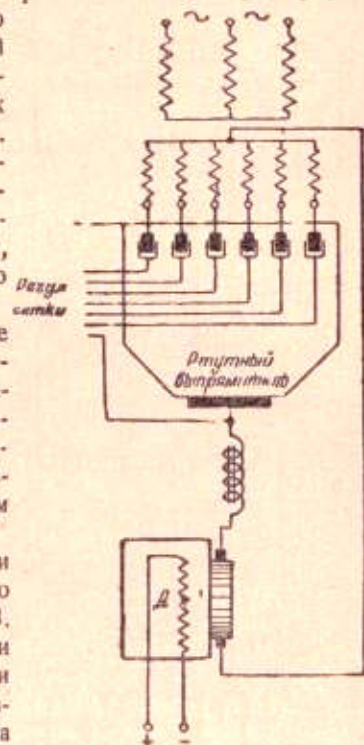


Рис. 167. Схема ионного привода с ртутным выпрямителем.

122. Фотоэлементы и их применение

Фотоэлементы являются или пустотными или газонаполненными (инертным газом) двухэлектродными лампами, реагирующими на освещенность. Газонаполненные элементы обладают более высокой чувствительностью, чем вакуумные, но зато их характеристики не отличаются постоянством. Внешний вид фотоэлемента показан на рис. 170. Для того, чтобы фотоэлемент стал проводящим, нужно осветить его катод. Зависимость тока в микроамперах от светового потока в люменах при разных приложенных к фотоэлементу напряжениях для газонаполненного элемента дана на рис. 171.

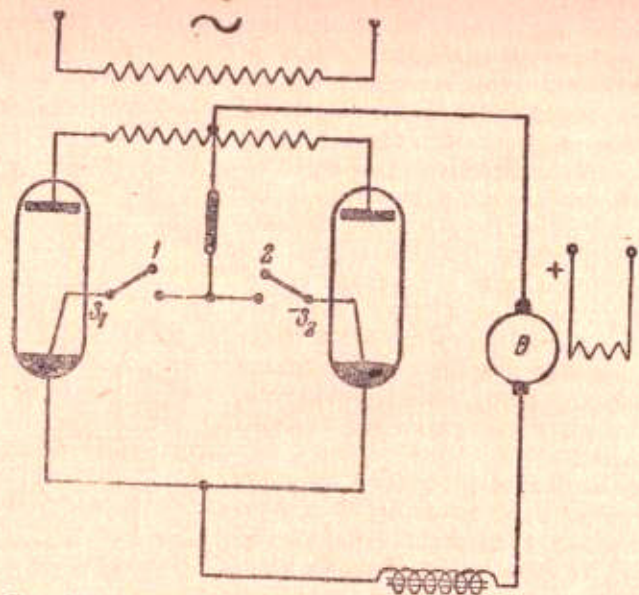


Рис. 168. Питание двигателя постоянного тока через два игнитрона.

