

Ю. Д. ЗУБКОВ

АСИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С КОНДЕНСАТОРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

А К А Д Е М И Я Н А У К К А З А Х С К О Й С С Р

Ю. Д. ЗУБКОВ

АСИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ
С КОНДЕНСАТОРНЫМ
ВОЗБУЖДЕНИЕМ



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК КАЗАХСКОЙ ССР

АЛМА-АТА — 1949

005

Гос. публичная
научно-издательская
фирма «Казанский
университетский
издательство»
АЛМАТЫ

96-1122

Д

29002

УОК

621.373.332

Печатается по постановлению
Редакционно-издательского совета
Академии наук Казахской ССР

ПРЕДИСЛОВИЕ

В этой книге дан вывод условий самовозбуждения асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением. Рассмотрена работа их на автономную сеть с симметричной нагрузкой при установившемся состоянии. Приведены методы расчета работы этих генераторов при указанных условиях в режимах: с постоянной частотой, с постоянной скоростью вращения и в качестве генераторов переменной частоты.

Автором подготавливается к печати вторая книга, в которой будут освещены следующие вопросы работы асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением: переходные процессы и неустановившиеся режимы; работа на несимметричную нагрузку; работа в однофазном режиме; работа на выпрямительную нагрузку (однофазный и трехфазный режимы) и применение этих генераторов для питания установок связи и рентгеноаппаратов; стабилизация напряжения и частоты; применение в электроприводе (более подробно и шире, чем в настоящей книге); параллельная работа генераторов соизмеримой мощности.

Таким образом будет охвачен комплекс вопросов, возникающих при рассмотрении работы изучаемых генераторов и их возможного практического применения.

Крупнейшие достижения советской науки в области создания искусственных диэлектриков и та роль, какую приобретают конденсаторы в современной технике, являются, по мнению автора, реальными предпосылками для восстановления и значительного расширения, в ближайшее время, отечественного конденсаторостроения на новой технической основе, за счет производства дешевых, малогабаритных конденсаторов.

С этим связана также возможность значительного расширения области применения асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением, ограниченной в настоящее время установками малой мощности.

Все критические замечания по данной работе автор просит направлять по адресу: Алма-Ата, Уйгурская, 123, Институт энергетики АН КазССР.

Автор

ГЛАВА I

РАБОТА АСИНХРОННЫХ МАШИН В ГЕНЕРАТОРНОМ РЕЖИМЕ

§ 1. Условия генераторного режима

Асинхронные машины могут работать в различных режимах (двигательном, генераторном, тормозном), но наибольшее распространение они получили при использовании их в двигательном режиме.

Для того чтобы асинхронная машина могла работать в генераторном режиме, ей необходимо обеспечить:

- 1) возбуждение и
- 2) вращение за счет затраты механической энергии приводного двигателя.

Работа асинхронной машины в генераторном режиме, в зависимости от способа возбуждения может быть осуществлена в двух вариантах:

- 1) в качестве генератора с независимым возбуждением и
- 2) в качестве самовозбуждающегося генератора.

§ 2. Работа асинхронной машины в качестве генератора с независимым возбуждением

При работе асинхронной машины в качестве генератора с независимым возбуждением, необходимый для нее намагничивающий ток поступает из сети, в которую асинхронный генератор отдает свою активную мощность.

Это возможно только лишь при наличии сети, на которую асинхронный генератор работает параллельно с синхронными машинами, от которых он и получает необходимую для создания его магнитных полей реактивную мощность.

После того как обеспечено возбуждение машины, необходимо к валу ее ротора приложить внешний вращающий момент с таким расчетом, чтобы число оборотов ротора было больше синхронного и скольжение стало бы отрицательным. В соответствии с этим активные составляющие токов ротора и статора изменят свое направление на обратное, по сравнению с работой в двигательном режиме, и асинхронная машина начнет отдавать

в сеть активную энергию при напряжении сети, поддерживаемом, обычно, постоянным.

Величина энергии, отдаваемой в сеть асинхронным генератором, в этом случае будет всецело зависеть от величины отрицательного скольжения, т. е. от превышения угловой скорости ротора над скоростью вращения магнитного поля.

Работу асинхронной машины как в двигательном, так и генераторном с независимым возбуждением режимах, как известно, можно охарактеризовать одной общей круговой диаграммой, причем двигательному режиму соответствует верхняя ее часть, а генераторному — нижняя.

На практике применение асинхронных генераторов с независимым возбуждением ограничено, так как их работа зависит от сети, питаемой другими генераторами; кроме того, эти генераторы, являясь потребителями реактивных токов, ухудшают коэффициент мощности генераторов, работающих с ними на общую сеть.

Производственное значение работы асинхронных машин в генераторном режиме с независимым возбуждением в настоящее время связано, главным образом, с вопросами рекуперации энергии, т. е. возвращения ее в сеть, от которой питаются эти машины при двигательном режиме. Умелое использование асинхронных машин для этой цели может принести солидный экономический эффект.

Учитывая огромные производственные возможности современных промышленных предприятий указанного типа, значительную мощность применяемых на них двигателей внутреннего сгорания и методику заводских испытаний их, требующую длительной нагрузки с воспроизведением на заводском стенде, всего комплекса работы двигателей в естественных условиях, использование генераторного режима асинхронных машин, вместо применения разнообразных тормозов, может явиться эффективным средством мобилизации значительных энергетических резервов. Последние в состоянии дать заметное увеличение энергетического баланса без дополнительного ввода новых электрогенерирующих мощностей на станциях и без дополнительных затрат топлива при эксплуатации.

Введение на моторостроительных заводах генераторного торможения с рекуперацией энергии от обкаточных двигателей, по существу, соответствует вводу в эксплуатацию новой электрогенерирующей мощности, равной сумме мощностей заводских испытательных стендов, одновременно находящихся в работе. При этом высококачественное жидкое топливо, сжигаемое при испытаниях, полезно используется для энергетических целей, в то время как при применении гидротормозов или воздушных винтов оно целиком пропадает. Применение статических конденсаторов для разгрузки сети от реактивных токов, потребляемых генераторами, еще более может увеличить получаемый эффект.

§ 3. Работа асинхронной машины в качестве самовозбуждающегося генератора

Самовозбуждение асинхронных машин возможно осуществить двумя способами:

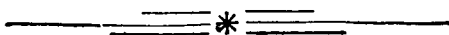
1) возбуждением машины со стороны ротора токами низкой частоты, с применением в качестве возбудителя специальной коллекторной машины переменного тока;

2) самовозбуждением от остаточного магнитного поля машины с помощью емкости, включенной на ее зажимы.

Первый способ возбуждения связан с конструктивным и эксплуатационным усложнением машины, за счет введения сложного скользящего контакта — коллектора, что снижает степень надежности работы генератора.

Второй способ возбуждения генератора за счет емкости и остаточного магнетизма дает возможность использовать в полной мере конструктивную простоту и надежность асинхронных машин, нашедших свое идеальное выражение в короткозамкнутом исполнении ротора, и получить генератор предельно простой в конструктивном и эксплуатационном отношении, не требующий квалифицированного обслуживания. Принципиальная возможность данного способа возбуждения вытекает из общеизвестного метода исправления коэффициента мощности при помощи статических конденсаторов.

Первым импульсом для создания намагничивающего тока является электродвижущая сила (э. д. с.), индуцированная в статорной обмотке генератора за счет остаточного магнетизма машины, достаточного, как показывает опыт, для этой цели.



ГЛАВА II

РАБОТА АСИНХРОННЫХ МАШИН В ГЕНЕРАТОРНОМ РЕЖИМЕ С КОНДЕНСАТОРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

§ 4. Холостой ход

При исследовании работы асинхронных машин в изучаемом режиме будем исходить из нормальной трехфазной машины.

При этом пренебрежем потерями на гистерезис и токи Фуко в магнитопроводе машины, влиянием изменения частоты на L , M и r машины, потерями в конденсаторах и соединительных проводах и не будем учитывать влияния насыщения стали на форму кривых тока и напряжения, принимая их за синусоиду. Кроме того, для удобства, предположим равенство витков и обмоточных коэффициентов обмоток статора и ротора.

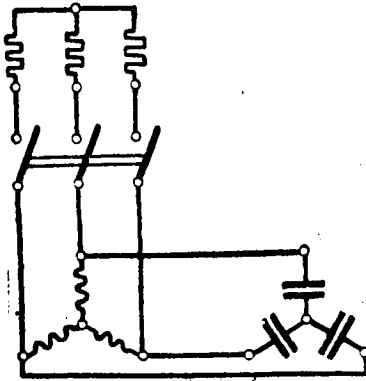


Рис. 1.

На рис. 1 приведена принципиальная схема включения генератора и конденсаторов, причем случай разомкнутого рубильника соответствует режиму холостого хода.

Так как изучаемая система является вполне симметричной, то нет необходимости рассматривать процессы, протекающие в каждой из фаз, достаточно рассмотреть процесс в какой-либо одной фазе.

Обозначим через ω — угловую скорость вращения магнитного поля в $\frac{\text{эл. рад.}}{\text{сек.}}$, а через ω_0 — угловую скорость вращения ротора

в $\frac{\text{эл. рад.}}{\text{сек.}}$. При этом в генераторном режиме численно $\omega_0 > \omega$ и совпадает по направлению, так что угловая скорость вращения ротора относительно магнитного поля будет равна $\omega_2 = \omega - \omega_0$,

причем проводники обмотки ротора пересекаются магнитным полем в направлении, противоположном направлению пересечения проводников обмотки статора. Следовательно э. д. с., индуцирующиеся одним и тем же вращающимся магнитным полем в проводниках обмоток статора и ротора, будут сдвинуты взаимно по фазе на 180° эл.

Применяя второй закон Кирхгофа к одной фазе обмотки статора, получим:

$$r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt + M \left(\frac{di_2}{dt} \right)_{\omega_0} = 0,$$

где r_1 — активное сопротивление одной фазы обмотки статора;

L_1 — полный коэффициент самоиндукции одной фазы статора;

C — емкость, включенная на одну фазу при соединении конденсаторов возбуждения звездой;

$M = \frac{3}{2} M_{\max}$ — коэффициент взаимной индукции между обмотками статора и ротора, рассчитанный на одну фазу;

M_{\max} — коэффициент взаимной индукции между любыми фазными обмотками статора и ротора при совпадении их осей;

i_1 — ток в обмотке статора;

i_2 — ток в обмотке ротора.

Подобным же образом, применяя второй закон Кирхгофа к одной фазе обмотки ротора, получим:

$$r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \left(\frac{di_1}{dt} \right)_{\omega_0} = 0,$$

где r_2 — активное сопротивление одной фазы обмотки ротора;

L_2 — полный коэффициент самоиндукции одной фазы обмотки ротора.

Индекс „ ω_0 “, поставленный при некоторых производных, приведен в напоминание о том, что обмотки статора, по которым протекает система токов i_1 , и обмотки ротора, по которым текут токи i_2 , взаимно перемещаются со скоростью ω_0 .

Итак, для определения токов i_1 и i_2 , имеем систему линейных однородных уравнений с постоянными коэффициентами:

$$\left. \begin{aligned} r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt + M \left(\frac{di_2}{dt} \right)_{\omega_0} &= 0, \\ r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \left(\frac{di_1}{dt} \right)_{\omega_0} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II}, 1)$$

Имея в виду явление насыщения железа, следовало бы считать как коэффициенты самоиндукции L_1 и L_2 , так и коэффициент взаимной индукции M некоторыми функциями токов, а следовательно, и времени.

При этом условии задача определения токов i_1 и i_2 свелась бы к решению системы однородных нелинейных уравнений, что лишило бы нас возможности, во-первых, аналитически решить этот вопрос, а во-вторых, заставило бы рассматривать i_1 и i_2 , даже при установившемся режиме, как токи несинусоидальной формы.

Оставляя пока в стороне вопрос о явлении изменения насыщения железа, а значит нелинейности системы уравнений, а тем самым и о содержании гармоник разных частот в кривых тока, рассмотрим случай установившегося режима.

При указанных допущениях можно будет считать, в первом приближении, токи i_1 и i_2 синусоидальными, имеющими при установившемся режиме постоянные амплитуды и выражение в форме вращающихся векторов:

$$i_1 = I_1 \sqrt{2} e^{j\omega t}; \quad i_2 = I_2 \sqrt{2} e^{j\omega_2 t}.$$

В этом случае вышеприведенная система уравнений может быть выражена в следующей форме:

$$\left. \begin{aligned} r_1 \sqrt{2} I_1 e^{j\omega t} + j\omega L_1 \sqrt{2} I_1 e^{j\omega t} + \frac{1}{j\omega C} \cdot \sqrt{2} I_1 e^{j\omega t} + \\ + j(\omega_2 + \omega_0) M \sqrt{2} I_2 e^{j(\omega_2 + \omega_0)t} = 0, \\ r_2 I_2 \sqrt{2} e^{j\omega_2 t} + j\omega_2 L_2 \sqrt{2} I_2 e^{j\omega_2 t} + \\ + j(\omega - \omega_0) M \sqrt{2} I_1 e^{j(\omega - \omega_0)t} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (\text{II, 2})$$

где I_1 и I_2 — эффективные значения токов соответственно статора и ротора.

Имея в виду, что $\omega_2 + \omega_0 = \omega$ и, произведя надлежащие сокращения, получим:

$$\left. \begin{aligned} r_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 + \frac{1}{j\omega C} I_1 + j\omega M I_2 = 0, \\ r_2 I_2 + j\omega_2 L_2 I_2 + j\omega_2 M I_1 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II, 3})$$

Вводя, как обычно, при изучении работы асинхронных машин так называемое „скольжение“

$$S = \frac{\omega - \omega_0}{\omega} = \frac{\omega_2}{\omega}, \quad (\text{II, 4})$$

получим:

$$\left. \begin{aligned} r_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 - j \frac{1}{\omega C} I_1 + j\omega M I_2 = 0, \\ r_2 I_2 + j\omega L_2 S I_2 + j\omega M S I_1 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II, 5})$$

Или иначе:

$$\left. \begin{aligned} \left[r_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C} \right) \right] I_1 + j\omega M I_2 = 0, \\ j\omega M S I_1 + (r_2 + j\omega L_2 S) I_2 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II, 6})$$

Эта же система уравнений может быть записана и в другом виде:

$$\left. \begin{aligned} [r_1 + j(X_1 - X_c)]I_1 + jX_m I_2 &= 0, \\ jX_m S I_1 + (r_2 + jX_2 S)I_2 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (\text{II, 6}')$$

где $X_1 = \omega L_1$ — полное реактивное сопротивление самоиндукции обмотки статора, отнесенное к частоте тока статора;

$X_2 = \omega L_2$ — то же для ротора;

$X_m = \omega M$ — реактивное сопротивление взаимной индукции обмоток статора и ротора;

$X_c = \frac{1}{\omega C}$ — реактивное сопротивление конденсаторов.

Этими системами уравнений (II, 6) и (II, 6') и определяются закономерности рассматриваемой самовозбужденной системы.

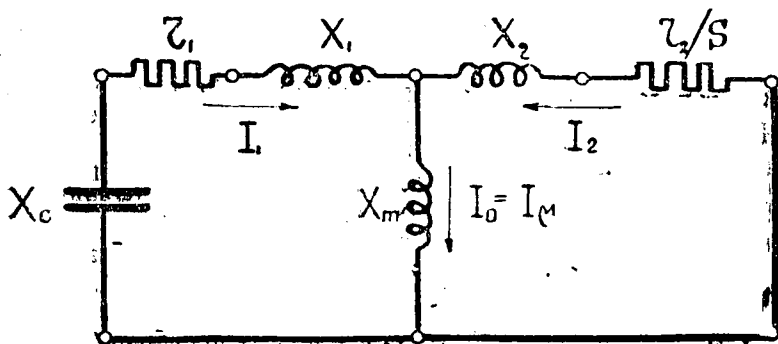


Рис. 2.

Часто результирующую намагничивающую силу асинхронных машин выражают в виде геометрической суммы намагничивающих сил ротора и статора и выражают как произведение намагничивающего тока I_0 , протекающего по одной из обмоток на число ее витков и обмоточный коэффициент.

Здесь, при принятых нами допущениях,

$$I_0 = I_m = I_1 + I_2.$$

В этом случае уравнения (II, 6) могут быть записаны в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} [r_1 + j\omega(L_1 - M) - j\frac{1}{\omega C}]I_1 + j\omega M I_0 &= 0, \\ [r_2 + j\omega S(L_2 - M)]I_2 + j\omega M S I_0 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II, 7})$$

Вводя обозначения:

$X_1 = \omega(L_1 - M)$ — реактивное сопротивление рассеяния обмотки статора;

$x_2 = \omega(L_2 - M)$ — реактивное сопротивление рассеяния обмотки ротора;

$X_m = \omega M$ — реактивное сопротивление взаимной индукции между статором и ротором (реактанс намагничивания);

$X_c = \frac{1}{\omega C}$ — реактивное сопротивление емкости,

получим:

$$\left. \begin{aligned} [(r_1 + jx_1) - jX_c] I_1 + jX_m I_0 &= 0, \\ (r_2 + jx_2) I_2 + jX_m I_0 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II, 8})$$

Или, приводя к неподвижному ротору:

$$\left. \begin{aligned} [(r_1 + jx_1) - jX_c] I_1 + jX_m I_0 &= 0, \\ \left(\frac{r_2}{S} + jx_2\right) I_2 + jX_m I_0 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II, 9})$$

В соответствии с этими уравнениями работу асинхронного генератора в режиме холостого хода можно охарактеризовать эквивалентной схемой и соответствующей ей векторной диаграммой э. д. с. и токов, изображенными на рис. 2 и 3.

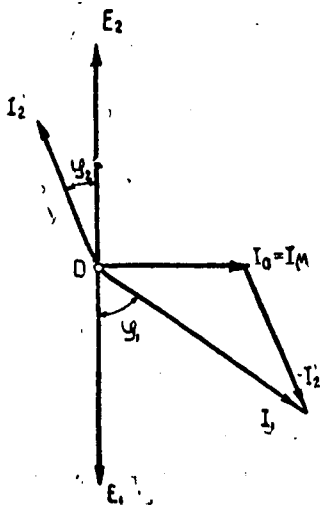


Рис. 3.

При неравенстве числа витков обмоток статора и ротора, параметры вторичной обмотки приводят к первичной общеизвестным методом, внося соответствующие этому коррективы в эквивалентную схему и векторную диаграмму генератора.

§ 5. Условия самовозбуждения системы

Условия, при которых полученная система уравнений (II, 6) будет иметь решения, отличные от тривиальных ($I_1 = 0; I_2 = 0$), — и будут являться математическим выражением условий самовозбуждения машины.

По известной теореме Крамера система однородных линейных уравнений может иметь решения, отличные от тривиальных ($I_1 = 0; I_2 = 0$), т. е. в терминах теории электрических машин рассматриваемая энергетическая система будет самовозбуждающейся, если дискриминант этой системы уравнений будет равен нулю.

Таким образом условие самовозбуждения системы мы получаем в следующей аналитической форме:

$$\left| \begin{array}{cc} \left[r_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C} \right) \right] & j\omega M \\ j\omega MS & (r_2 + j\omega L_2 S) \end{array} \right| = 0. \quad (\text{II}, 10)$$

Или в развернутом виде:

$$\left[r_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C} \right) \right] (r_2 + j\omega L_2 S) + (\omega M)^2 S = 0, \quad (\text{II}, 11)$$

т. е.

$$\begin{aligned} & \left[r_1 r_2 + \omega^2 M^2 S - \omega^2 L_1 L_2 S + \frac{L_2}{C} S \right] + \\ & + j \left[r_1 \omega L_2 S + r_2 \omega L_1 - \frac{1}{\omega C} r_2 \right] = 0. \end{aligned} \quad (\text{II}, 12)$$

Так как комплексное число может быть равным нулю только при равенстве нулю отдельно его действительной и мнимой частей, то последнее символическое равенство равносильно двум алгебраическим:

$$\left. \begin{aligned} r_1 r_2 + \omega^2 M^2 S - \omega^2 L_1 L_2 S + \frac{L_2}{C} S &= 0; \\ r_1 \omega L_2 S + r_2 \omega L_1 - \frac{1}{\omega C} r_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II}, 13)$$

Вводя коэффициент рассеяния генератора, определяемый по формуле

$$\sigma = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 L_2}, \quad (\text{II}, 14)$$

получим:

$$\left. \begin{aligned} r_1 r_2 - \omega^2 \sigma L_1 L_2 S + \frac{L_2}{C} S &= 0, \\ r_1 \omega L_2 S + r_2 \omega L_1 - r_2 \frac{1}{\omega C} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II}, 15)$$

К этой системе уравнений и сводятся аналитические условия самовозбуждения рассматриваемой системы.