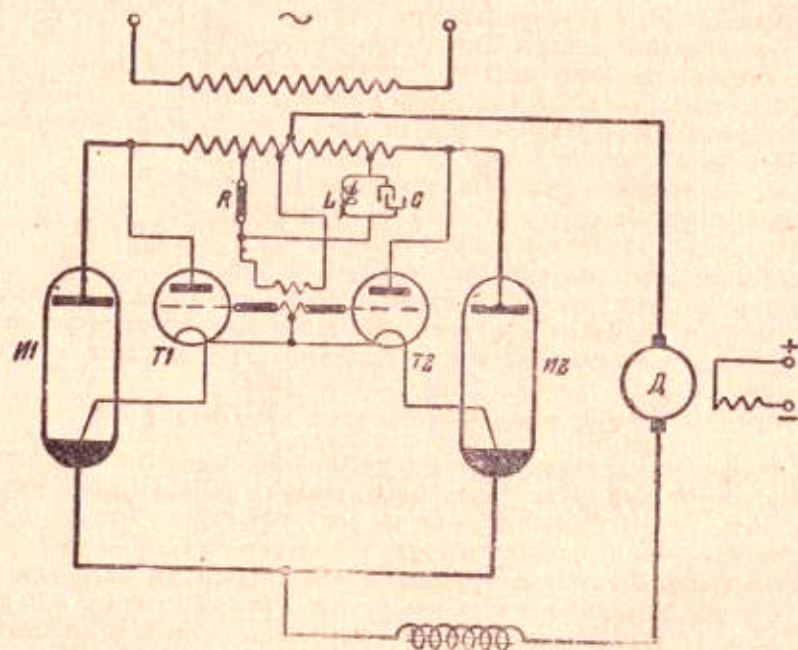


Рис. 169. Схема привода с зажиганием игнитрона тиратроном.

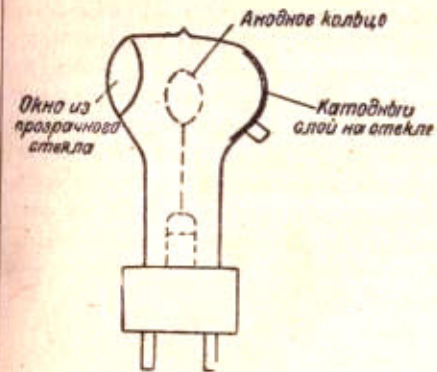


Рис. 170. Внешний вид фотоэлемента.

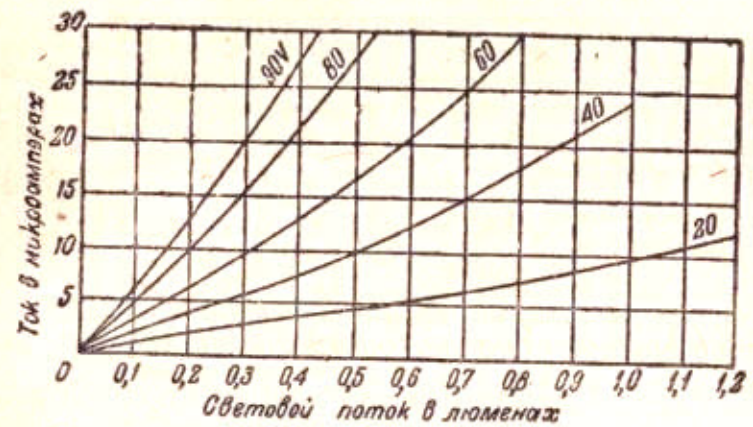


Рис. 171. Изменение тока через фотоэлемент при разных напряжениях в зависимости от светового потока.

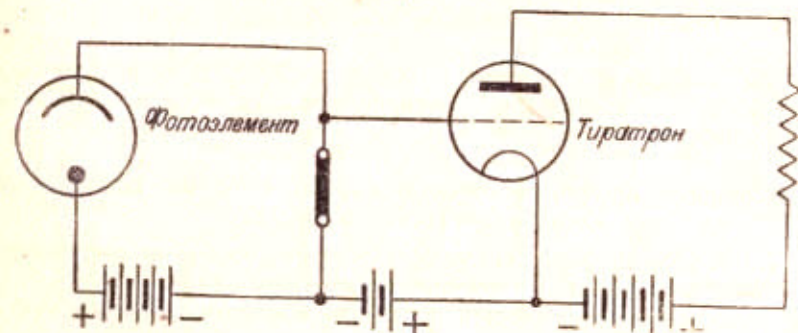


Рис. 172. Схема включения фотоэлемента для пуска в ход привода (включение на свет).