Исключив из системы уравнений (II, 15) скольжение S , получим соотношение, связывающее параметры машины и цепи возбуждения с частотой возникающих электрических колебаний при холостом ходе машины.

Определяя скольжение S по первому и второму уравнениям системы (II, 15), получим выражение:

$$S = \frac{r_1 r_2 C}{L_2 (\sigma \omega^2 L_1 C - 1)} = \frac{r_2 (1 - \omega^2 L_1 C)}{r_1 \omega^2 L_2 C}, \quad (\text{II}, 16)$$

от которого после математических преобразований придем к следующему уравнению:

$$\sigma L_1^2 C^2 \omega^4 - (\sigma L_1 C + L_1 C - r_1^2 C^2) \omega^2 + 1 = 0. \quad (\text{II}, 17)$$

Полученное биквадратное уравнение характеризует условия возникновения электрических колебаний в рассматриваемой энергетической системе при холостом ходе.

Отбрасывая при решении этого уравнения отрицательные корни, как лишённые физического смысла, получим значение круговой частоты возникающих электрических колебаний:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{2\sigma L_1 C} \left[1 + \sigma - \frac{r_1^2 C}{L_1} \mp \sqrt{\left(1 + \sigma - \frac{r_1^2 C}{L_1} \right)^2 - 4\sigma} \right]}. \quad (\text{II, 18})$$

Напряжения и токи при холостом ходе аналитически определяются из соотношения (II, 6'):

$$\left. \begin{aligned} [r_1 + j(X_1 - X_c)] I_1 + jX_m I_2 &= 0, \\ jX_m S I_1 + (r_2 + jX_2 S) I_2 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (\text{II, 6'})$$

откуда получаем:

$$\left. \begin{aligned} (r_1 + jx_1) I_1 + jX_m I_2 &= jX_c I_1 = \dot{U}_1, \\ jX_m S I_1 + (r_2 + jX_2 S) I_2 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (\text{II, 19})$$

где $\dot{U}_1 = jX_c I_1$ — напряжение на каждой фазе статора.

Определив значение I_2 из второго уравнения этой системы уравнений и подставив в первое, после несложных преобразований, получим:

$$\frac{(r_1 + jX_1)(r_2 + jX_2 S) + X_m^2 S}{r_2 + jX_2 S} I_1 = jX_c I_1 = \dot{U}_1. \quad (\text{II, 20})$$

Деля обе части этого равенства на I_1 , получим в левой части полное сопротивление асинхронной машины, как некоторого электромагнитного механизма в целом, а в правой — полное сопротивление внешней сети при холостом ходе:

$$r_1 + \frac{X_m^2 S r_2}{r_2^2 + X_2^2 S^2} + j \left[X_1 - \frac{X_m^2 S^2 X_2}{r_2^2 + X_2^2 S^2} \right] = jX_c, \quad (\text{II, 21})$$

или в другом виде:

$$r_1 + \frac{X_1 X_2 r_2 S (1 - \sigma)}{r_2^2 + X_2^2 S^2} + j \frac{(r_2^2 + \sigma X_2^2 S^2)}{r_2^2 + X_2^2 S^2} = jX_c. \quad (\text{II, 22})$$

Так как два комплексных числа могут быть равны только при условии равенства отдельно их действительных и мнимых частей, то последнее символическое равенство эквивалентно следующим двум алгебраическим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{X_1 (r_2^2 + \sigma X_2^2 S^2)}{r_2^2 + X_2^2 S^2} &= X_c, \\ r_1 + \frac{X_1 X_2 r_2 S (1 - \sigma)}{r_2^2 + X_2^2 S^2} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II, 23})$$

Первое из этих выражений говорит о том, что в установившемся режиме холостого хода асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением реактивное сопротивление машины, как целого электромагнитного механизма, должно быть численно равно реактивному сопротивлению конденсаторов, т. е. что реактивную энергию машина получает от конденсаторов, за счет емкости которых и сводится баланс реактивной энергии самовозбужденной системы.

Второе уравнение показывает, что самовозбуждение возможно только при отрицательном скольжении, если только $r_1 \neq 0$.

§ 6. Графоаналитический метод расчета самовозбуждения асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением при холостом ходе

Уравнение

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{2\sigma L_1 C} \left[1 + \sigma - \frac{r_1^2 C}{L_1} \pm \sqrt{\left(1 + \sigma - \frac{r_1^2 C}{L_1} \right)^2 - 4\sigma} \right]} \quad (\text{II, 18})$$

может быть значительно упрощено, если пренебречь незначительной величиной $\frac{r_1^2 C}{L_1}$, что равносильно пренебрежению скольжением при холостом ходе.

Тогда для ω получим следующие значения:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C}}, \quad (\text{II, 24})$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{\sigma L_1 C}}. \quad (\text{II, 25})$$

Эти выражения показывают, что в установившемся режиме холостого хода асинхронный генератор дает электрические колебания с частотами, определяемыми, с известной степенью приближения, из условий резонанса: индуктивностью фазы статора, индуктивностью рассеяния фазы статора и емкостью конденсаторов возбуждения.

Из этих двух выражений практический интерес представляет формула (II, 24), а формула (II, 25) не имеет смысла, как соответствующая оборотам машины, значительно превосходящим обороты, при которых возникают колебания, подсчитанные по формуле (II, 24).

Полученная зависимость

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C}}, \quad (\text{II, 24})$$

и положена в основу исключительно простого графического метода расчета режима холостого хода асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением.

Пользуясь этим методом, легко определить напряжение, до которого возбудится асинхронный генератор, и ток холостого хода по пересечению магнитной характеристики машины (получаемой из опыта холостого хода) и вольтамперной характеристики конденсаторов возбуждения, построенных для одной и той же частоты возникших в генераторе колебаний (рис. 4).

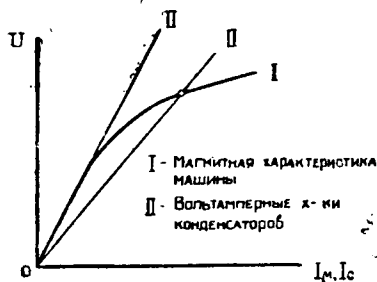


Рис. 4.

Процесс самовозбуждения при этом представляется следующим образом: первым импульсом для самовозбуждения является наличие потока остаточного магнетизма Φ_0 с числом полюсов, соответствующим числу полюсов статорной обмотки; при вращении ротора посторонним двигателем, поток остаточного магнетизма наводит в обмотках статора незначительную э. д. с., которая при включении на нее конденсаторов, посылает реактивный ток, создающий ампервитки реакции, действующие в том же направлении, что и ампервитки возбуждения, и, суммируясь с ними, вызывает увеличение магнитного потока; в результате этого возникает периодический процесс изменения тока и э. д. с. генератора с одновременным изменением их амплитуды.

Указанный процесс продолжается до тех пор, пока не достигнет стационарного состояния, определяемого пересечением магнитной характеристики машины и вольтамперной характеристики цепи возбуждения (рис. 5).

Как показывает осциллографирование, длительность процесса самовозбуждения невелика и зависит от мощности машины, числа ее оборотов и величины приключенной емкости.

Форма же кривых фазного напряжения и тока, генерируемых асинхронным генератором, при нормальном насыщении их магнитной системы почти не отличаются от синусоиды.

При больших значениях емкости конденсаторов возбуждения и связанных с нею значительным реактивным током и высоким насыщением магнитной системы машины происходит не-

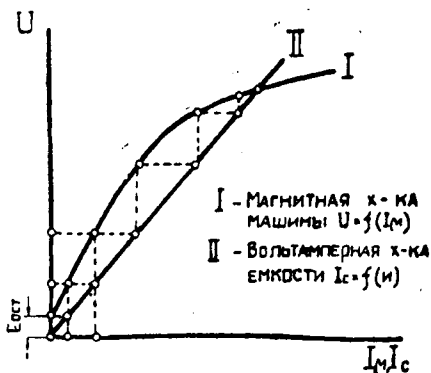


Рис. 5.

которое искажение синусоидальной формы этих кривых за счет составляющих от высших гармоник.

Из рис. 4 видно, что не всякая емкость способна вызвать самовозбуждение асинхронного генератора.

Для того чтобы самовозбуждение имело место, необходимо пересечение показанных на рисунке характеристик.

Емкость, для которой вольтамперная характеристика является касательной к кривой намагничивания в ненасыщенной части, и будет тем нижним предельным (критическим) значением емкости, при которой еще возможно самовозбуждение машины.

Для обеспечения устойчивого самовозбуждения необходимо, чтобы угол наклона емкостной вольтамперной характеристики по отношению к оси абсцисс был меньше критического угла, соответствующего углу, образованному с осью абсцисс касательной к кривой намагничивания, проведенной через начало координат.

Как и в случае самовозбуждающихся генераторов постоянного тока, асинхронный генератор с конденсаторным возбуждением, при отсутствии насыщения, работал бы неустойчиво.

Явление насыщения стали устанавливает динамическое состояние системы, определяя значение тока и напряжения при установившемся режиме.

Однако машина может не возбудиться и при емкости конденсаторов возбуждения, значительно превосходящей по величине нижнее предельное (критическое) значение емкости возбуждения.

Это будет тогда, когда вольтамперная характеристика конденсаторов возбуждения примет положение, параллельное насыщенному участку магнитной характеристики генератора. Срыв самовозбуждения генератора может произойти и при неизменной емкости конденсаторов возбуждения, если скорость вращения генератора переменна.

В этом случае вместе со скоростью вращения будет изменяться и частота генератора, что вызовет изменение крутизны его магнитной характеристики и наклона вольтамперной характеристики конденсаторов возбуждения.

Нижнее критическое значение скорости вращения генератора, при котором еще возможно самовозбуждение, соответствует частоте, при которой наклон вольтамперной характеристики конденсаторов имеет одинаковый угол с наклоном ненасыщенной части магнитной характеристики машины.

Верхнее критическое значение скорости будет соответствовать частоте, при которой вольтамперная характеристика конденсаторов будет параллельной насыщенной части магнитной характеристики машины.

Часто при исследовании работы асинхронных генераторов приближенным графическим методом бывает удобнее оперировать не с магнитными и вольтамперными характеристиками,

а перейти к легко получаемым из них реактивным проводимостям: машины при холостом ходе и цепи конденсаторов возбуждения.

Такие проводимости изображены на рис. 6. По ним легко определить напряжение на зажимах, до которого возбуждётся асинхронный генератор при данной частоте и при различных значениях ёмкостной проводимости подключённых к машине конденсаторов возбуждения.

Ёмкостные проводимости в этом случае будут представлять собой ряд прямых линий, параллельных оси ординат и удален-

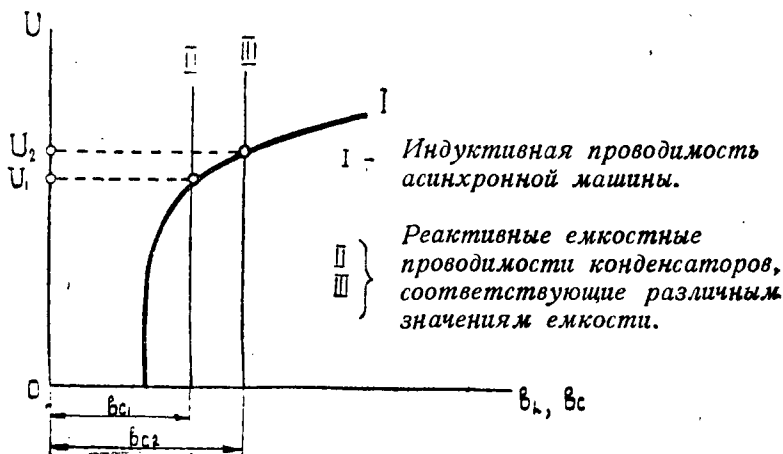


Рис. 6.

ных от нее на величину, соответствующую значению ёмкостной проводимости конденсаторов возбуждения.

Точка пересечения кривой индуктивной проводимости асинхронного генератора с прямой ёмкостной проводимости цепи возбуждения и даст нам значение напряжения, до которого возбуждётся генератор при данной ёмкости, работая с данной частотой в режиме холостого хода.

Пользуясь указанным методом и имея ряд построенных для различных частот магнитных характеристик машины и вольт-амперных характеристик цепи возбуждения или их реактивных проводимостей, можно получить достаточно близкое к действительному представлению о поведении машины, работающей на холостом ходу при различных значениях ёмкостей и разным числе оборотов машины. Однако с особой наглядностью поведение асинхронного генератора при этих условиях работы определяется из рассмотрения ряда его частотных характеристик, представляющих или зависимость фазного напряжения от частоты генерируемых колебаний при различном, но постоянном

значении величины емкости конденсаторов возбуждения (рис. 7), или зависимость напряжения генератора от величины емкости конденсаторов возбуждения при различных, но постоянных частотах (рис. 8).

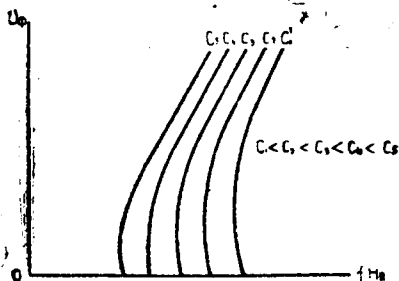


Рис. 7.

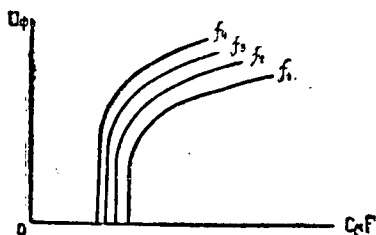


Рис. 8.

§ 7. Определение параметров самовозбуждения по конструктивным данным машины

Формула для подсчета наименьшей критической емкости, при которой возможно еще самовозбуждение при холостом ходе ненасыщенной асинхронной машины, имеет следующий вид:

$$C_{кр.} = \frac{\delta' \cdot 10^9}{(2\pi f_{10})^2 W_1^2 4\pi Q_l \xi_1}, \quad (\text{II, 26})$$

где δ' — теоретический воздушный зазор в см;
 f_{10} — частота токов в статоре при холостом ходе;
 W_1 — число витков одной фазы статора;
 Q_l — теоретическое сечение воздушного зазора в см²;
 ξ_1 — обмоточный коэффициент статорной обмотки.

Эта формула получается, если взять известное из курса электрических машин значение реактанца машины $\frac{0,4\pi\omega W_1^2 \xi_1 Q_l}{\delta_1 10^8}$, приравнять его емкостному сопротивлению конденсаторов возбуждения $\frac{1}{\omega C}$ и решить относительно C .

Проф. Чечет видоизменил эту формулу за счет объединения постоянных величин и пренебрежения скольжением при холостом ходе и придал ей вид:

$$C_{кр.} = A \frac{60^3}{p^3 n^2}, \quad (\text{II, 27})$$

где

$$A = \frac{\delta' \cdot 10^9}{(2\pi)^2 W_1^2 4\pi Q_l \xi_1}.$$

При допущении $f_{10} = \frac{pn}{60}$ или в другом виде:

$$C_{кр.} = B \frac{1}{n^2}, \quad (II, 23)$$

где

$$B = \frac{A \cdot 60^2}{p_2}.$$

Последний вид формулы удобнее для графических построений, так как представляет собой формулу параболы относительно осей $C_{кр.}$ и $\frac{1}{n}$ с параметром $\frac{1}{B}$.

Нужно оговориться, что построенная таким образом парабола располагается несколько выше действительной кривой. Это объясняется тем, что формула (II, 26), выведенная для ненасыщенной машины, справедлива для напряжений, соответствующих прямолинейной части кривой намагничивания ее.

При переходе же кривой намагничивания к криволинейной части, между расчетными и действительными величинами будет расхождение, вызываемое изменением реактивных сопротивлений в зависимости от насыщения машины.

Исходя из допущения равенства нулю скольжения при холостом ходе и вытекающего из него равенства $\omega_0 = \frac{\pi pn}{30}$, а также учитывая зависимость (II, 24) для критического числа оборотов машины, получим формулу:

$$n_{кpo} = \frac{30}{\pi p} \cdot \frac{1}{\sqrt{L_{1max} C}}, \quad (II, 29)$$

которая после подстановки значения L_{1max} , выраженного через конструктивные параметры машины

$$L_{1max} = \frac{4\pi W_1^2 Q_l}{\delta' \cdot 10^9}, \quad (II, 30)$$

и математических преобразований примет вид:

$$n_{кpo} = \frac{1,5 \cdot 10^5 \sqrt{108'}}{\pi p W_1 \sqrt{\pi \xi_1 C Q_l}} \quad (II, 31)$$

или

$$n_{кpo} \approx \frac{8,55 \cdot 10^4 \sqrt{\delta'}}{p W_1 \sqrt{\xi_1 C Q_l}}. \quad (II, 32)$$

Эти формулы говорят о существовании функциональной зависимости между критическим числом оборотов, емкостью конденсаторов возбуждения и конструктивными параметрами машины.

Нужно заметить, что рассмотренные формулы для непосредственного их использования в расчетной инженерной практике

неудобны тем, что выражены редко доступными инженеру данными машины.

Гораздо проще технические расчеты производить, пользуясь вышеуказанным графическим методом, которому обычно и отдается предпочтение.

§ 8. Работа асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением в режиме холостого хода при изменении его скорости вращения в широких пределах

Для анализа поведения асинхронного генератора, работающего на холостом ходу при широком изменении скорости его вращения, необходимо учесть изменение реактанцев машины, имеющее место при этом режиме работы.

Как известно, реактивные сопротивления машины зависят от частоты электрических колебаний, которая при изменении скорости вращения генератора изменяется.

Обычно при двигательном режиме асинхронной машины ее параметры относятся к известной частоте сети, от которой она питается.

В рассматриваемом же случае работы машины частота возникающих электрических колебаний не известна и требует определения. Кроме того, частота будет изменяться вместе с изменением скорости вращения машины. Поэтому удобнее бывает отнести параметры машины к какой-либо определенной частоте, принятой за исходную, а пересчет их на действительную частоту производить введением соответствующих коэффициентов.

В дальнейшем за исходную частоту примем стандартную техническую частоту 50 Hz, на которую рассчитана машина при работе двигателем и при которой легко определяются ее параметры экспериментальным путем.

Обозначим через:

f и ω — действительную частоту генератора при скорости его вращения n_0 оборотов в минуту;

f_0 и ω_0 — механическую частоту, соответствующую скорости вращения $n_0 = \frac{60f_0}{p}$;

f_c и ω_c — исходную частоту;
 $n_c = \frac{60f_c}{p}$ — синхронную скорость вращения, соответствующую исходной частоте.

Пересчет параметров, известных при исходной частоте $f_c = 50$ Hz на действительную частоту f , будем осуществлять введением коэффициента относительной частоты, на который должны умножаться индуктивные и делиться емкостные сопротивления системы.

Коэффициент относительной частоты определяется выражением:

$$F = \frac{f}{f_c} = \frac{\omega}{\omega_c}. \quad (\text{II, 33})$$

Условимся значения реактивных сопротивлений при частоте 50 Hz характеризовать индексом „0“. Те же реактивные сопротивления при действительной частоте будут обозначаться теми же буквами, но без значка „0“.