Фотоэлемент в автоматических схемах является прекрасным чувствительным элементом. Обычно создаваемые им импульсы должны быть усилены или электронной лампой или тиратроном. Одна из схем использования фотоэлемента Φ в приводе показана на рис. 172. Пока на фотоэлемент не падает свет, на сетку тиратрона подается отрицательное напряжение, и он не зажигается. При освещении фотоэлемента через него начинает проходить ток, и на сетке тиратрона оказывается положительный потенциал. Тиратрон зажигается и питает двигатель. Схемы с фотоэлементами могут быть спроектированы на включение как на свет (рис. 172), так и на темноту. На рис. 172 фотоэлемент включен на отдельную батарею, в целях большей наглядности. В практических схемах он приключается к анодной батарее.

В настоящее время встречаются свыше 400 типичных применений фотоэлементов. Перечислим некоторые из них: счет изделий, контроль поверхности, пуск в ход, поточные линии, ограничители хода, конечные выключатели, реверсирование валков в прокатных станах, контроль толщины размеров изделий, автоматическое включение освещения, открывание дверей, управление пилой, указатель дыма, измерение вибраций, управление скоростью двигателя, регулирование концентрации раствора, плотности окраски тканей, толщины влажности и положения бумаги в бумажных машинах, толщины резиновых полотен, микрометры, испытание масла, синхронизация и т. д. и т. д.

Глава XIV

Основные мероприятия по поддержанию исправности и по ремонту электроприводов

123. Общие замечания

Вопросы, которые могут быть отнесены к данной главе, довольно обширны и разнообразны. Вопросы ремонта двигателей связаны с их электромагнитным и конструктивным типом, размещением двигателей. Вопросы ремонта аппаратуры зависят от типа аппарата, схемы включения. Разыскивание повреждений и неисправностей в автоматической схеме часто составляет не такую простую задачу. Все эти вопросы могли бы составить отдельное большое пособие. В данной книге мы лишь кратко касаемся этих вопросов, приводя их в систематизированной табличной форме.

124. Основные профилактические мероприятия по поддержанию электродвигателей в порядке

1. Тщательная сборка агрегата. Обязательное отключение двигателей от сети в нерабочее для исполнительных механизмов время.
2. Исключение возможностей попадания в обмотки двигателей металлической пыли и стружки.
3. Тщательная забота об исправности состояния смазки.
4. Регулярная замена изнашивающихся частей и частей, нуждающихся в ремонте.

5. Тщательное наблюдение за состоянием и износом щеток, коллекторов и подшипников.
6. Регулярная проверка величины воздушного зазора.
7. Наличие соответствующего набора запасных частей в электроремонтной мастерской.

125. Систематический контроль

Период	Мероприятия и проверка
Раз в неделю	Наличие масла в подшипниках. Проверка рукой температуры доступных частей двигателя и подшипников. Проверка температуры выходящего из двигателя воздуха. Проверка на отсутствие дыма от перегрева изоляции.
Раз в месяц	Проверка состояния щеткодержателей, щеток, шунтов. Продувка сжатым воздухом.
Раз в год	Проверка воздушного зазора. Проверка сопротивления изоляции меггером. Проверка приборами напряжения и силы тока. Очистка смазки в роликовых и шариковых подшипниках. Проверка наличия запасных частей в электроремонтной мастерской.
Раз в два года	Демонтаж. Полный осмотр обмоток. Замена неисправных клиньев и ослабевших лент. Покрытие лаком. Осмотр коллекторов и коллекторных соединений. Промывка подшипников керосином. Прочистка двигателя сжатым воздухом.

126. Основные типичные неисправности двигателей и их причины

Характер неисправности	Возможные причины	Способ устранения
Перегрев подшипников	Наклонен или согнут вал.	Выровнять или заменить вал.
	Чрезмерное натяжение ремня. Сильное смещение шкива.	Ослабить натяжение ремня. Сдвинуть шкив ближе к подшипникам.
	Чрезмерно малый диаметр шкива. Недостаточная смазка.	Использовать другой шкив. Добавить смазку.
Подшипники с кольцевой смазкой.	Масло не омывает все углубления из-за грязи. Погнуты или повреждены кольца. Слишком тяжелое масло. Слишком легкое масло. Недостаточное количество масла. Чрезмерное давление.	Прочистить, заполнить новым маслом. Заменить или исправить. Заменить легким. Заменить более тяжелым. Наполнить при остановке.
	Износ подшипников.	Принять меры к его уменьшению. Заменить подшипники.

Характер неисправности	Возможные причины	Способ устранения
Шариковые подшипники	Недостаточная смазка. Засорение и загрязнение смазки. Чрезмерная смазка. Нагрев от обмоток двигателя или внешних воздействий. Повреждение или поломка шариков.	Увеличить количество смазки. Выбрать с торцов, промыть керосином и добавить новой. Уменьшить количество, заполнив не более чем наполовину. Принять меры к защите. Заменить подшипники.
Утечка масла через закупоривающее отверстие.	Недостаточно плотное прикрытие отверстия, поломка втулки.	Исправить, сместить, стянуть, заменить.
Загрязнение двигателя.	Загрязнение вентиляционных каналов или отверстий, покрытие лобовых соединений тонкой пылью. Загрязнение обмотки ротора пылью. Запыление и загрязнение подшипников.	Пыль может быть цементной, древесной, зерновой, угольной и т. д. Нужно демонтировать двигатель и вычистить части. Прочистить обмотку и покрыть хорошим лаком. Прочистить.
Сырость и влага в двигателе.	Капанье воды („капез“). Дождевые условия. Погружение в воду.	Вытереть, высушить теплым воздухом. Устранить „капез“, сделав защитные покрышки. Демонтировать и вычистить части. Высушить в течение 24 час. при 105°C, пока не будет достаточным сопротивление изоляции. Особое внимание обратить на коллектор.
Вибрация двигателя после сборки.	Неверная центровка. Недостаточная прочность фундаментов. Отсутствие балансировки. Недостаточная балансировка механизма. Подшипники не точно центрированы. Соединение катушек ротора. Однофазная работа двигателя. Чрезмерная игра подшипников.	Центрировать. Усилить фундаменты. Балансировать. Балансировать. Заменить. Ребалансировать ротор. Исправить. Подрегулировать подшипники.

Характер неисправности	Возможные причины	Способ устранения
Перегрев двигателя при нагрузке.	Перегрузка. Плохая вентиляция, грязь в вентиляционных каналах. Работа в качестве однофазного. Заземлена катушка. Несимметрия напряжений. Закорочена катушка статора. Неверное включение — ложные соединения. Повышенное или пониженное напряжение. Статор трется о ротор.	Уменьшить нагрузку. Проверить поток воздуха. Проверить. Устранить заземление и отремонтировать. Проверить трансформатор и электрические соединения. Отремонтировать и проверить ваттметром. Проверить. Проверить вольтметром. Заменить подшипники, если был поставлен неправильно двигатель.
Двигатель останавливается.	Недостаточная мощность. Перегрузка. Пониженное напряжение. Разомкнута цепь. Неправильный подбор сопротивлений в роторе.	Проверить расчетом и в случае недостаточной мощности заменить на следующий тип. Уменьшить нагрузку. Дать номинальное напряжение. Просмотреть предохранители, перегрузочные реле, кнопки. Проверить схему сопротивлений, ликвидировать размыкание цепей.
Двигатель не берет с места.	Размыкание одной фазы. Перегрузка. Цепь ротора разомкнута. Плохое соединение катушек статора. Разомкнута вторичная цепь. Разрыв первичной цепи. Поломка стержней ротора.	Выяснить. Уменьшить нагрузку. Проверить щетки и их соединение, коллектор. Испытать посредством контрольной лампы. Проверить все щетки, вторичные соединения. Найти и исправить. Найти и исправить. Временно поставить новый ротор.
Двигатель не доходит до нормальной скорости.	Неправильный выбор мощности. Пониженное напряжение на жакетах. Чрезмерное сопротивление в роторной цепи.	Проверить расчетом или опытом. Подать номинальное напряжение. Проверить и исправить соединения в роторной цепи.