Например:

- x_{10} — реактанс рассеяния обмотки статора при частоте 50 Hz;
- x_1 — реактанс рассеяния обмотки статора при действительной частоте;
- X_{c0} — емкостное сопротивление конденсаторов возбуждения при частоте 50 Hz;
- X_c — емкостное сопротивление конденсаторов возбуждения при действительной частоте и т. д.

Зависимость между этими величинами, выраженная через относительную частоту, будет иметь вид:

$$x_1 = x_{10}F; X_c = \frac{X_{c0}}{F}; X_m = X_{m0}F \text{ и т. д.}$$

Кроме этого, введем коэффициент относительной скорости вращения, определяемый выражением:

$$a = \frac{f_0}{f_c} = \frac{\omega_0}{\omega_c} = \frac{n_0}{n_c}. \quad (\text{II, 34})$$

Скольжение машины, выраженное через эти коэффициенты, примет вид:

$$S = \frac{f - f_0}{f} = \frac{\omega - \omega_0}{\omega} = \frac{F - a}{F}. \quad (\text{II, 35})$$

Относительную частоту при изучаемом режиме работы можно определить из условий самовозбуждения, которые запишутся теперь в следующем виде:

$$\begin{vmatrix} [r_1 + j(X_{10}F - \frac{X_{c0}}{F})] & jX_{m0}F \\ jX_{m0}FS & (r_2 + jX_{20}FS) \end{vmatrix} = 0. \quad (\text{II, 36})$$

Из них, в результате математических преобразований, аналогичных изложенным выше, получим выражение для скольжения:

$$S = \frac{r_1 r_2}{X_{20}(\sigma X_{10} F^2 - X_{c0})} = \frac{r_2 (X_{c0} - X_{10} F^2)}{r_1 X_{20} F^2}. \quad (\text{II, 37})$$

Отсюда получается биквадратное уравнение для относительной частоты:

$$\sigma X_{10}^2 F^4 - (\sigma X_{c0} X_{10} + X_{10} X_{c0} - r_1^2) F^2 + X_{c0}^2 = 0. \quad (\text{II, 38})$$

Отбрасывая при решении этого уравнения не имеющие смысла отрицательные корни, получим значение относительной частоты:

$$F = \sqrt{\frac{1}{2\alpha X_{10}} X_{c0} \left[1 + \alpha - \frac{r_1^2}{X_{c0} X_{10}} - \sqrt{\left(1 + \alpha - \frac{r_1^2}{X_{c0} X_{10}} \right)^2 - 4\alpha} \right]} \quad (\text{II}, 39)$$

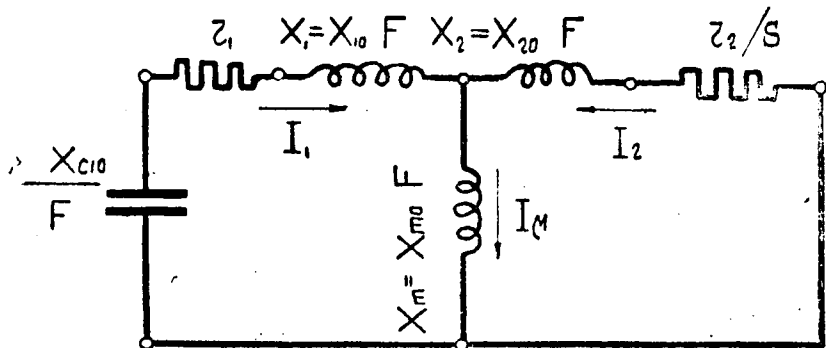


Рис. 9.

или приближенное его значение:

$$F = \sqrt{\frac{X_{c0}}{X_{10}}} \quad (\text{II}, 40)$$

Выражение, связывающее коэффициенты F и α , можно получить из соотношения [см. (II, 35) и (II, 37)]:

$$S = \frac{r_2 (X_{c0} - X_{10} F^2)}{r_1 X_{20} F^2} = \frac{F - \alpha}{F}, \quad (\text{II}, 41)$$

откуда получим уравнение:

$$F^2 (r_1 X_{20} + r_2 X_{10}) - \alpha r_1 X_{20} F - r_2 X_{c0} = 0. \quad (\text{II}, 42)$$

Относительную частоту можно определить и иначе — по эквивалентной схеме (рис. 9) и векторной диаграмме (рис. 10).

Для этого воспользуемся известным уже нам соотношением, согласно которому полные сопротивления внутренней и внешней цепей численно равны, но по знаку противоположны.

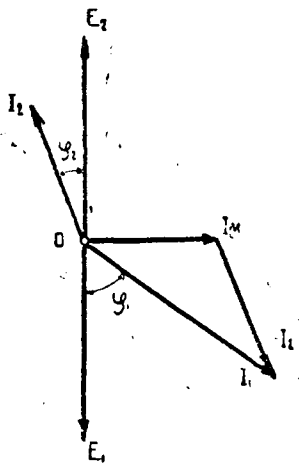


Рис. 10.

Применив это положение к эквивалентной схеме, изображенной на рис. 9, мы можем записать следующую зависимость:

$$r_1 + j(X_1 - X_c) + \frac{jX_m \left(\frac{r_2}{S} + jx_2 \right)}{\frac{r_2}{S} + jx_2 + jX_m} = 0. \quad (\text{II}, 43)$$

Или после математических преобразований:

$$\left[\frac{r_1 r_2}{S} - x_2(x_1 - x_c) - X_m(x_1 - X_c + x_2) \right] + j \left[\frac{r_2}{S}(x_1 - X_c) + r_1 x_2 + X_m \left(r_1 + \frac{r_2}{S} \right) \right] = 0. \quad (\text{II}, 44)$$

Учитывая, что комплексное число может быть равно нулю только при равенстве нулю его действительной и мнимой частей, придем к зависимостям:

$$\left. \begin{aligned} X_m &= \frac{\frac{r_1 r_2}{S} - x_2(x_1 - X_c)}{x_1 - X_c + x_2}, \\ X_m &= - \frac{\frac{r_2}{S}(x_1 - X_c) + r_1 x_2}{r_1 + \frac{r_2}{S}}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II}, 45)$$

Или, выражая параметры системы через их значения при исходной частоте 50 Hz и коэффициент относительной частоты, получим значения X_{m0} :

$$\left. \begin{aligned} X_{m0} &= \frac{r_1 r_2 - x_2 S(x_{10} F^2 - X_{c0})}{S(x_{10} F^2 - X_{c0} + x_2 F^2)}, \\ X_{m0} &= - \frac{r_2(x_{10} F^2 - X_{c0}) + r_1 S x_2 F^2}{(S r_1 + r_2) F^2}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II}, 46)$$

Из этих зависимостей получим выражение:

$$[r_1 r_2 - x_2 S(x_{10} F^2 - X_{c0})](S r_1 + r_2) F^2 = - [r_2(x_{10} F^2 - X_{c0}) + r_1 S x_2 F^2](x_{10} F^2 - X_{c0} + x_2 F^2) S. \quad (\text{II}, 47)$$

После математического преобразования этого выражения получаем следующее биквадратное относительно F уравнение:

$$F^4 (r_1 x_2^2 S^2 + r_2 x_1^2 S) + F^2 [r_1 r_2^2 + (r_1^2 r_2 - 2r_2 x_{10} X_{c0}) S] + r_2 S x_{c0}^2 = 0. \quad (\text{II}, 48)$$

Выражая скольжение генератора через F и α

$$S = \frac{F - \alpha}{F} \quad (\text{II}, 35)$$

и подставляя его в уравнение (II, 48), после математических преобразований приходим к уравнению с одним неизвестным F :

$$F^5(r_1x_{20}^2 - r_2x_{10}^2) - F^4 a(2r_1x_{20}^2 + r_2x_{10}^2) + \\ + F^3(r_1r_2^2 + r_1^2r_2 - 2r_2x_{10}X_{c0} + r_1r_2^2) + \\ + F^2a(r_1r_2 - 2r_2x_{10}X_{c0}) + Fr_2X_{c0}^2 - ar_2X_{c0}^2 = 0. \quad (\text{II, 49})$$

Так как уравнение (II, 49) очень громоздко, то практически удобнее решать систему уравнений (II, 48) и (II, 35) графическим методом, определяя их корни F и S по пересечению кривых, построенных по этим уравнениям.

В этом случае удобнее предварительно решить уравнение (II, 48) относительно F , отбросив не имеющее физического смысла корни. Это решение будет иметь вид:

$$F = \sqrt{\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}}, \quad (\text{II, 48'})$$

где a , b и c — сокращенное обозначение коэффициентов при F и свободного члена в уравнении (II, 48).

Зависимость между скоростью вращения машины, синхронной скоростью, относительной частотой и скольжением, как это вытекает из соотношений (II, 34) и (II, 35), будет выражаться формулой:

$$n_0 = n_c F(1 - S). \quad (\text{II, 50})$$

При этом нужно помнить, что скольжение S при генераторном режиме имеет отрицательное значение.

Определим диапазон частот и скоростей вращения, в пределах которых имеет место самовозбуждение.

Значение пограничных частот и скоростей, внутри которых имеет место самовозбуждение, можно определить из тех соображений, что вначале самовозбуждения ток статора может быть принят равным намагничивающему току ($S=0$), а при срыве самовозбуждения намагничивающий ток принимает нулевое значение ($X_m = X_{m0}F = \infty$).

В соответствии с этим можно записать, исходя из выражений (II, 37) и (II, 50), после подстановки в них значения $S=0$, для начала самовозбуждения (нижний предел), следующие соотношения:

$$F_{кр. н} = \sqrt{\frac{X_{c0}}{X_{10}}}, \quad (\text{II, 40})$$

$$n_{кр. н} = n_c F_{кр. н} = n_c \sqrt{\frac{X_{c0}}{X_{10}}}. \quad (\text{II, 51})$$

Индекс „кр. н“ соответствует нижнему критическому значению, тогда как „кр. в“ будет обозначать критическое значение верхнего предела самовозбуждения.

Для конца самовозбуждения (верхний предел), при котором происходит срыв самовозбуждения, получим значения сколь-

жения и относительной частоты, приравняв в выражениях (II, 45) знаменатели нулю ($X_m = \infty$).

Тогда получим:

$$x_1 - X_c + x_2 = x_{10} F_{кр. в} - \frac{X_{c0}}{F_{кр. в}} + x_{20} F_{кр. в} = 0, \quad (\text{II, 52})$$

$$r_1 + S \frac{r_2}{S_{кр. в}} = 0, \quad (\text{II, 53})$$

откуда

$$F_{кр. в} = \sqrt{\frac{X_{c0}}{x_{10} + x_{20}}}, \quad (\text{II, 54})$$

$$S_{кр. в} = -\frac{r_2}{r_1}. \quad (\text{II, 55})$$

Скорость вращения машины, при которой происходит срыв самовозбуждения, определяется по формуле:

$$n_{кр. в} = \left(1 + \frac{r_2}{r_1}\right) \sqrt{\frac{X_{c0}}{x_{10} + x_{20}}} \cdot n_c, \quad (\text{II, 56})$$

полученной из соотношений (II, 50), (II, 54) и (II, 55).

Определив из уравнений (II, 48) и (II, 35) значения F и S , а из соотношений (II, 46) значение X_{m0} , переходим к дальнейшим расчетам.

Зная X_{m0} , по кривым $X_{m0} = f(I_\mu)$ и $I_\mu X_{m0} = f(I_\mu)$, которые должны быть известны, можно определить значения I_μ и $I_\mu X_{m0}$, а по ним и токи I_1 и I_2 из выражений, вытекающих из векторной диаграммы и эквивалентной схемы:

$$I_1 \sqrt{r_1^2 + \left(x_{10} F - \frac{X_{c0}}{F}\right)^2} = I_\mu X_{m0} F, \quad (\text{II, 57})$$

$$I_2 \sqrt{\left(\frac{r_2}{S}\right)^2 + (x_{20} F)^2} = I_\mu X_{m0} F, \quad (\text{II, 58})$$

откуда

$$I_1 = \frac{I_\mu X_{m0} F}{\sqrt{r_1^2 + \left(x_{10} F - \frac{X_{c0}}{F}\right)^2}}, \quad (\text{II, 59})$$

$$I_2 = \frac{I_\mu X_{m0} F}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{S}\right)^2 + (x_{20} F)^2}}. \quad (\text{II, 60})$$

Ток ротора I_2 можно подсчитать и по формуле:

$$I_2 = I_1 \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} S. \quad (\text{II, 61})$$

Она получается следующим образом: берется выражение, вытекающее из векторной диаграммы

$$I_1 \cos \varphi_1 = -I_2 \cos \varphi_2, \quad (\text{II, 62})$$

и решается совместно с уравнениями (II, 57) и (II, 58) после подстановки значений $\cos \varphi_1$ и $\cos \varphi_2$, выраженных через соотношения сторон треугольников сопротивлений первичной и вторичной цепей.

Особенно наглядное представление об изменении тока I_1 у генератора с неизменным значением, емкости конденсаторов возбуждения при изменении скорости его вращения в пределах самовозбуждения ($n_{кр. н} \div n_{кр. в}$) дает кривая $I_1 = f(n_0) = f(\alpha)$ (рис. 11).

Эта кривая показывает, что при изменении числа оборотов генератора в указанных пределах ток генератора сначала растет от нуля до максимума, затем начинает уменьшаться и снижается до нуля.

Если построить ряд таких кривых для одной и той же машины, но при различных значениях емкости конденсаторов возбуждения, то из рассмотрения их можно сделать следующие выводы: при повышении скорости вращения генератора ток статора увеличивается только до определенной величины; чем больше емкость конденсаторов возбуждения, тем меньше максимальная величина тока генератора и возникает она при меньшей скорости вращения; крутизна восходящей части кривых $I_1 = f(n_0)$ больше при большем значении емкости конденсаторов возбуждения; диапазон изменения скорости вращения машины между их критическими значениями больше при меньшем значении емкости конденсаторов возбуждения.

Напряжение генератора при холостом ходе определяется из выражения:

$$U_1 = I_1 X_{co} \cdot \frac{1}{F}. \quad (\text{II, 63})$$

Мощность, развиваемая асинхронным генератором при самовозбуждении, определяется выражением:

$$P = 3(I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2). \quad (\text{II, 64})$$

Или, после подстановки в него значения I_2 из выражения (II, 61),

$$P = 3I_1^2 r_1 (1 + S). \quad (\text{II, 65})$$

Момент, развиваемый при самовозбуждении, определяется по формуле:

$$M = 2,925 I_1^2 r_1 \cdot \frac{1}{n_c F}. \quad (\text{II, 66})$$

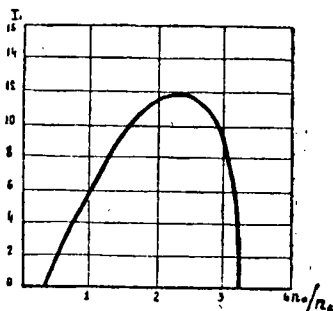


Рис. 11.

Это соотношение получается из общеизвестного выражения для момента $M = 0,975 \frac{P}{n}$ после подстановки в него значений P и n из уравнений (II, 65) и (II, 50).

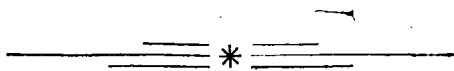
Производственное значение работы асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением в режиме холостого хода не исчерпывается одними генераторными установками.

Явление самовозбуждения от конденсаторов может наблюдаться также в установках индукционных машин при их использовании в качестве двигателей для привода производственных механизмов, и неучет его может быть причиной усложнений и даже источником аварий при эксплуатации этих установок.

Так, например, при индивидуальном исправлении $\cos \varphi$ индукционных двигателей и включении конденсаторов на их зажимы (особенно в установках с автотрансформаторным пуском), самовозбуждение может быть причиной перенапряжений при отключении двигателя от сети. Повторное включение такой, еще продолжающей вращаться самовозбужденной машины на сеть может сопровождаться сложными переходными процессами, аналогичными тем, которые имеют место при включении на параллельную работу несфазированных синхронных генераторов, так как при этом, обычно, асинхронный генератор и сеть имеют различную частоту и их напряжения отличаются по величине и не совпадают по фазе.

В результате этого могут возникнуть переходные моменты вращения значительной величины и при приводе асинхронной машиной механизмов, обладающих значительной инерцией, это может привести к повреждению соединительных муфт и скручиванию валов.

При соответствующем подборе емкостей развиваемые при самовозбуждении мощности и моменты могут быть использованы для эффективного торможения приводов с индукционными двигателями.



ГЛАВА III

РАБОТА АСИНХРОННОГО САМОВОЗБУЖДАЮЩЕГОСЯ ГЕНЕРАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

§ 9. Общие условия самовозбуждения и работы генератора под нагрузкой

При работе самовозбуждающегося асинхронного генератора на симметричную нагрузку, на его зажимы параллельно конденсаторам с проводимостью $b_c = \frac{1}{X_c} = \omega C$ включаются другие приемники с проводимостями: активной g_n и реактивной b_n . Последнюю будем считать имеющей индуктивный характер, так что общая реактивная проводимость внешней сети рассматриваемой системы будет:

$$b_{\text{вн.}} = b_n - b_c, \quad (\text{III, 1})$$

Переходя к сопротивлениям внешней сети, получим:

$$R_{\text{вн.}} = \frac{g_n}{g_n^2 + (b_n - b_c)^2}, \quad (\text{III, 2})$$

$$X_{\text{вн.}} = \frac{b_n - b_c}{g_n^2 + (b_n - b_c)^2}. \quad (\text{III, 3})$$

При этом предполагается, что численно $b_c > b_n$, так что $X_{\text{вн.}}$ носит емкостный характер.

Если при изменении нагрузки коэффициент мощности ее остается постоянным, то $R_{\text{вн.}}$ и $X_{\text{вн.}}$ можно выразить так:

$$R_{\text{вн.}} = \frac{g_n}{g_n^2 + (g_n \operatorname{tg} \varphi_n - b_c)^2}, \quad (\text{III, 4})$$

$$X_{\text{вн.}} = \frac{g_n \operatorname{tg} \varphi_n - b_c}{g_n^2 + (g_n \operatorname{tg} \varphi_n - b_c)^2}, \quad (\text{III, 5})$$

так как в этом случае

$$\frac{b_n}{g_n} = \operatorname{tg} \varphi_n = \text{const.}$$

При работе генератора на нагрузку основные уравнения системы принимают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} [(R_{вн.} + r_1) + j(X_{вн.} + X_1)] I_1 + jX_m I_2 &= 0, \\ jX_m S I_1 + (r_2 + jX_2 S) I_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{III, 6})$$

Так как аналитическим условием устойчивой работы самовозбужденной машины под нагрузкой является получение нетривиальных решений системы уравнений (III, 6), то оно может быть выражено в следующем виде:

$$\left| \begin{array}{cc} [(R_{вн.} + r_1) + j(X_{вн.} + X_1)] & jX_m \\ jX_m S & (r_2 + jX_2 S) \end{array} \right| = 0. \quad (\text{III, 7})$$

Или иначе:

$$\left. \begin{aligned} (R_{вн.} + r_1)r_2 - (X_{вн.} + X_1)X_2 S &= 0, \\ (R_{вн.} + r_1)X_2 S + r_2(X_{вн.} + X_1) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{III, 8})$$

Определяя ток I_2 из второго уравнения системы уравнений (III, 6) и подставляя в первое, получим условие самовозбуждения системы в следующей форме:

$$\left. \begin{aligned} (R_{вн.} + r_1) + r_2 \frac{(1-\sigma)X_1 X_2 S}{r_2^2 + X_2^2 S^2} &= 0, \\ X_{вн.} + X_1 - X_2 \frac{(1-\sigma)X_1 X_2 S^2}{r_2^2 + X_2^2 S^2} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (\text{III, 9})$$

где S — скольжение, определяемое из соотношений:

$$\left. \begin{aligned} \omega_0 &= \omega(1 - S), \\ p\omega_{вр.} &= \omega(1 - S), \end{aligned} \right\} \quad (\text{III, 10})$$

где $\omega_{вр.}$ — угловая скорость вращения генератора.

Эти уравнения и описывают процессы в рассматриваемой энергетической системе при работе асинхронного генератора на нагрузку. Они показывают, что процесс работы в состоянии самовозбуждения на нагрузку возможен только при отрицательном скольжении, дают значение частоты, при котором возможно самовозбуждение и определяют зависимость между частотой напряжения и тока статора и скоростью вращения ротора. Кроме того, эти уравнения показывают, что при работе машины в установившемся режиме самовозбуждения общие активные и реактивные сопротивления машины, как целого электромагнитного механизма, должны быть равны по величине, но противоположны по знаку, соответственно активному и реактивному сопротивлениям внешней цепи, что равносильно равенству по величине и противоположности по знаку полных сопротивлений и проводимостей машины и ее внешней сети.

Из этого следует, что конденсаторы являются источником реактивной энергии, идущей на покрытие нужд в ней как машины, так и потребителей, а асинхронный генератор является источником активной энергии системы.

Таким образом, при установившемся режиме работы асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением на нагрузку, скольжение генератора и насыщение его магнитной системы устанавливаются такими, при которых осуществляется

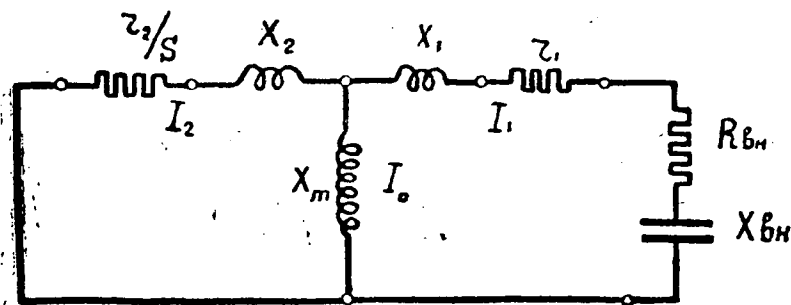


Рис. 12.

равенство по величине, но противоположность по знаку сопротивлений (проводимостей) генератора и нагрузки.

Уравнения (III, 6) можно выразить и в другом виде, учтя соотношение (II, 6):

$$I_0 = I_\mu = I_1 + I_2, \quad (II, 6)$$

Тогда они примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \{(R_{вн.} + jX_{вн.}) + [r_1 + j(X_1 - X_m)]\} I_1 + jX_m I_0 = 0, \\ [r_2 + jS(X_2 - X_m)] I_2 + jX_m S I_0 = 0. \end{aligned} \right\} (III, 11)$$

Учитывая, что:

$$\begin{aligned} X_1 - X_m &= \omega(L_1 - M) = x_1, \\ X_2 - X_m &= \omega(L_2 - M) = x_2. \end{aligned}$$

предыдущие уравнения можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \{(R_{вн.} + jX_{вн.}) + (r_1 + jx_1)\} I_1 + jX_m I_0 = 0, \\ (r_2 + jSx_2) I_2 + jSX_m I_0 = 0 \end{aligned} \right\} (III, 12)$$

или

$$\left. \begin{aligned} \{(R_{вн.} + jX_{вн.}) + (r_1 + jx_1)\} I_1 + jX_m I_0 = 0, \\ \left(\frac{r_2}{S} + jx_2\right) I_2 + jX_m I_0 = 0. \end{aligned} \right\} (III, 13)$$

Последние зависимости позволяют заменить полную схему установки простой эквивалентной схемой, изображенной на

рис. 12, удобной для многих исследований, к которой легко привести действительные асинхронные машины путем приведения параметров вторичной обмотки к первичной.

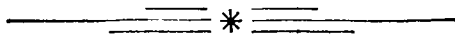
§ 10. Возможные режимы работы асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением под нагрузкой

Из рассмотрения общих условий работы асинхронного генератора под нагрузкой, изложенных в предыдущем параграфе, следует, что при нагрузке генератора частота тока в его статоре всегда меньше частоты вращения генератора (скольжение всегда отрицательно) и изменяется с изменением скольжения. Скольжение же генератора зависит от параметров машины и внешней сети и от числа оборотов генератора.

Всякое изменение нагрузки без изменения емкости цепи возбуждения и числа оборотов вызовет изменение скольжения, частоты и напряжения генератора. Для поддержания частоты генератора постоянной при этих условиях работы, необходимо изменение его числа оборотов. С другой стороны, частота генератора зависит от параметров машины и цепи возбуждения; изменяя их можно изменять и частоту генератора.

Отсюда вытекают следующие возможные режимы работы генератора под нагрузкой:

- 1) работа генератора при постоянной частоте и неизменном возбуждении;
- 2) работа при постоянной скорости вращения и неизменном возбуждении;
- 3) работа при постоянной скорости вращения и изменении параметров генератора или цепи возбуждения.



ГЛАВА IV

РАБОТА АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА СИММЕТРИЧНУЮ НАГРУЗКУ ПРИ ПОСТОЯННОЙ ЧАСТОТЕ

§ 11. Общие условия и методика исследования

В настоящей главе изучается работа асинхронного генератора на симметричную переменную нагрузку с постоянной частотой.

Частота генератора поддерживается постоянной за счет регулирования его скорости вращения в соответствии с нагрузкой.

При изучении работы асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением, в рассматриваемом режиме удобнее и проще всего применить метод круговых диаграмм.

§ 12. Метод круговых диаграмм токов при изучении работы на симметричную нагрузку асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением

Работе асинхронного генератора на симметричную нагрузку будет соответствовать принципиальная схема, изображенная на рис. 13.

Здесь I_1 — ток генератора;

I_c — ток цепи возбуждения;

I_n — ток потребителей.

Эти токи связаны общеизвестной, вытекающей из закона Кирхгофа, зависимостью

$$\sum I = 0. \quad (IV, 1)$$

При исследовании работы асинхронного самовозбуждающегося генератора под нагрузкой, будем исходить из схемы замещения генератора, изображенной на рис. 14.

Рассматриваемой схеме замещения соответствует круговая диаграмма токов, нашедшая широкое применение при изучении работы асинхронных машин.

Как известно, существует ряд круговых диаграмм, строящихся с той или иной степенью приближения.

Наибольшее распространение при исследовании асинхронных машин у нас получили уточненная диаграмма Костенко

и диаграмма Гольдшмидта. Обе они строятся по данным опытов холостого хода и короткого замыкания и данным о сопротивлении обмотки статора в нагретом состоянии, на основании общепринятого преобразования эквивалентной схемы путем

выноса намагничивающегося контура на зажимы машины.

В уточненной диаграмме Костенко исправление ошибки, связанной с таким преобразованием, производится по предложенному им способу. Этот способ, как известно, состоит в том, что вынося намагничивающий контур на внешние зажимы машины, одновременно изменяют параметры основного контура таким образом, чтобы при любой заданной нагрузке токи машины в нормальной эквивалентной схеме и в схеме с вынесенным намагничивающим контуром были равны между собой как по величине, так и по фазе.

Это уточнение не вносит значительных усложнений в методику построения круговой диаграммы и сводится, как показал Костенко, к повороту центра круга токов в направлении вращения векторов на угол α по отношению к линии центра диа-

граммы Гольдшмидта, которая совпадает с линией постоянных потерь.

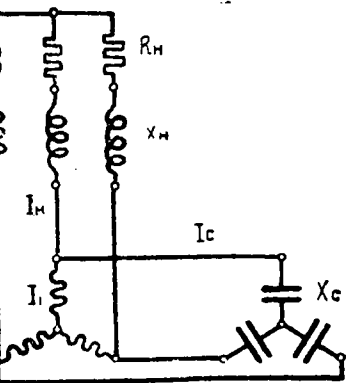


Рис. 13.

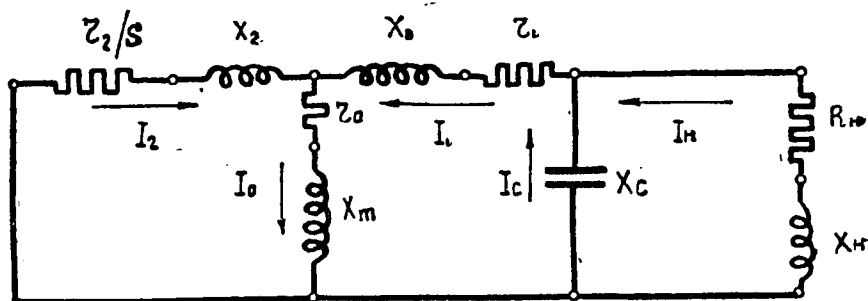


Рис. 14.

граммы Гольдшмидта, которая совпадает с линией постоянных потерь.

Величина α определяется формулой:

$$\alpha = \arcsin \frac{2I_0 r_1}{U_{1\phi}}. \quad (IV, 2)$$

Эти диаграммы мы и положим в основу при исследовании работы асинхронной машины в изучаемом режиме.

Первая диаграмма предпочтительнее, особенно для мало-мощных генераторов, но и вторая дает результаты, вполне приемлемые при технических расчетах. Для последних можно пользоваться и методом построения диаграммы Гольдшмидта по данным справочников и каталогов, разработанным автором.

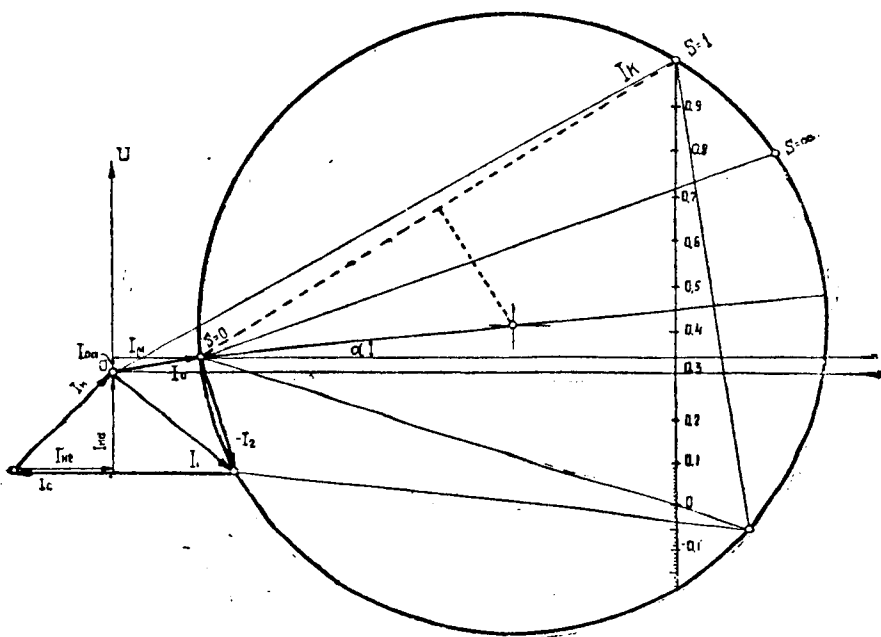


Рис. 15.

Этот метод построения диаграммы Гольдшмидта удобен тем, что, не требуя эксперимента, дает возможность построения ее без наличия самих машин, т. е. в нормальных условиях проектной работы, и позволяет произвести массовый анализ работы в генераторном режиме целой серии асинхронных машин, используя только типовые данные каталогов и технических справочников.

На рис. 15 изображена уточненная круговая диаграмма токов асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением, работающего на смешанную нагрузку.

Здесь U — напряжение сети, на которую работает генератор;

I_1 — ток генератора;

I_c — ток конденсаторов возбуждения;

I_N — ток нагрузки, состоящей из активной составляющей I_{N1} и реактивной составляющей I_{N2} ;

I_0 — ток холостого хода, состоящий из активной составляющей I_{0a} и реактивной I_{0r} , являющейся намагничивающим током;

I_k — ток короткого замыкания;

$$\alpha = \arcsin \frac{2I_0 r_1}{U}.$$

§ 13. Определение величины емкости конденсаторов возбуждения при включении их на генераторное напряжение

Применение метода круговых диаграмм токов к изучению генераторного режима самовозбужденных асинхронных машин дает возможность, кроме показателей, аналогичных показателям при двигательном режиме, определить еще и значение емкостей конденсаторов, необходимых для возбуждения асинхронного генератора до напряжения, для которого построена круговая диаграмма токов, при питании от него потребителей с различными коэффициентами мощности и токами нагрузки.

Из этой диаграммы определяется емкостный ток, необходимый для возбуждения генератора при данной нагрузке до напряжения, для которого построена эта диаграмма (обычно номинального), а по нему и емкость конденсаторов возбуждения по формуле:

$$C = \frac{I_c \cdot 10^6}{2\pi f U_\phi}, \quad (\text{IV, 3})$$

где C — емкость конденсаторов возбуждения в μF на фазу при соединении их по схеме звезда;

I_c — фазный ток конденсаторов возбуждения;

f — частота, при которой работает генератор;

U_ϕ — фазное напряжение на зажимах конденсаторов возбуждения.

Величина емкости, необходимая для самовозбуждения асинхронного генератора до нужного напряжения, может быть определена также из баланса отстающих и опережающих реактивных мощностей генератора, потребителей и конденсаторов возбуждения.

Реактивная отстающая мощность генератора и потребителей может быть определена по формуле:

$$P_r = P (\operatorname{tg} \varphi_2 + \operatorname{tg} \varphi_n), \quad (\text{IV, 4})$$

где P — активная мощность, отдаваемая генератором потребителям;

φ_2 — угол сдвига фаз между напряжением и током генератора;

φ_n — угол сдвига фаз между напряжением и током потребителей.

Для компенсации этой отстающей реактивной мощности необходима численно равная ей опережающая реактивная мощность конденсаторов возбуждения. Отсюда величина емкости конденсаторов возбуждения на фазу генератора при включении их на генераторное напряжение может быть определена по формулам:

при соединении конденсаторов звездой

$$C_Y = \frac{P(\operatorname{tg} \varphi_2 + \operatorname{tg} \varphi_H)}{3U_{\phi}^2 \omega} = \frac{P(\operatorname{tg} \varphi_2 + \operatorname{tg} \varphi_H)}{6\pi f U_{\phi}^2}; \quad (\text{IV}, 5)$$

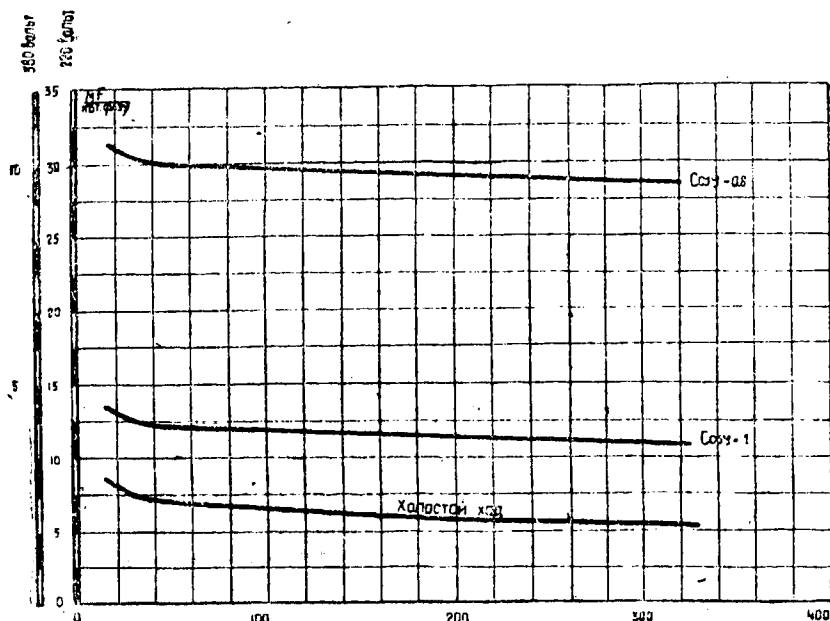


Рис. 16.

при соединении конденсаторов треугольником

$$C_{\Delta} = \frac{P(\operatorname{tg} \varphi_2 + \operatorname{tg} \varphi_H)}{U_A^2 \omega} = \frac{P(\operatorname{tg} \varphi_2 + \operatorname{tg} \varphi_H)}{2\pi f U_A^2}. \quad (\text{IV}, 6)$$

Метод круговых диаграмм токов был применен для исследования работы в генераторном режиме индукционных машин единой Всесоюзной серии электрических машин с синхронным числом оборотов 1500 в минуту, мощностью от 1 до 320 кВт с напряжением 380 в, от 120 до 900 кВт с напряжением 3000 в и от 230 до 1200 кВт с напряжением 6000 в.

Работа этих машин в качестве генераторов с конденсаторным возбуждением рассматривалась при скорости вращения, близкой

к синхронной, и питании потребителей с коэффициентами мощности, равными 1 и 0,8, создающих номинальную нагрузку генератора при номинальном его напряжении и частоте 50 Гц.

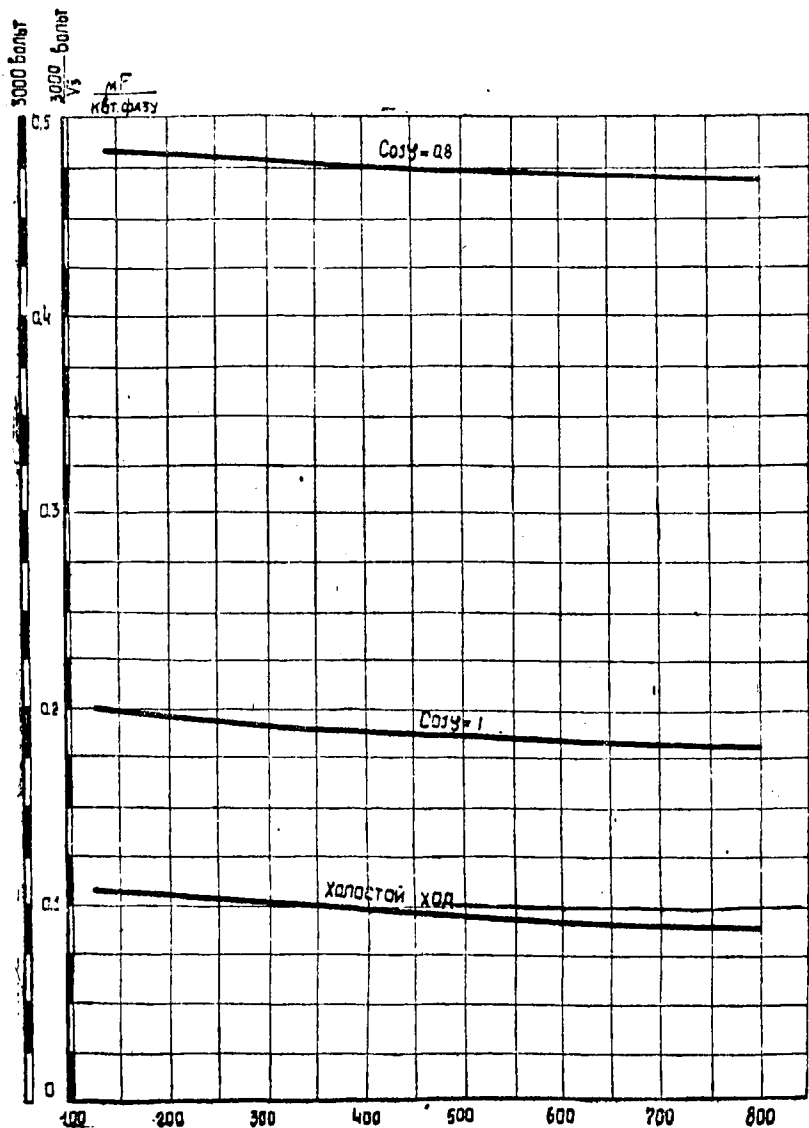


Рис. 17.