Характер неисправности	Возможные причины	Способ устранения
Двигатель не доходит до нормальной скорости.	Недостаточный подсинхронный момент синхронного двигателя.	Изменить сопротивление ротора.
Несимметричный ток при работе двигателя.	Нет напряжения на одной фазе. Однофазная работа. Плохие роторные контакты. Щетки не в надлежащем положении.	Исправить соединения. Исправить соединения. Исправить контакты. Просмотреть щетки.
Двигатель идет и останавливается.	Перерывы в подаче энергии.	Проверить соединения.
Неправильное направление вращения	Неправильный порядок фаз или включение одной из обмоток.	Исправить соединения.
Чрезмерная длительность пуска.	Чрезмерная нагрузка. Чрезмерные сопротивления в цепи. Неисправности ротора. Недостаточное напряжение.	Уменьшить нагрузку. Проверить соединения. Заменить ротор. Выяснить причины.
Магнитный шум.	Неодинаковый воздушный зазор. Недостаточная балансировка ротора. Излишняя игра в подшипниках.	Скорректировать подшипники. Сбалансировать ротор. Исправить или заменить.
Шум заедания частей.	Вентилятор трется о щетки. Вентилятор бьет по изоляции. Колебания на подшипниковой плите.	Исправить. Выправить вентилятор. Усилить крепящие болты.

127. Основные мероприятия по уходу за аппаратами управления в автоматических схемах

Основные автоматические аппараты в схемах управления электродвигателями, кроме сложных быстродействующих регуляторов, в большинстве являются весьма простыми. Особого ухода эти аппараты не требуют. Однако они требуют за собой систематического наблюдения.

При наличии последнего работа автоматических аппаратов и схем протекает без осложнений и перерывов.

Осмотр аппаратов управления должен производиться не реже, чем один раз в неделю. При этом нужно осматривать состояние контактов, а также наблюдать за тем, чтобы в аппараты не попадала пыль, грязь, жир. Все неисправные детали должны сразу же устраняться. Наличие соответствующего комплекта запасных частей является совершенно обязательным. Необходимо наблюдать за исправным состоянием креплений, исправностью гибких соединений.

Монтаж автоматических аппаратов управления должен производиться тщательно без повреждения других аппаратов или их механических и электрических блокировок. Особое внимание должно быть обращено на состояние контактов и отсутствие заедания осей вращения аппаратов. Тщательно должно быть проверено действие блокировки реверсивных контакторов.

Автоматическая схема управления электроприводом вообще при наладке должна быть проверена еще до соединения с исполнительным механизмом. Сопряжение с последним должно быть сделано лишь после указанной проверки.

Поскольку контакты являются основными элементами автоматических схем, обеспечивающими надежное электрическое соединение или размыкание цепи, то осмотр контактных поверхностей должен быть совершенно систематическим. В исправном состоянии должны содержаться и блокконтакты. В результате работы контактные поверхности покрываются мелкой окисью меди, повышающей сопротивление контактов и ведущей к повышению их нагрева. Очистка контактов должна производиться наличным напильником, применение тонкого наждачного полотна не допускается.

128. Некоторые типичные неисправности основных автоматических схем приводов постоянного тока

Соответствующее рассмотрение целесообразней провести применительно к какой-либо определенной схеме. В качестве примера может быть использована хотя бы схема рис. 146.

1. Возможен такой случай, что при нажатии кнопки „вперед“ (или „назад“) включаются реверсивные контакторы *B* (или *H*), однако линейный контактор не включается, и следовательно двигатель с места взять не может. В этом случае, прежде всего, нужно убедиться в исправности блокконтактов реверсивных контакторов. Далее следует проверить исправность катушки линейного контактора. Проверка может быть сделана контрольной лампой. При отсутствии напряжения на катушке линейного контактора повреждение нужно искать в вышеупомянутых контактах.