Результаты этого исследования обработаны и представлены кривыми, изображенными на рис. 16, 17 и 18.

Эти кривые дают зависимость значения удельной емкости конденсаторов возбуждения $\left(\frac{\mu F}{\text{квт фазу}}\right)$ от мощности машины и коэффициента мощности нагрузки.

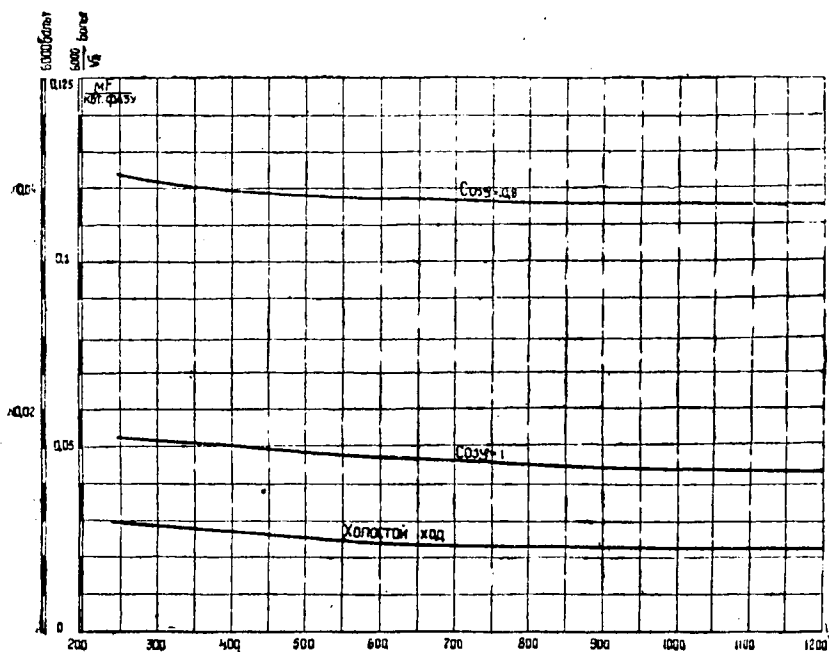


Рис. 18.

§ 14. Зависимость величины емкости конденсаторов возбуждения от напряжения на их зажимах

Увеличением напряжения на обкладках конденсаторов возбуждения возможно достигнуть значительного снижения их емкости, так как величина последней уменьшается пропорционально квадрату отношения $\frac{U_c}{U_1}$, где U_c — напряжение на зажимах конденсаторов, а U_1 — напряжение на зажимах генератора.

Повышение напряжения на зажимах конденсаторов практически может быть осуществлено путем включения их на высокую сторону повышающих трансформаторов, или автотрансформаторов, низкая сторона которых питается от асинхронного генератора.

Это бывает выгодным при низковольтных машинах, для которых получаются значительные величины емкостей конденса-

торов возбуждения при их непосредственном включении на зажимы генератора.

Часто сама схема коммутации установки позволяет перенести конденсаторы возбуждения на высокую сторону и тем удешевить их стоимость (электрические станции с передачей энергии от них высоким напряжением, индивидуальное питание маломощных радиопередающих устройств, рентгеновских установок и т. д.).

§ 15. Повышение напряжения асинхронного генератора при сбросе нагрузки

Выше были приведены значения емкостей конденсаторов возбуждения, необходимые для поддержания напряжения асинхронных генераторов номинальным при номинальной на-

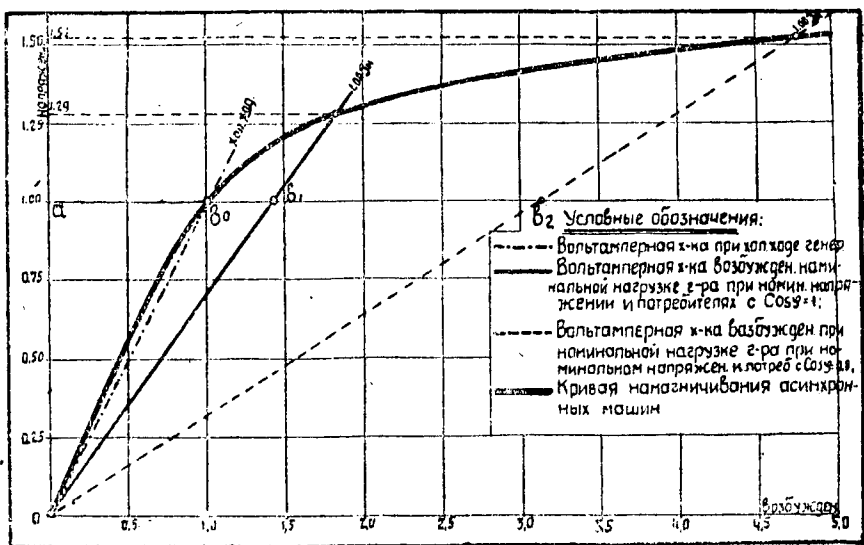


Рис. 19.

грузке его, создаваемой потребителями с $\cos \varphi = 1$ и $\cos \varphi = 0,8$.

Для выяснения вопроса о повышении напряжения на зажимах асинхронного генератора при сбросе нагрузки, применим графический метод, известный нам из § 5 главы II.

Исходными данными для него будут:

1) магнитная характеристика генератора, построенная по данным опыта холостого хода;

2) вольтамперные емкостные характеристики, соответствующие возбуждению генератора до номинального напряжения при номинальной нагрузке его потребителями с $\cos \varphi = 1$ и $\cos \varphi = 0$.

На рис. 19 показаны построения, связанные с этим методом расчета, для конкретного случая, причем, напряжения и токи даны в относительных единицах (за единицу приняты номинальные напряжения и ток намагничивания, соответствующий этому напряжению при холостом ходе генератора).

Обозначенные здесь отрезки соответствуют:

\overline{ab}_0 — току возбуждения при холостом ходе и номинальном напряжении;

\overline{ab}_1 — току возбуждения при номинальной нагрузке с $\cos \varphi = 1$ и номинальном напряжении;

\overline{ab}_2 — току возбуждения при номинальной нагрузке с $\cos \varphi = 0,8$ и номинальном напряжении.

Откладывая эти отрезки и соединяя точки b_1 и b_2 с началом координат, получим вольтамперные характеристики, точки пересечения которых с магнитной характеристикой машины определяют значения напряжений генератора при сбросе рассматриваемых нагрузок со степенью приближения, соответствующей данному методу.

Таким образом, при неизменном возбуждении генератора, напряжение на его зажимах изменяется в зависимости от изменения нагрузки. Эта зависимость наглядно выражается внешними характеристиками генератора.

§ 16. Круговая диаграмма проводимостей при изучении работы асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением

Для того чтобы иметь возможность применить круговую диаграмму к изучению поведения асинхронного самовозбуждающегося генератора с неизменным возбуждением при изменении его нагрузки, нужно чтобы она отражала переменную величину параметров этого генератора. Для этого необходимо от круговой диаграммы токов перейти к круговой диаграмме проводимостей асинхронного генератора.

В самом деле, если принять допущение о постоянстве реактанцев рассеяния генератора при работе его в пределах наиболее интересующих нас нагрузок от холостого хода до номинальной, то диаметр круговой диаграммы токов будет изменяться по величине при изменении нагрузки генератора, так как он пропорционален напряжению генератора, меняющемуся с изменением нагрузки.

Круговая же диаграмма проводимостей свободна от этой зависимости (величины диаметра от напряжения) и поэтому

удобна для исследования работы генератора при переменной нагрузке.

Круговую диаграмму проводимостей асинхронного генератора легко можно получить из его круговой диаграммы токов путем деления всех токов этой диаграммы на напряжение, для которого она была построена, дополнив ее кривыми реактивной и активной проводимостей намагничивающего контура машины в функции ее напряжения, построенными по данным опыта холостого хода.

Эту диаграмму можно также обосновать и рассчитать теоретически, исходя из нижеследующих рассуждений.

По I закону Кирхгофа $\sum I = 0$, что применительно к рассматриваемой системе даст:

$$I_1 + I_c + I_n = 0, \quad (IV, 7)$$

где I_1 — фазное значение силы тока генератора;
 I_c — " " " конденсаторов;
 I_n — " " " нагрузки.

Переходя к проводимостям, путем деления выражения (IV, 7) на напряжение, получим:

$$Y_2 + Y_c + Y_n = 0, \quad (IV, 8)$$

где Y_2 — полная проводимость фазы генератора;
 Y_c — " " " конденсаторов;
 Y_n — " " " нагрузки.

Выразив каждую из этих полных проводимостей через их активную и реактивную составляющие и объединив вещественные и мнимые составляющие, получим:

$$(g_n - g_2) + j[b_c - (b_2 + b_n)] = 0. \quad (IV, 9)$$

Так как комплексное число может быть равно нулю при равенстве нулю действительной и мнимой его частей, то равенство (IV, 9) равносильно двум:

$$g_2 = g_n, \quad (IV, 10)$$

$$b_c = b_2 + b_n. \quad (IV, 11)$$

Эти выражения говорят о том, что при работе асинхронного генератора на нагрузку индивидуальной сети он отдает ей активную мощность, получая от конденсаторов возбуждения необходимую для создания его магнитных потоков реактивную мощность, причем эта, потребляемая генератором от конденсаторов реактивная мощность является только частью реактивной мощности конденсаторной цепи; остальная же ее часть идет на нужды потребителей.

Этой потребностью в реактивной мощности генератора и потребителей и определяется величина емкости конденсаторов возбуждения.

Обычно емкость конденсаторов возбуждения выбирается по условиям получения номинального напряжения при номинальной нагрузке генератора. Изменение нагрузки при неизменном возбуждении и постоянной частоте вызовет изменение напряжения генератора.

Таким образом характер изменения проводимостей отдельных элементов системы, связанных соотношениями (IV, 8) и (IV, 9) будет определять поведение системы при изменении нагрузки.

Проводимости конденсаторов возбуждения и нагрузки не зависят от скольжения генератора, так как генератор работает при постоянной частоте.

Проводимость же генератора зависит как от напряжения, так и от скольжения его.

Если взять за основу эквивалентную схему замещения генератора и вынести в ней, как обычно делают, намагничивающий контур на его зажимы (внося в случае надобности уточнения по методу проф. Костенко), то ток генератора можно рассматривать как геометрическую сумму токов намагничивающего и основного контуров, а полную проводимость фазы генератора — как сумму полных проводимостей этих контуров.

Проводимость намагничивающего контура не зависит от скольжения; но сильно зависит от напряжения. С изменением напряжения генератора изменяется и насыщение магнитопровода машины, что очень сказывается на значении ее полной индуктивности, а следовательно, и проводимости.

Эту зависимость проводимости намагничивающего контура от напряжения машины легко получить на основании данных опыта холостого хода.

Проводимость же основного контура машины практически зависит только лишь от скольжения машины и определяется им по положению на круге диаграммы проводимостей.

Построение круговой диаграммы проводимостей по данным опытов синхронного холостого хода, короткого замыкания и данных о сопротивлении статорной обмотки в нагретом состоянии производится в нижеследующей последовательности.

Из опыта холостого хода определяют полную проводимость фазы генератора при номинальном напряжении по формуле:

$$Y_0 = \frac{U_0}{J_0}; \quad (IV, 12)$$

активную и реактивную ее составляющие по формулам:

$$g_0 = \frac{P_0}{3U_0^2}, \quad (IV, 13)$$

$$b_0 = \sqrt{Y_0^2 - g_0^2} \quad (IV, 14)$$

$\alpha = \arcsin \frac{2I_0 r_1}{U}$ к горизонтали, а в приближенной диаграмме — с горизонталью, проведенной из точки холостого хода.

Дополнив эту диаграмму кривыми активной и реактивной проводимостей намагничивающего контура машины $b_0 = f(U)$ и $g_0 = f(b_0)$ и проводимостями конденсаторов возбуждения и нагрузки, получим диаграмму проводимостей, изображенную на рис. 20.

Здесь K_1 — окружность проводимости основного контура;
 K_2 — кривая реактивной проводимости намагничивающего контура $b_0 = f(U)$;
 K_3 — кривая активной проводимости намагничивающего контура $g_0 = f(b_0)$.

Пользуясь диаграммой проводимостей, легко исследовать работу асинхронного генератора при изменении его нагрузки и построить внешнюю характеристику.

При этом удобно бывает диаграмму проводимостей асинхронного генератора дополнить геометрическим местом точек, по которому будет передвигаться конец емкостной проводимости конденсаторов b_c (кривая K_4 на рис. 20) и шкалой скольжения.

Кривая K_4 представляет собой окружность, проведенную тем же радиусом, что и окружность круговой диаграммы асинхронного генератора, но из центра, сдвинутого по отношению к ее центру на величину b_c в направлении отрицательных абсцисс.

Построение шкалы скольжения очевидно из рис. 20.

§ 17. Построение внешних характеристик асинхронного генератора при помощи диаграммы проводимостей

Пусть во внешней сети, на которую работает асинхронный генератор с конденсаторным возбуждением, включена активная нагрузка, величина которой может изменяться в широких пределах.

Нужно построить внешнюю характеристику генератора для данной нагрузки.

В основу построения внешней характеристики асинхронного генератора положим диаграмму проводимостей, соответствующую данному характеру нагрузки, изображенную на рис. 21.

Пользуясь этой диаграммой, легко определить напряжения генератора, соответствующие проводимостям внешней нагрузки: $g_1, g_2, g_3, g_4 \dots g_n$ и по этим данным построить внешнюю характеристику.

Внешняя характеристика, соответствующая рассматриваемому случаю нагрузок, изображена на рис. 22.

При работе асинхронного генератора на смешанную безмоторную нагрузку (активную и индуктивную) с $\cos \varphi$, остаю-

щимся постоянным при изменении нагрузки, круговая диаграмма проводимостей будет иметь вид, изображенный на рис. 23.

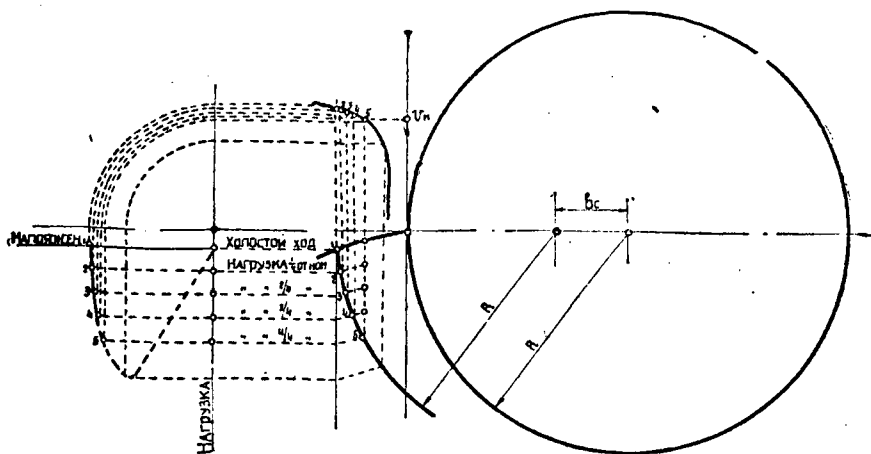


Рис. 21.

Внешняя характеристика, соответствующая этому случаю нагрузок, изображена на рис. 24.

Метод ее построения аналогичен построению предыдущей внешней характеристики.

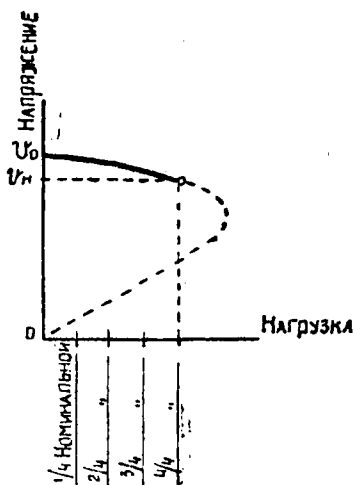


Рис. 22.

Рассматривая внешние характеристики генератора, мы видим, что по мере увеличения нагрузки напряжение его уменьшается и при некотором значении ее, происходит опрокидывание.

Факт опрокидывания, т. е. быстрого падения тока до нуля, свидетельствует о том, что асинхронный самовозбуждающийся генератор в отношении перегрузки ведет себя так же, как шунтовый генератор постоянного тока.

Совершенно аналогично протекает и короткое замыкание асинхронного генератора.

При коротком замыкании генератор лишается связи с источником, намагничивающего тока (тока возбуждения), и установившийся ток короткого замыкания, если пренебречь остаточным магнетизмом, равен нулю.

В создании первого толчка тока в момент короткого замыкания генератора принимает участие магнитный поток, существующий в этот момент, и, в зависимости от его величины,

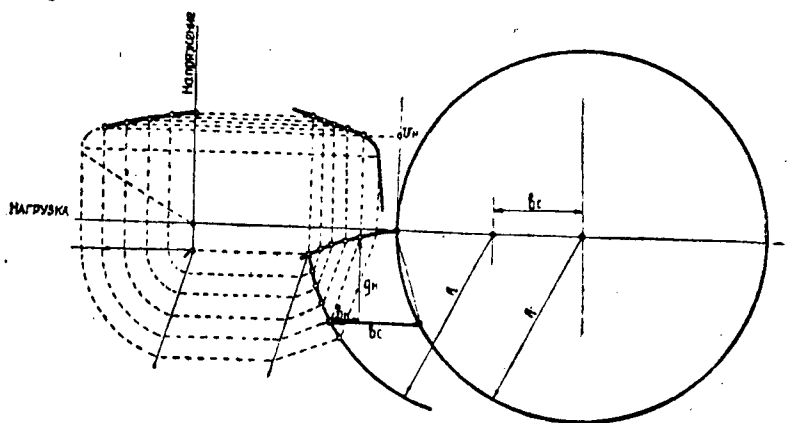


Рис. 23.

бросок токов короткого замыкания в статоре и роторе машины достигает 5—10-кратного значения по отношению к номинальному.

Быстрота спада тока короткого замыкания и конструктивная надежность асинхронных машин делают его практически безопасным для асинхронных генераторов как в термическом, так и в электродинамическом отношении.

Таким образом асинхронные самовозбуждающиеся генераторы не боятся коротких замыканий и в этом отношении ведут себя аналогично шунтовым генераторам постоянного тока.

Очень часто после короткого замыкания или „опрокидывания“ асинхронного генератора его остаточный магнетизм бывает уже недостаточным для самовозбуждения.

Восстановление остаточного магнетизма машины легко может быть осуществлено путем намагничивания ее одним из следующих способов:

1) кратковременным пропусканием переменного тока через обмотку генератора, например, пуском асинхронной машины мотором на холостом ходу;

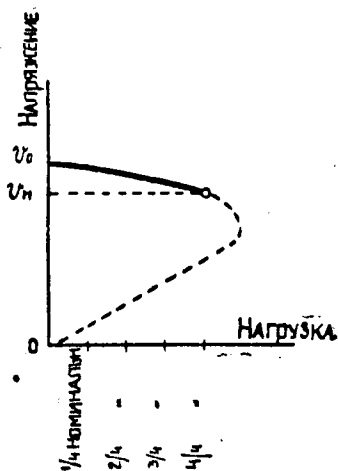


Рис. 24.

2) зарядкой конденсаторов от какого-либо источника электроэнергии и подключением их на развернутый до полных оборотов генератор;

3) кратковременным пропуском постоянного тока от аккумуляторной батареи напряжением 4—6 в через две фазы обмотки статора генератора.

Работа асинхронного генератора на смешанную нагрузку в значительной степени усложняется, если среди потребителей имеются потребители с моторной нагрузкой. Возникающие при этом затруднения особенно остро проявляются при пуске короткозамкнутых асинхронных двигателей потребителей.