При наличии напряжения на катушке линейного контактора причиной оказывается обрыв в этой катушке.

2. Включение схемы вызывает одновременное включение обоих реверсивных контакторов. Подобная неисправность является результатом приваривания контактов реверсивных контакторов и одновременным нарушением механической блокировки между контакторами.

3. Включение реверсивных контакторов и линейного не вызывает вращения двигателя. Это может быть или в результате обрыва

главной цепи двигателя (например в сопротивлениях) или в результате перегрузки, являющейся итогом неисправности состояния механизма.

4. После включения реверсивных контакторов линейный контактор начинает непрерывно с большой частотой включаться и выключаться. Подобные условия получаются обычно в результате срабатывания максимального реле из-за короткого замыкания в цепи или из-за перегрузки двигателя.

5. Включение реверсивных контакторов и линейного происходит нормально, однако после отпускания кнопки линейный контактор выключается. Это является итогом неисправности в цепи блокконтактов реверсивных контакторов, шунтирующих пусковые кнопки.

6. При включении контакторов ускорения линейный контактор выключается. Причину обычно следует искать в перегрузке двигателя или в сваривании контактов некоторых контакторов ускорения.

7. При нажатии кнопки „пуск“ происходит одновременное включение линейного контактора и контакторов ускорения. Подобная неисправность может явиться итогом наличия обходного контура.

8. Разгон двигателя происходит очень медленно, и двигатель не доходит до нормальной скорости. Подобная неисправность является результатом не включения контакторов ускорения и наличия в цепи двигателя пускового сопротивления. Причину следует искать в неисправностях катушек контакторов ускорения.

9. Во время работы автоматической схемы происходит выключение всех контакторов. Подобное явление может происходить или из-за недопустимого понижения напряжения, когда срабатывает минимальная защита, или из-за механических дефектов механизма и в результате получающейся перегрузки двигателя.

10. Самопроизвольный пуск двигателя является итогом побочного, обходного контура.

11. Недопустимый перегрев главных контактов обычно является результатом недостаточного нажатия или загрязненного состояния контактов.

129. Основные мероприятия по экономии электроэнергии в электроприводах

Вопросы экономии электрической энергии имеют существенное значение с точки зрения экономии энергетических ресурсов страны и с точки зрения наилучшего использования электрических станций. Постановления ГОКО от 10/X 1942 г. и от 16/V 1944 г. об усилении борьбы за экономию электрической энергии требуют самого пристального внимания энергетиков-электриков и технологов промышленных предприятий. Ниже дается краткий перечень основных мероприятий по экономии электрической энергии в приводе.

1. Правильное ведение технологического процесса при обеспечении:
а) полного соответствия между технологическим и электрическим оборудованием в их главных параметрах (прежде всего в отношении производительности); б) наиболее рациональное ведение электрического режима для каждого производственного процесса и примененного типа оборудования.

2. Обеспечение надлежащего соответствия между статическими и динамическими параметрами рабочих машин и электродвигателей при правильном выборе конструктивного типа последних.

3. Тщательное эксплуатационное наблюдение за электрооборудованием, ведущее к минимуму простоев и аварий.

4. Рациональная комбинация нагрузок на силовых и осветительных трансформаторах, ведущая по возможности к их полному эффективному использованию.

5. Полная ликвидация трансмиссий с переводом на одиночный и многодвигательный привод.

6. Достижение высокого коэффициента мощности установок переменного тока.

7. Рациональное проведение переменных режимов работы путем соответствующего подбора параметров электроприводов.

8. Выключение двигателей при холостых ходах.

9. Автоматизация управления электроприводов.

10. Проверка состояния механических частей исполнительных механизмов методом самоторможения.