Короткозамкнутые асинхронные двигатели, потребляя во время пуска большие пусковые токи при низком пусковом коэффициенте мощности, вызывают большое падение напряжения генератора, снижают устойчивость его работы, переводя работу на неустойчивую часть внешней характеристики, и даже могут привести к размагничиванию машины при пуске моторов относительно большой мощности, создавая в этом случае режим работы генератора, близкий к его короткому замыканию.

Так как при любом характере нагрузок в рассматриваемой энергетической системе должен иметь место баланс реактивных мощностей, т. е. равенство нулю суммы реактивных проводимостей системы, то при неизменном возбуждении емкость конденсаторов будет лимитировать мощность пускаемых от генератора короткозамкнутых двигателей, реактивная проводимость которых при пуске значительно увеличивается, достигая 6—18-кратного увеличения по сравнению с проводимостью при номинальной нагрузке.

Дело более усложняется, если в системе, кроме пускаемого короткозамкнутого двигателя, находятся еще в работе другие асинхронные двигатели. Снижение напряжения при пуске короткозамкнутых двигателей приводит к снижению числа оборотов работающих двигателей и к резкому увеличению их реактивной проводимости, часто приводящей к опрокидыванию и размагничиванию генератора.

Решить вопрос о предельной мощности короткозамкнутого двигателя, пуск которого возможен от асинхронного генератора с неизменным возбуждением, можно при помощи круговой диаграммы проводимостей.

На рис. 25 дан пример решения одной из задач, связанных с изучением работы асинхронного генератора на моторную нагрузку.

Здесь показана схема решения при определении мощности короткозамкнутого двигателя, пускаемого от работающего на холостом ходу генератора при условии, чтобы напряжение генератора при пуске не снижалось ниже напряжения U .

Решение этой задачи ведется в следующем порядке:

По напряжению U определяется соответствующая ему точка a , лежащая на кривой K_2 ; через эту точку a проводится вертикальная линия до пересечения ее с кривой K_3 в точке b ; через точку b проводится под углом φ пусковое к вертикали линия, которая пересечет кривую K_4 в точке c ; отрезок этой линии bc , заключенный между кривыми K_3 и K_4 , в масштабе

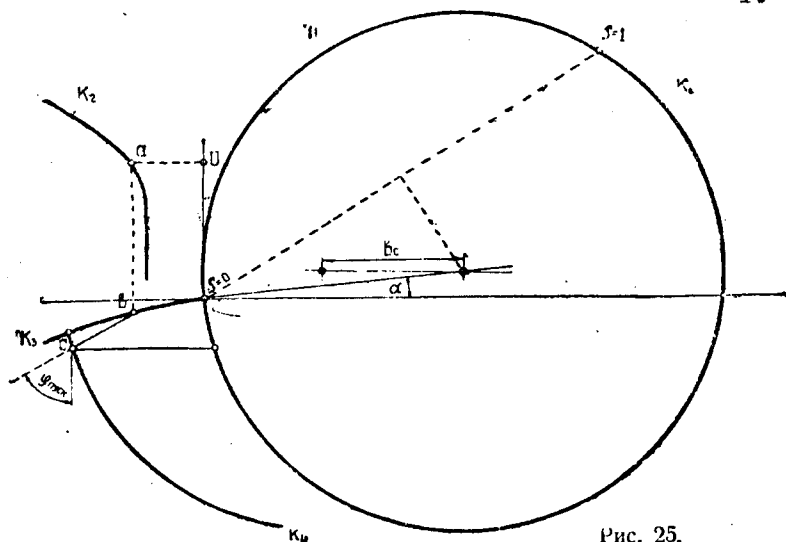


Рис. 25.

проводимостей даст значение полной проводимости пускаемого двигателя $Y_{\text{пуск}}$.

Пусковой ток двигателя определяется по общеизвестной форме:

$$I_{\text{пуск}} = Y_{\text{пуск}} \cdot U.$$

По пусковому току и кратности его по отношению к номинальному и решается задача о допустимой мощности пускаемого двигателя при поставленных условиях.

Пользуясь круговой диаграммой проводимостей, можно решить и другие вопросы, возникающие при изучении работы асинхронных генераторов на моторную нагрузку.

Так, например, по этой диаграмме легко определить величину емкости конденсаторов, включаемых одновременно с пускаемым двигателем в целях повышения его мощности, при осуществлении пуска этого двигателя от ненагруженного генератора или от генератора, несущего определенную частичную нагрузку в момент пуска.

При решении этих задач нужно твердо помнить, что устойчивая работа генератора возможна только тогда, когда емкость конденсаторов возбуждения подобрана так, что создает достаточную реактивную мощность для покрытия потребностей

в ней как генератора, так и потребителей, без перехода работы генератора на неустойчивую часть его характеристики.

С достаточной для практики точностью можно считать, что для устойчивой работы ненагруженного асинхронного генератора с числом оборотов, близким к синхронному (по двигательному режиму), при пуске от него асинхронного короткозамкнутого двигателя (без нагрузки) необходимо соблюдение следующего условия:

$$I_{\text{пуск}} \leq \beta I_0 \left(1 - \frac{b_{0\text{min}}}{b_0} \right),$$

где $I_{\text{пуск}}$ — пусковой ток, потребляемый асинхронным двигателем;

I_0 — ток холостого хода асинхронного генератора при данной емкости конденсаторов возбуждения;

$b_{0\text{min}}$ — реактивная проводимость ненасыщенного асинхронного генератора при холостом ходе;

b_0 — реактивная проводимость асинхронного генератора при холостом ходе и напряжении, до которого он возбуждается при данной емкости конденсаторов возбуждения;

β — опытный коэффициент, учитывающий изменение величины проводимости индукционного двигателя в процессе его разбега при пуске.

Значение β колеблется в пределах от 2,2 до 2,8 и в среднем может быть принято равным 2,5.

Таким образом мощность короткозамкнутого индукционного двигателя зависит от насыщения железа генератора, кратности пускового тока индукционного двигателя по отношению к его номинальному току и продолжительности пуска. Эта мощность будет тем больше, чем выше насыщение генератора (емкость конденсаторов возбуждения), чем ниже кратность пускового тока двигателя и чем меньше продолжительность пуска.

Можно считать, что при работе асинхронного генератора с числом оборотов, близким к синхронному, и обычных для него насыщениях, а для двигателей — обычных кратностях пускового тока и продолжительностях пуска, вполне устойчивая работа генератора соответствует пуску двигателя мощностью примерно 10% от номинальной мощности генератора (по паспорту двигательного режима генератора).

Применением дополнительной емкости, включаемой одновременно с пускаемым двигателем, применением двигателей с переключением их схемы со λ на Δ , или применением двигателей с модифицированными короткозамкнутыми роторами (двойная беличья клетка, глубокий паз) возможно увеличить мощность пускаемых короткозамкнутых индукционных двигателей на 20—30% от номинальной мощности генератора (по паспорту двигательного режима генератора).

Возможно также увеличение мощности пускаемых индукционных короткозамкнутых двигателей за счет включения дополнительных емкостей последовательно с пускаемым двигателем или непосредственно, или через повысительные серии-трансформаторы с ненасыщенной магнитной системой (в целях экономии емкостей), а также за счет включения на зажимы генератора насыщенного дросселя достаточной мощности, являющегося буфером реактивной мощности при колебаниях напряжения на зажимах машины (см. §§ 23 и 25).

Нужно сказать, что эти мероприятия приводят к значительному удорожанию установки и их применение должно определяться на основании экономических соображений.

§ 18. Методы регулирования напряжения асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением при работе их с постоянной частотой

При рассмотрении внешних характеристик асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением видим, что напряжение генератора меняется с изменением нагрузки, и следовательно, для поддержания напряжения e_{ϕ} постоянным при любой промежуточной нагрузке от холостого хода до номинальной необходимо регулирование напряжения.

Регулирование напряжения асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением возможно осуществить следующими методами: 1) изменением величины емкости параллельно подключенных конденсаторов возбуждения; 2) изменением напряжения на зажимах конденсаторов при постоянной величине их емкости; 3) выводом отпаек от обмотки статора асинхронного генератора; 4) насыщением магнитной системы асинхронного генератора; 5) включением на зажимы генератора насыщенного дросселя; 6) включением трансформатора с переменным коэффициентом трансформации в отпаек от обмотки статора генератора; 7) включением дополнительной емкости последовательно с нагрузкой, питающейся от асинхронного генератора.

§ 19. Регулирование напряжения асинхронного генератора изменением величины емкости параллельно включенных на его зажимы конденсаторов возбуждения

В этом случае емкость возбуждения состоит из батареи конденсаторов, схема включения которых позволяет изменять величину емкости за счет изменения их количества. Примером такой схемы может служить изображенная на рис. 26, где регулирование осуществляется при помощи контролера.

В основу подбора конденсаторов при этом методе регулирования нужно положить регулировочные характеристики, которые легко построить, применив круговую диаграмму токов,

или круговую диаграмму проводимостей, построенных для рассматриваемых случаев нагрузки машины.

На рис. 27 изображена круговая диаграмма токов, построенная для номинального напряжения. При помощи ее можно легко определить емкостные токи конденсаторов возбуждения, необходимые для поддержания номинального напряжения генератора при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной включительно.

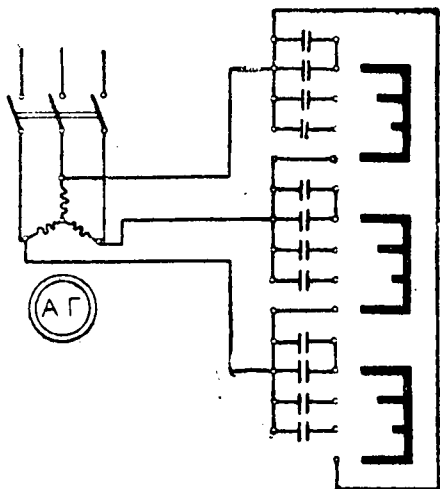


Рис. 26.

Показанные на рисунке 27 отрезки имеют следующие значения;

oa_0 — емкостной ток конденсаторов при холостом ходе генератора;

$a_1a'_1$ — емкостной ток конденсаторов при номинальной, чисто активной нагрузке;

$a_2a'_2$ — емкостной ток конденсаторов при номинальной смешанной нагрузке с углом сдвига фаз φ ;

$a_3a'_3$ — емкостной ток конденсаторов при номинальной смешанной нагрузке с углом сдвига фаз φ ;

$a_1a''_1, a_2a''_2, a_3a''_3$ — емкостной ток конденсаторов

для частичных значений чисто активной нагрузки генератора;

$a_1a''_1, a_2a''_2, a_3a''_3$ — емкостной ток конденсаторов для частичных значений смешанной (активной и индуктивной) нагрузки с углом сдвига фаз φ .

Зная емкостные токи возбуждения, соответствующие частичным нагрузкам генератора при номинальном напряжении, определяют соответствующие им значения конденсаторов возбуждения в μF по формуле:

$$C = \frac{I_c \cdot 10^6}{2\pi f U} \quad (IV, 3)$$

По полученным значениям емкостей легко построить регулировочные характеристики, пользуясь которыми можно подобрать схему включения конденсаторов, в зависимости от желательного числа ступеней регулирования. Такие регулировочные характеристики приведены на рис. 28.

Регулировочные характеристики можно также построить пользуясь и диаграммой проводимостей (см. рис. 29).

По этой диаграмме определяются значения емкостных проводимостей конденсаторов возбуждения, необходимых для поддержания напряжения номинальным при холостом ходе (отрезок a_0o), частичных нагрузках (отрезки a_1a_1, a_2a_2, a_3a_3) и

номинальной (отрезок $a_1 a_4$). По этим проводимостям определяют соответствующие им значения емкостей конденсаторов возбуждения в μF по формуле:

$$C = \frac{b_c \cdot 10^6}{\omega} = \frac{b_c \cdot 10^6}{2\pi f} \quad (IV,7)$$

Дальнейшее построение регулировочной характеристики и подбор схемы регулирования ничем не отличается от предыдущего.

§ 20. Регулирование напряжения асинхронного генератора изменением напряжения на зажимах конденсаторов возбуждения при постоянной величине их емкости

При этом методе, регулирование осуществляется изменением напряжения на зажимах конденсаторов возбуждения неизменной емкости.

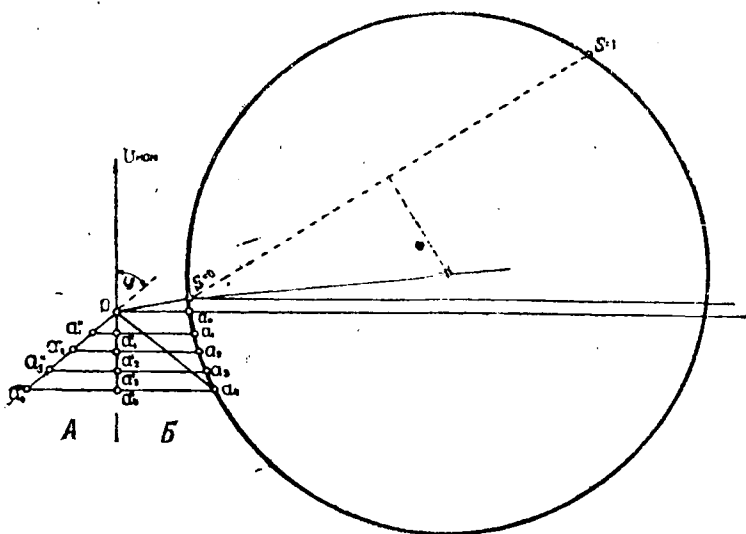


Рис. 27. А — нагрузка смешанная активная и индуктивная, Б — нагрузка активная.

Изменение напряжения на зажимах конденсаторов возбуждения можно осуществить следующими способами:

- 1) включением в цепь возбуждения последовательно с конденсаторами регулировочного реостата;
- 2) подключением конденсаторов возбуждения к генератору через трансформатор, или автотрансформатор, с переменным коэффициентом трансформации.

При первом способе, передвигая рукоятку регулировочного реостата, изменяют соотношение активного и емкостного сопро-

тивлений, за счет чего изменяется реактивная составляющая тока цепи возбуждения, которая и является намагничивающим током генератора.

При втором способе конденсаторы возбуждения включаются

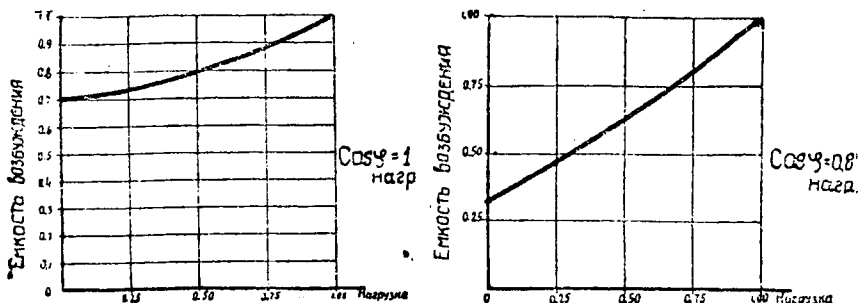


Рис. 28.

на зажимы генератора через трансформатор, или автотрансформатор.

Как известно, при таком способе включения конденсаторов возбуждения значение их емкости, необходимой для возбуж-

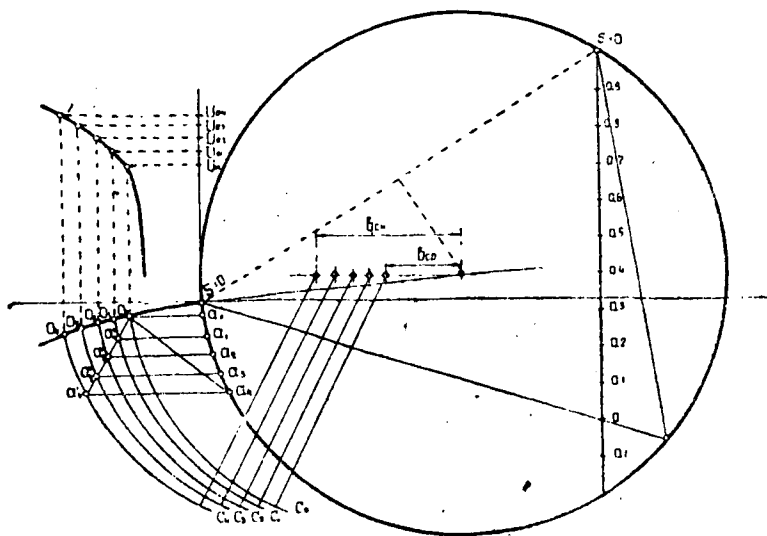


Рис. 29.

дения генератора до какого-либо определенного напряжения, будет отличной от значения ее при непосредственном включении конденсаторов на это генераторное напряжение.

Соотношение емкостей при непосредственном включении конденсаторов и через трансформатор зависит от коэффициента трансформации и пропорционально его квадрату.

Если мы имеем повышающий трансформатор, то величина необходимой емкости уменьшается; наоборот, при включении конденсаторов через понижающий трансформатор ее величина возрастает.

Обозначим через:

U_1 — напряжение асинхронного генератора, на которое включена первичная обмотка трансформатора;

U_2 — вторичное напряжение трансформатора, на которое подключены конденсаторы возбуждения;

C_1 — емкость конденсаторов возбуждения, которая, будучи включенной на зажимы генератора, возбуждает его до напряжения U_1 ;

C_2 — емкость конденсаторов возбуждения, подключенных к генератору через трансформатор со вторичным напряжением U_2 , при которой генератор возбуждается до напряжения U_1 .

Означенные величины могут быть связаны между собой следующей зависимостью:

$$\frac{C_1}{C_2} = \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2, \quad (\text{IV}, 3)$$

откуда

$$C_2 = C_1 \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2.$$

Если трансформатор повышающий, то

$$U_2 > U_1; \quad \frac{U_1}{U_2} < 1; \quad C_2 < C_1.$$

Если трансформатор понижающий, то

$$U_1 > U_2; \quad \frac{U_1}{U_2} > 1; \quad C_2 > C_1.$$

Задачу подбора оборудования цепи возбуждения для поддержания напряжения асинхронного генератора постоянным при изменении его нагрузки, от холостого хода до номинальной, за счет включения конденсаторов постоянной емкости через трансформатор с переменным коэффициентом трансформации, можно решить в следующей последовательности.

1. По круговой диаграмме токов или проводимостей определяют, известным нам уже способом, значения емкостей конденсаторов возбуждения, необходимых для поддержания напряжения генератора номинальным при изменении его нагрузки от холостого хода до номинальной, при непосредственном включении конденсаторов на генераторное напряжение.

2. По полученным таким образом данным строят регулировочную характеристику, которую и кладут в основу дальнейших расчетов.

3. Емкости этой регулировочной характеристики пересчитывают, по формуле (IV,8) на вторичное напряжение трансформатора, через который включают конденсаторы возбуждения.

Вторичное напряжение трансформатора и изменение его коэффициента трансформации подбирают, учитывая существующие стандарты на конденсаторы (по напряжению и емкости), так, чтобы обеспечить достаточно плавное регулирование напряжения генератора в нужных пределах.

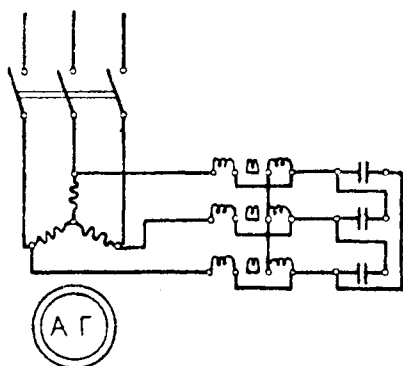


Рис. 30.

Применением повышающих трансформаторов, при этом методе регулирования, можно достигнуть значительной экономии в емкостях конденсаторов возбуждения.

Используя специальные типы трансформаторов (трансформаторы с короткозамкнутой подвижной обмоткой или с подвижным магнитопроводом),

можно получить идеально плавную регулировку.

Пример схемы регулирования напряжения с применением автотрансформатора с короткозамкнутой подвижной обмоткой дан на рис. 30.

При применении специальных типов трансформаторов с усложненной за счет применения вольтметрового реле и сервомотора схемой, можно получить автоматическую стабилизацию напряжения генератора при изменении его нагрузки.

§ 21. Регулирование напряжения сети путем вывода отпаек от обмотки статора асинхронного генератора

В этом случае имеет место ступенчатое регулирование напряжения в соответствии со схемой, представленной на рис. 31.

Во избежание разрыва цепи и короткого замыкания части витков обмотки статора при регулировании напряжения, рекомендуется применять сложный переключатель с защитным сопротивлением.

§ 22. Регулирование напряжения насыщением магнитной системы асинхронного генератора

Как известно из предыдущего, устойчивая работа асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением возможна только лишь при пересыщенной, по отношению к двигатель-

ному режиму, магнитной системе, т. е. когда в системе имеется достаточный запас реактивной мощности, способный покрыть все потребности в ней как самого генератора, так и нагрузки.

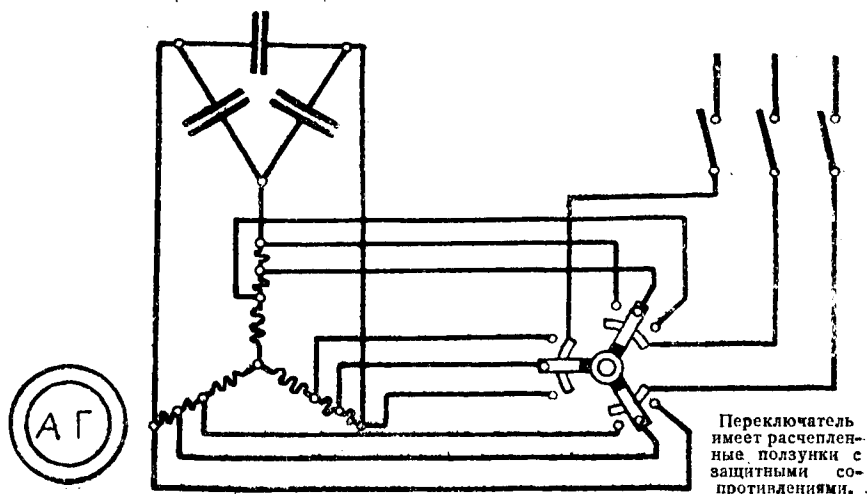


Рис. 31.

Повышение насыщения магнитной системы приводит к получению более плавных внешних характеристик и этим путем

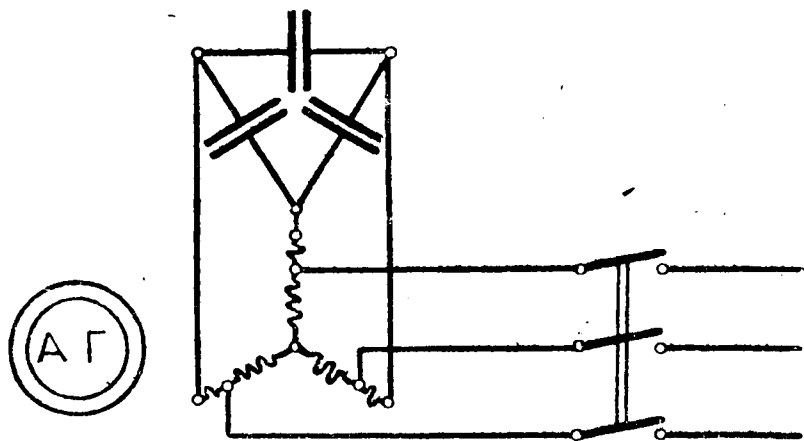


Рис. 32.

можно достичь в известной степени автоматической стабилизации напряжения на зажимах генератора.

Перенасыщение генератора связано с необходимостью повышения его напряжения по сравнению с номинальным, причем

в случае чисто активной нагрузки перенасыщение генератора нужно меньшее, чем при смешанной нагрузке (активной и индуктивной). Следовательно, для того чтобы иметь стандартное напряжение на зажимах потребителей, необходимо прибегнуть к выводу ответвлений от соответствующих витков статорной обмотки (см. рис. 32), к которым и присоединяется сеть.

Степень насыщения генератора и процент выведенных витков зависят от допустимых пределов колебания напряжения генератора при данной его нагрузке. При этом, как показывает опыт, при питании потребителей от отпаек генератора внешнюю характеристику генератора можно принимать эквидистантной его характеристике при работе на всех витках обмотки.

Работа насыщенной машины, соответствующая пологой части кривой намагничивания, дает незначительные колебания напряжения на ее зажимах, но с таким режимом связано увеличение потерь и, следовательно, нагрева машины.

Во избежание перегрева машины выше допустимого, в этом случае приходится идти на снижение ее мощности, величину которой, с достаточной для технических расчетов точностью, можно определить из условия равенства потерь при двигательном и генераторном режимах работы рассматриваемой асинхронной машины.

Нужно заметить, что перенасыщенный асинхронный генератор, как и всякую перенасыщенную систему, не рекомендуется включать треугольником.

§ 23. Регулирование напряжения асинхронного генератора за счет включения на его зажимы насыщенного дросселя

Устойчивую работу асинхронного генератора и незначительное колебание его напряжения, при изменениях нагрузки в широких пределах, можно получить и без перенасыщения магнитной системы, путем включения на его зажимы специального насыщенного дросселя достаточно большой мощности.

В этом случае подключенный дроссель забирает определенную емкость конденсаторов, идущую на компенсацию его реактивной мощности.

При увеличении нагрузки с падением напряжения часть реактивной мощности конденсаторов освобождается дросселем и идет на покрытие нужд самого генератора, чем и достигается устойчивость его работы и уменьшение колебания напряжения.

В самом деле, с увеличением нагрузки генератора связано уменьшение напряжения на зажимах дросселя. Благодаря этому насыщение дросселя уменьшается, магнитная проницаемость и индуктивность его увеличиваются, а потребляемый реактивный ток уменьшается. При уменьшении же нагрузки генера-

тора и увеличении напряжения на зажимах дросселя эти явления происходят в обратном порядке.

Изучить работу асинхронного генератора при включении на его зажимы насыщенного дросселя можно при помощи уже известной нам круговой диаграммы проводимостей генератора, дополнив ее предварительно двумя кривыми:

1) кривой изменения суммарной реактивной проводимости намагничивающего контура генератора и дросселя, в зависимости от напряжения, т. е. $b_0 + b_d = f(U)$, и

2) кривой изменения суммарной активной проводимости намагничивающего контура генератора и дросселя, в зависимости от их суммарной реактивной проводимости, т. е.

$$g_0 + g_d = f(b_0 + b_d).$$

Здесь g_0 — активная проводимость фазы генератора при холостом ходе;

g_d — активная проводимость дросселя;

b_0 — реактивная проводимость фазы генератора при холостом ходе;

b_d — реактивная проводимость дросселя.

Для получения этих кривых, кроме обычных, нужных для построения круговой диаграммы опытов холостого хода и короткого замыкания, необходимо провести еще опыт холостого хода асинхронного двигателя с включенным на его зажимы дросселем, при изменении подводимого напряжения в широких пределах.

Можно испытать дроссель и отдельно, изменяя напряжение на его зажимах в широких пределах и по данным этого испытания построить кривые:

$$b_d = f(U);$$

$$g_d = f(b_d).$$

Тогда искомые суммарные кривые можно получить в результате геометрического сложения кривых реактивной и активной проводимостей асинхронной машины при холостом ходе с полученными кривыми реактивной и активной проводимостей дросселя.

На рис. 33 изображены: принципиальная схема, эквивалентная схема замещения и круговая диаграмма проводимостей для данного случая нагрузок.

На этих схемах приняты следующие обозначения:

I_1 — ток генератора;

I_c — ток цепи конденсаторов возбуждения;

I_d — " " насыщенного дросселя;

I_n — " " потребителя;

X_c — емкостное сопротивление фазы цепи конденсаторов возбуждения;

X_d — реактанс фазы цепи насыщенного дросселя;

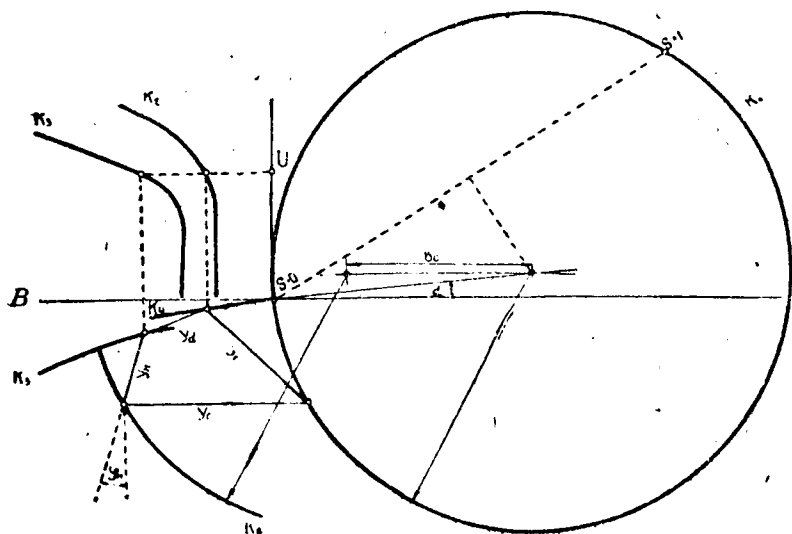
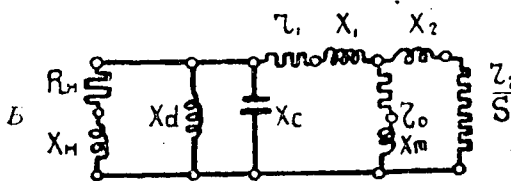
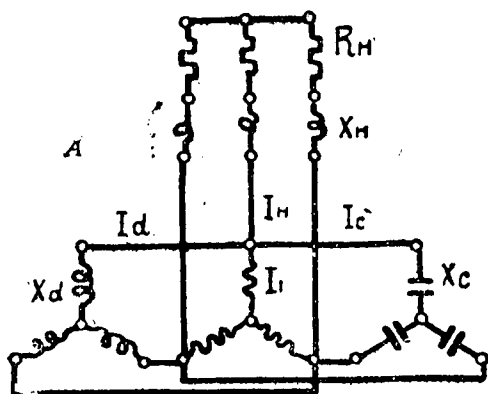


Рис. 33 А — принципиальная схема, Б — эквивалентная схема, В — круговая диаграмма проводимостей.

- X_n — реактанс фазы нагрузки;
 R_n — активное сопротивление фазы нагрузки;
 Y_2 — полная проводимость фазы генератора;
 Y_c — " " " конденсаторов возбуждения;
 Y_d — " " " цепи дросселя;
 Y_n — " " " потребителей;
 K_1 — круг фазы проводимости генератора;
 K_2 — кривая реактивной проводимости намагничивающего контура асинхронного генератора в функции напряжения;
 K_3 — кривая суммарной реактивной проводимости намагничивающего контура генератора и дросселя в функции напряжения;
 K_4 — кривая активной проводимости намагничивающего контура генератора;
 K_5 — кривая суммарной активной проводимости намагничивающего контура генератора и дросселя.

Пользуясь круговой диаграммой проводимостей, можно определить напряжение генератора при различных его нагрузках (на рис. 33 изображено определение напряжения при одной нагрузке) и построить внешнюю характеристику генератора.

Из рассмотрения такой характеристики и сопоставления ее с внешней характеристикой без дросселя для той же нагрузки можно было бы видеть, что при наличии насыщенного дросселя достаточно большой мощности характеристика генератора будет более пологой, и колебания напряжения при изменении нагрузки будут незначительными.

Соотношение мощностей дросселя и генератора зависит только от характера нагрузки. Порядок величин этого соотношения можно охарактеризовать данными следующей таблицы:

$\cos \varphi$ нагрузки	1	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,6
$\frac{P_d}{P_n} \%$	40	70	90	105	120	135	150	185

Для изготовления насыщенного дросселя можно использовать низковольтную обмотку и железо 6 кв трансформаторов, при этом, если оставить намагничивающий ток дросселя равным номинальному току трансформатора, магнитная его индукция возрастет примерно в 1,5 раза.

Модификацией этого метода может быть включение конденсаторов возбуждения через повышающий трансформатор, или автотрансформатор с насыщенной магнитной системой.

Таким путем можно достигнуть значительной экономии в емкости конденсаторов возбуждения при тех же результатах регулирования.

§ 24. Регулирование напряжения включением трансформатора с переменным коэффициентом трансформации в отпайки от обмотки статора генератора

Плавное регулирование напряжения генератора можно получить, включая трансформатор с подвижной короткозамкнутой обмоткой в отпайки, выведенные от обмотки статора генератора в соответствии со схемой, изображенной на рис. 34.

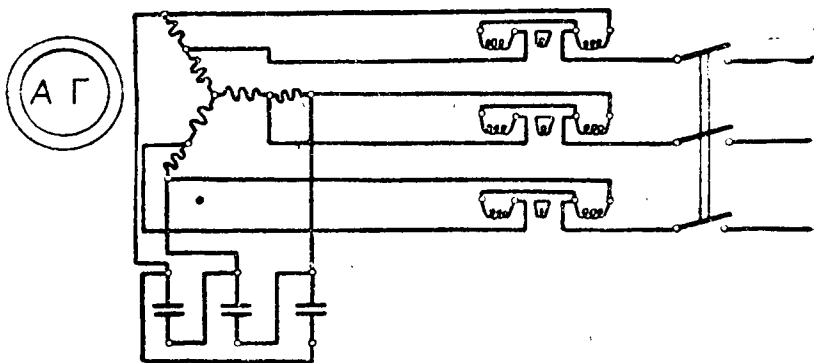


Рис. 34.

Регулирование осуществляется передвижением короткозамкнутой обмотки трансформатора и ее положением относительно неподвижных обмоток этого трансформатора. Пределы регулирования напряжений на выходе генератора, по этому способу, лежат между напряжением, соответствующим напряжению, создаваемому частью статорной обмотки до нижних отпаяк, и полным напряжением всей обмотки.

Передвижение короткозамкнутой обмотки можно производить непосредственно вручную или же дистанционно, при помощи сервомотора.

Усложняя схему и применяя вольтметровое реле для управления сервомотором, можно получить автоматическую стабилизацию напряжения.

§ 25. Регулирование напряжения асинхронного генератора путем включения дополнительной емкости последовательно с нагрузкой

Рассматриваемый способ автоматического регулирования напряжения асинхронных генераторов заключается в том, что питание потребителей осуществляется не непосредственно от

генератора, а через емкость C_1 , последовательно включенную в цепь потребителей в соответствии с принципиальной схемой, изображенной на рис. 35.

Эквивалентная схема установки в этом случае будет иметь вид, представленный на рис. 36.

На этой схеме приняты обозначения:

U_1 — напряжение генератора;

U_n — напряжение на зажимах потребителей;

I_n — ток потребляемый нагрузкой;

R_n — активное сопротивление нагрузки;

X_n — реактивное сопротивление нагрузки;

X_{c1} — реактивное сопротивление емкости, последовательно включенной с нагрузкой;

X_c — реактивное сопротивление емкости, параллельно включенной на зажимы генератора;

x_1 и x_2 — реактанцы рассеяния обмоток статора и ротора, приведенного к статору;

r_1 и r_2 — активные сопротивления обмотки статора и ротора, приведенного к статору;

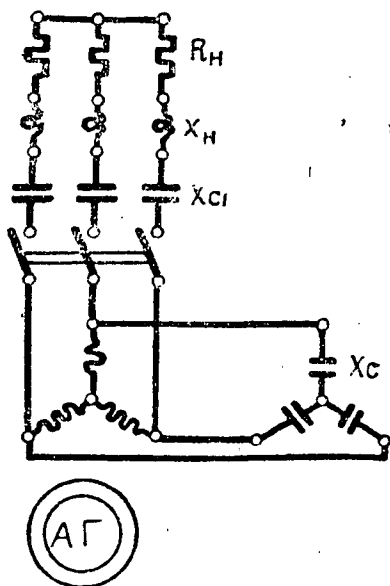


Рис. 35.

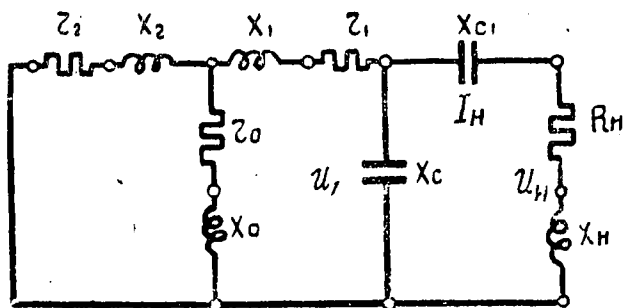


Рис. 36.

X_m — реактанц намагничивающего контура;

r_0 — активное сопротивление намагничивающего контура.

Исследование работы асинхронного генератора с емкостью C_1 ,

Из точки C проводят вертикальную линию вверх до пересечения ее с кривой 4 (кривая реактивной проводимости холостого хода генератора) в точке D .

Через точку D проводят горизонтальную линию вправо до пересечения со шкалой напряжения, на которой и отсчитывают напряжение генератора при рассматриваемой нагрузке.

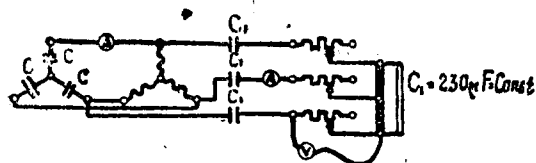
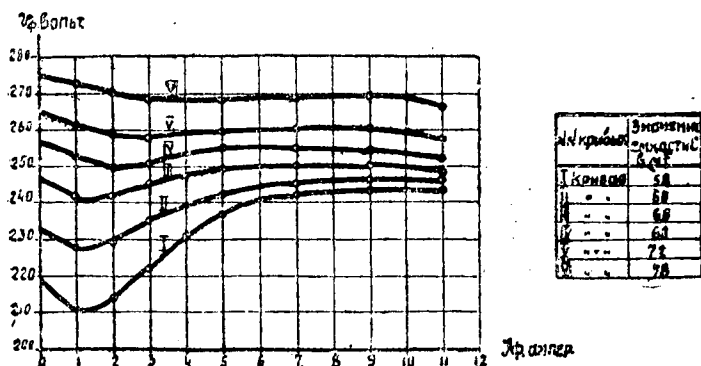


Рис. 38.

Определив напряжение генератора и зная величину X_{c1} , X_N и R_N , определяют ток, потребляемый нагрузкой по формуле

$$I_N = \frac{U_1}{\sqrt{R_N^2 + (X_N - X_{c1})^2}}$$

Активная нагрузка, соответствующая этому току, будет:

$$P = I_N^2 R_N.$$

Определив ток нагрузки, находят напряжение на зажимах потребителей по формуле:

$$U_N = I_N Z_N = I_N \sqrt{R_N^2 + X_N^2}$$

Поступая таким образом для различных нагрузок, получают ряд соответствующих им значений напряжений генератора и на зажимах потребителей, по которым и строят кривые зависимости изменения этих напряжений от нагрузки.

Варьируя величинами последовательно и параллельно включенных емкостей и исследуя работу асинхронного генератора при каждой из них, получают ряд кривых, по которым и подбирается наиболее рациональное сочетание значений шунтовых и серийных конденсаторов.

В качестве иллюстрации на рис. 38 даны кривые изменения напряжения на зажимы потребителей в зависимости от тока их нагрузки, при различных сочетаниях емкости шунтовых и серийных конденсаторов, для конкретного случая.

Анализ этих кривых показывает, что при малых насыщениях (низкие значения емкости шунтовых конденсаторов), рассматриваемые характеристики имеют явно выраженное склонение на участке небольших нагрузок.

Это явление вполне объясняется следующими соображениями. Пока нагрузка небольшая, эффективность влияния серийной емкости незначительна, и характеристика стремится следовать естественной характеристике машины при чисто шунтовом возбуждении.