Литература

А. Русская литература по электроприводу

1. Проф. В. К. Попов, Основы электропривода (учебник). 1945.
2. Проф. В. К. Попов, Применение двигателей в промышленности. 3 тома. 1932—1939.
3. Проф. С. А. Ринкевич, Теория электропривода. 1938.
4. Проф. Р. А. Аронов, Электрооборудование промышленных приводов. 1936.
5. Проф. В. К. Попов и И. Н. Казанцев, Основы построения схем автоматизированного привода. 1939.
6. В. К. Попов и Д. В. Васильев, Основы автоматики электропривода. 1938.
7. Проф. Р. А. Аронов, Автоматическое управление электроприводами, ч. 1. 1935.
8. С. И. Вешеневский, Расчет сопротивлений для электродвигателей. 1938.
9. А. В. Фатеев и Б. Н. Норневский, Сборник примеров и задач по теории электрического привода. 1939.
10. П. Гарвуд, Управление электродвигателями. 1938.
11. В. К. Попов, Последние достижения электропривода в СССР и за границей. 1946.
12. Ф. Г. Гулликсен и Е. Г. Веддер, Промышленная электроника. 1937.
13. Г. Д. Финк, Электроника. 1941.
14. Н. П. Куницкий, Электрооборудование прокатных и термических цехов. 1938.
15. Проф. С. А. Пресс, Электрический привод металлообрабатывающих станков. 1940.
16. Н. П. Куницкий, Электрооборудование подъемно-транспортных сооружений, в 2 частях. 1937—1942.
17. А. В. Фатеев, Электрическое оборудование механизмов заводского транспорта. 1936.
18. Н. Н. Стефанович, Электрооборудование заводов черной металлургии. 1940.
19. И. Е. Науменко, Электрооборудование современного доменного цеха. 1941.
20. В. И. Ильинский, Электродвигательный привод в доменном производстве. 1938.
21. В. Штиль, Электродвигательный привод в текстильной промышленности. 1934.
22. И. А. Петров и С. П. Розанов, Электрооборудование текстильных предприятий. 1940.
23. В. В. Попов, Электропривод на бумажных фабриках. 1934.
24. А. С. Грамматчиков, Электрооборудование цементных заводов, 1934.

Б. Основная литература по монтажно-эксплуатационным вопросам

25. С. А. Кабанов, Контроль производства электрических машин. 1935.
26. Р. Шпизер, Болезни электрических машин. 1936.
27. Б. А. Константинов, Эксплуатация электрооборудования промышленных предприятий. 1941.
28. Л. И. Делятицкий, Ремонт фабрично-заводского электрооборудования. ВНИТОЭ, 1938.
29. Н. Ф. Викулов, Расчет и устройство защитных заземлений и занулений в установках потребителей электрической энергии. ВНИТОЭ, 1940.
30. Б. В. Доброхотов, Организация системы планово-предупредительных ремонтов электрооборудования. ВНИТОЭ, 1939.
31. Г. Г. Гемке, Неисправности электрических машин. 1938.
32. Н. Нейкирхен, Угольные щетки и причины непостоянства условий коммутации машин постоянного тока. 1937.
33. С. А. Кабанов, Монтаж электрических машин и ремонт их. 1931.
34. Справочная книга электромонтера. Электропром. 1934.
35. М. Н. Левицкий, Электроремонт на промышленных предприятиях. 1940.
36. А. С. Грамматчиков, Техника безопасности в электрических установках. 1938.
37. Справочник по электрооборудованию промышленных предприятий. НКС, 1945.
38. Справочник по электромонтажным работам. НКС, 1945.

Ответ. редактор *В. Г. Драняков*

Техн. редактор *Н. Крушова*

Подписано к печати 16/XI 1946 г. М. 07415 Печ. лист. 14³/₄ Уч.-изд. лист. 20,24 Тираж 15 000 экз.
Заказ № 537.

1-я тип. Машгиза. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.