По мере увеличения нагрузки при неизменном значении емкости последовательно включенных конденсаторов, влияние этой емкости начинает превалировать над влиянием нагрузки, что и вызывает повышение напряжения.

При дальнейшем увеличении нагрузки падение напряжения на сопротивлении емкости C_1 начинает преобладать над эффектом увеличения напряжения за ее счет, и напряжение на зажимах потребителей уменьшается.

Увеличением значения емкостей C_1 последний участок рассматриваемых характеристик может быть сдвинут далеко за пределы нормальной нагрузки машины.

Подбор емкости серийных конденсаторов для компаундирования асинхронных генераторов с шунтовыми конденсаторами, имеющими такую емкость, которой достаточно для обеспечения устойчивой работы генератора при полной нагрузке, может быть осуществлен по следующему методу.

Пользуясь круговой диаграммой проводимостей, строят ряд внешних характеристик еще не компаундированного асинхронного генератора при различных по величине тока и $\cos \varphi$ нагрузках его.

Обычно, для удобства дальнейших расчетов, эти характеристики строят в относительных единицах, принимая напряжение холостого хода генератора и номинальную силу тока при активной нагрузке за сто процентов.

По этим характеристикам определяют напряжения на зажимах генератора, соответствующие нагрузкам с одинаковыми силами токов, но с различными коэффициентами мощности.

Далее, на основании полученных данных, строят ряд кривых, представляющих собой геометрические места концов вектора напряжения на зажимах еще не компаундированного гене-

полной нагрузке равному напряжению холостого хода некоммутационированного генератора.

На рисунке, в масштабе напряжений, обозначены:

Oa_0 — вектор напряжения на зажимах потребителей с $\cos \varphi = 0,9$ при полной нагрузке;

a_0a_4 — вектор напряжения на зажимах серийных конденсаторов при полной нагрузке (отложен нормально к вектору тока);

Oa_4 — вектор напряжения на зажимах генератора при полной нагрузке.

Величину емкости серийных конденсаторов определяют по формуле:

$$C_1 = \frac{I_n}{\omega U_{c_1}}$$

По этим же кривым можно определить напряжения на зажимах потребителей при токах частичных нагрузок и соответствующие им значения напряжений генератора.

На рис. 39 показаны построения, связанные с решением этой задачи.

Здесь, в масштабе напряжений, обозначены:

OK_1 — вектор падения напряжения на серийных конденсаторах при нагрузке 25%;

OK_2 — то же при нагрузке 50%;

OK_3 — " " 75%;

OK_4 — " " 100%;

a_1K_1 — вектор напряжения на зажимах потребителей при нагрузке 25%;

a_2K_2 — то же при нагрузке 50%;

a_3K_3 — " " 75%;

a_4K_4 — " " 100%;

($a_1K_1 \parallel a_2K_2 \parallel a_3K_3 \parallel a_4K_4$)

Oa_1 — вектор напряжения на зажимах генератора при нагрузке 25%;

Oa_2 — то же при нагрузке 50%;

Oa_3 — " " 75%;

Oa_4 — " " 100%;

По этим данным можно построить внешние характеристики асинхронного генератора с автоматическим регулированием напряжения у потребителей за счет включения дополнительной емкости последовательно с нагрузкой.

Нужно отметить, что данный метод регулирования напряжения требует больших значений серийных емкостей при непосредственном включении их в цепь потребителя.

Значительной экономии в емкостях можно достичь, включая их через повысительные трансформаторы тока, так как в этом случае величина емкости C_1 уменьшается пропор-

ционально квадрату коэффициента трансформации. Необходимую емкость можно определить по формуле:

$$C_1' = C_1 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2,$$

где C_1' — значение емкости, включенной во вторичную обмотку трансформатора тока;

C_1 — значение последовательной емкости при непосредственном включении в цепь потребителей;

W_1 — число витков первичной обмотки трансформатора тока;

W_2 — число витков вторичной обмотки трансформатора тока.

При включении емкости через трансформаторы тока, последние необходимо рассчитать так, чтобы при всем диапазоне нагрузок они работали бы без насыщения их магнитной цепи.

Рассмотренная схема включения асинхронного генератора аналогична известной схеме для компаундных машин постоянного тока с коротким шунтом.

Возможно также включение шунтовой и серийной емкостей асинхронного генератора в схему, аналогичную схеме компаундных машин постоянного тока с длинным шунтом. Для этого нужно серийную емкость включить между зажимами генератора и шунтовой емкости.

Сравнение схем с коротким и длинным шунтом показывает, что в последней ухудшается использование шунтовой емкости, так как она оказывается включенной на пониженное напряжение за счет падения напряжения в серийной емкости.

Схемы с коротким и длинным шунтом можно рассматривать как пограничные, между которыми может существовать целый ряд промежуточных, специальных схем.

Эти специальные схемы могут быть созданы разбивкой шунтовой и серийной емкостей на отдельные элементы и включением этих элементов в различных комбинациях.

Из таких комбинаций можно указать на включение элементов емкости Т, П и Ш-образно.

Создавая специальные схемы, можно воздействовать на характеристику генератора, видоизменяя ее, и приспособляя к частным требованиям.

При рассматриваемом методе регулирования напряжения наличие в схеме параллельно и последовательно включенных емкостей видоизменяет поведение машины при коротком замыкании в питаемой от нее сети, по сравнению с таковым для генераторов с одной лишь параллельной емкостью.

Более того, при коротком замыкании в линии, поведение генераторов с коротким шунтом отлично от поведения генераторов с длинным шунтом.

Генераторы с коротким шунтом при трехполюсном коротком замыкании в линии получают дополнительное возбуждение от шунтированных в этом случае серийных конденсаторов.

Величина емкости возбуждения возрастает до значения, равного сумме емкостей шунтовых и серийных конденсаторов

$$C_{K3} = C + C_1.$$

Вследствие этого повышается напряжение на зажимах генератора и обеих емкостей. Величину этого напряжения можно определить графически по точке пересечения кривой намагничивания генератора и вольтамперной характеристики, построенной для емкости C_{K3} .

По этой же точке пересечения обеих характеристик определяется установившийся ток короткого замыкания машины, так как он при этой схеме будет равняться току возбуждения, соответствующему емкости C_{K3} .

Генераторы с длинным шунтом при трехполюсном коротком замыкании в линии получают возбуждение только лишь от серийных конденсаторов, так как шунтовые конденсаторы оказываются шунтированными коротким замыканием.

При этой схеме емкость возбуждения при коротком замыкании будет равна емкости серийных конденсаторов

$$C_{K3} = C_1.$$

Метод определения величины напряжения и установившегося тока короткого замыкания остается тем же, что и при схеме с коротким шунтом. Вполне естественно, что меньшей емкости возбуждения при коротком замыкании генератора, включенного по схеме с длинным шунтом, соответствуют и меньшие напряжения и установившийся ток короткого замыкания по сравнению со схемой с коротким шунтом.

Таким образом в расчете и выборе элементов схем компандированных асинхронных генераторов должно быть учтено их поведение при коротких замыканиях.

Следует отметить, что самым уязвимым в этом отношении элементом схемы являются шунтовые и серийные конденсаторы, которые должны быть выбраны с учетом повышения напряжения при коротком замыкании или же с применением соответствующей защиты их, так как, будучи выбранными без учета этого явления, они легко пробиваются и выходят из строя, в то время как сами генераторы переносят короткое замыкание безболезненно.

После ликвидации короткого замыкания нормальная работа генератора восстанавливается.

ГЛАВА V

РАБОТА АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С КОНДЕНСАТОРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ НА СИММЕТРИЧНУЮ НАГРУЗКУ ПРИ ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА И НЕИЗМЕННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

§ 26. Общие условия данного режима работы

При работе асинхронного генератора в рассматриваемом режиме, число оборотов его поддерживается постоянным за счет регулирования приводного двигателя.

Возбуждение генератора, т. е. значение емкости конденсаторов возбуждения, остается все время неизменным.

Частота и напряжение генератора меняются в зависимости от изменения его нагрузки.

Для изучения работы асинхронного генератора в данном режиме возможно применение аналитических и графоаналитических методов.

§ 27. Методы расчета работы асинхронного генератора в изучаемом режиме

Рассмотрим метод, в основу которого положены соотношения, полученные раньше для определения активного и реактивного сопротивления машины как электромагнитного механизма в целом.

Путем учета изменения реактанцев системы от частоты и насыщения машины, введением соответствующих коэффициентов и применением законов Кирхгофа закономерности рассматриваемой энергетической системы сводятся к системе двух уравнений с двумя неизвестными, решая которые определяют поведение генератора при данном режиме работы.

В главе II мы имели выражение:

$$\frac{(r_1 + jX_1)(r_2 + jX_2S) + X_m^2 S}{r_2 + jX_2S} I_1 = U_1, \quad (II, 20)$$

из которого путем деления обеих частей на I_1 , получили значение полного сопротивления асинхронного генератора, как некоторого электромагнитного механизма в целом:

$$Z = r_1 + \frac{X_m^2 S r_2}{r_2^2 + X_2^2 S^2} + j \left[X_1 - \frac{X_m^2 S^2 X_2}{r_2^2 + X_2^2 S^2} \right]. \quad (II, 21)$$

Обозначив через r активное сопротивление, а через X реактивное сопротивление генератора, будем иметь:

$$r = r_1 + \frac{X_m^2 S r_2}{r_2^2 + X_2^2 S^2}, \quad (\text{V}, 1)$$

$$X = X_1 - \frac{X_m^2 S^2 X_2}{r_2^2 + X_2^2 S^2}. \quad (\text{V}, 2)$$

Или, после преобразований:

$$r = r_1 + \frac{r_2}{S} \cdot \frac{X_m^2}{X_2^2 + \left(\frac{r_2}{S}\right)^2}, \quad (\text{V}, 3)$$

$$X = X_1 - X_2 \cdot \frac{X_m^2}{X_2^2 + \left(\frac{r_2}{S}\right)^2}. \quad (\text{V}, 4)$$

Так как реактивные сопротивления машины зависят от частоты электрических колебаний и насыщения стали, то при рассмотрении работы машины под нагрузкой эта зависимость должна быть учтена.

Приняв, как и раньше, за исходную частоту $f_c = 50$ Hz и относя к ней параметры системы, пересчет на действительную частоту будем производить при помощи коэффициента относительной частоты, на который умножаются индуктивные и делятся емкостные сопротивления системы.

Раньше мы имели следующие соотношения:

$$F = \frac{f}{f_c} = \frac{\omega}{\omega_c}, \quad (\text{II}, 33)$$

$$\alpha = \frac{f_0}{f_c} = \frac{\omega_0}{\omega_c} = \frac{n_n}{n_c}, \quad (\text{II}, 34)$$

$$S = \frac{f - f_0}{f} = \frac{\omega - \omega_0}{\omega} = \frac{F - \alpha}{F}, \quad (\text{II}, 35)$$

которые будем использовать в дальнейших исследованиях.

Кроме того, необходимо учесть изменяемость реактанцев машины в зависимости от степени насыщения магнитопровода машины.

Реактанцы X_1 , X_2 и X_m , входящие в выражения (V, 3) и (V, 4), нельзя рассматривать как постоянные, так как при работе машины в данном режиме насыщение стали магнитопровода машины не остается постоянным, а меняется в зависимости от изменений нагрузки машины.

Условимся в дальнейшем под X'_{10} , X'_{20} и X'_{m0} подразумевать реактанцы ненасыщенной машины при частоте 50 Hz.

Тогда введением коэффициента насыщения K_1 , реактансы машины при частоте 50 Hz можно выразить, учтя их зависимость от насыщения, следующим образом:

$$X_{10} = \frac{X'_{10}}{K_1}, \quad (V, 5)$$

$$X_{20} = \frac{X'_{20}}{K_1}, \quad (V, 6)$$

$$X_{m0} = \frac{X'_{m0}}{K_1}. \quad (V, 7)$$

Здесь коэффициент насыщения определяется выражением:

$$K_1 = \frac{\delta_1}{\delta_0}, \quad (V, 8)$$

где K_1 — переменный коэффициент, учитывающий изменение сопротивления магнитной цепи машины вследствие насыщения стали магнитопровода;

δ_1 — идеальный воздушный зазор, эквивалентный действительному магнитному сопротивлению магнитопровода машины при данном ее состоянии;

δ_0 — идеальный воздушный зазор, эквивалентный магнитному сопротивлению действительного магнитопровода машины в ненасыщенном состоянии.

Проще всего коэффициент насыщения K_1 определить из магнитной характеристики машины, которая для изучаемой машины должна быть известной.

В самом деле, эквивалентный воздушный зазор, в котором предположено сосредоточенным все сопротивление магнитной цепи машины, может быть выражен следующим образом:

$$\delta_1 = \delta K_0 K_1 = \delta_0 K_1, \quad (V, 9)$$

где δ — воздушный зазор машины;

$\delta_0 = \delta K_0$ — расчетный воздушный зазор, учитывающий, при помощи коэффициента Картера K_0 , увеличение воздушного зазора вследствие зубчатых поверхностей статора и ротора машины;

K_1 — переменный коэффициент, учитывающий изменение сопротивления магнитной цепи вследствие насыщения магнитопровода машины.

При расчете магнитной цепи машины коэффициент насыщения K_1 может быть определен так:

$$K_1 = \frac{AW\delta_1}{AW\delta_0} = \frac{AW\delta_0 + AW_{жел.}}{AW\delta_0} = 1 + \frac{AW_{жел.}}{AW\delta_0}. \quad (V, 10)$$

Реактанс машины X_1 может быть выражен так:

$$X_1 = \frac{X'_1}{K_1}, \quad (V, 11)$$

где X' — реактанс ненасыщенной машины, определяемый по расчетным данным машины, при $K_i = 1$, т. е. при $\gamma = 80$.

Метод определения коэффициента насыщения K_2 при помощи кривой намагничивания машины очевиден из рис. 40.

Кривая намагничивания может быть построена в относительных единицах и использована для целого ряда машин.

Рис 40

Учтя при помощи коэффициентов a , F и K' зависимость параметров машины от частоты и насыщения стали, получим для активного и реактивного сопротивлений машины, как ^электромагнитного механизма в целом, следующие выражения:

$$z = z_1 - \Gamma \text{ у.} \quad X' \sqrt{3} \quad \frac{K_2}{2} \left(\frac{J_{\text{эл}}'}{J_{\text{эл}}} \right)^3 \gg \quad (\text{V}, 12)$$

$$X = F \frac{X_M'}{K'} \frac{X'_{\text{я}}}{K_2} \frac{1}{\Delta \Pi} \quad X' V \quad (\text{V}, 13)$$

Переходим к составлению основны* уравнений.

Применяя первый закон Кирхгофа к нашей автономной системе, получим:

$$\Sigma I = 0. \quad (IV, 7)$$

Или, после деления на напряжение:

$$\Sigma Y = 0. \quad (IV, 8)$$

Рассматривая работу асинхронного генератора на активную нагрузку потребителей сети с сопротивлением R_n на фазу, получим следующие проводимости.

Проводимость генератора:

$$Y_g = \frac{1}{r + jX}, \quad (V, 14)$$

где r и X — активные и реактивные сопротивления генератора, определяемые выражениями (V, 12) и (V, 13).

Проводимость конденсаторов цепи возбуждения:

$$Y_c = jb_{c_0}F. \quad (V, 15)$$

Проводимость цепи нагрузки:

$$Y_n = \frac{1}{R_n} = g_n. \quad (V, 16)$$

Подставляя эти значения отдельных проводимостей в формулу (IV, 8), получим:

$$\frac{1}{r + jX} + g_n + jb_{c_0}F = 0. \quad (V, 17)$$

Или, после преобразования:

$$(1 + g_n r - b_{c_0} X F) + j(b_{c_0} r F + g_n X) = 0, \quad (V, 18)$$

откуда

$$1 + g_n r - b_{c_0} X F = 0, \quad (V, 19)$$

$$b_{c_0} r F + g_n X = 0. \quad (V, 20)$$

Подставив в уравнения (V, 19) и (V, 20) значения r и X из выражений (V, 12) и (V, 13), получим:

$$1 + g_n \left[r_1 + \frac{r_2 F}{F - a} \cdot \frac{\left(\frac{X'_{m_0}}{K_1}\right)^2}{\left(\frac{r_2}{F - a}\right)^2 + \left(\frac{X'_{2_0}}{K_1}\right)^2} \right] - b_{c_0} F^2 \left[\frac{X'_{1_0}}{K_1} - \frac{X'_{2_0}}{K_1} \cdot \frac{\left(\frac{X'_{m_0}}{K_1}\right)^2}{\left(\frac{r_2}{F - a}\right)^2 + \left(\frac{X'_{2_0}}{K_1}\right)^2} \right] = 0; \quad (V, 21)$$

$$b_{c_0} F \left[r_1 + \frac{r_2}{F-2} \cdot \frac{\left(\frac{X'_{m_0}}{K_1}\right)^2}{\left(\frac{r_2}{F-2}\right)^2 + \left(\frac{X'_{2_0}}{K_1}\right)^2} \right] + g_n \left[\frac{X'_{1_0}}{K_1} - \frac{X'_{2_0}}{K_1} \cdot \frac{\left(\frac{X'_{m_0}}{K_1}\right)^2}{\left(\frac{r_2}{F-2}\right)^2 + \left(\frac{X'_{2_0}}{K_1}\right)^2} \right] = 0. \quad (V, 22)$$

Полученные уравнения (V, 21) и (V, 22) представляют собой систему двух уравнений с двумя неизвестными, решив которую, можно определить F и K_1 , по которым уже легко определить и все остальные величины, характеризующие поведение асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением при рассматриваемой нагрузке.

В частном случае, когда $n_0 = n_c$, а коэффициент α приобретает значение единицы, эти уравнения примут вид:

$$1 + g_n \left[r_1 + \frac{r_2 F}{F-1} \cdot \frac{\left(\frac{X'_{m_0}}{K_1}\right)^2}{\left(\frac{r_2}{F-1}\right)^2 + \left(\frac{X'_{2_0}}{K_1}\right)^2} \right] - b_{c_0} F^2 \left[\frac{X'_{1_0}}{K_1} - \frac{X'_{2_0}}{K_1} \cdot \frac{\left(\frac{X'_{m_0}}{K_1}\right)^2}{\left(\frac{r_2}{F-1}\right)^2 + \left(\frac{X'_{2_0}}{K_1}\right)^2} \right] = 0, \quad (V, 23)$$

$$b_{c_0} F \left[r_1 + \frac{r_2}{F-1} \cdot \frac{\left(\frac{X'_{m_0}}{K_1}\right)^2}{\left(\frac{r_2}{F-1}\right)^2 + \left(\frac{X'_{2_0}}{K_1}\right)^2} \right] + g_n \left[\frac{X'_{1_0}}{K_1} - \frac{X'_{2_0}}{K_1} \cdot \frac{\left(\frac{X'_{m_0}}{K_1}\right)^2}{\left(\frac{r_2}{F-1}\right)^2 + \left(\frac{X'_{2_0}}{K_1}\right)^2} \right] = 0. \quad (V, 24)$$

Аналогично составляются уравнения и для смешанной нагрузки.

Для нее также, в конечном счете, получится система двух уравнений с двумя неизвестными, решение которой определяет поведение генератора при этом характере нагрузки.

Расчет работы асинхронного генератора можно произвести и другим методом, взяв за основу эквивалентную схему установки. В целях упрощения расчета, потерями в стали генератора пренебрегаем.

Тогда для случая чисто активной нагрузки эквивалентная схема будет иметь вид, изображенный на рис. 41.

Преобразуем эту схему путем замены ее левой части эквивалентными активным и реактивным сопротивлениями, определяемыми из выражений:

$$R_{\text{экр.}} = r_1 + \frac{R_n X_c^2}{R_n^2 + X_c^2} = r_1 + \frac{R_n \left(\frac{X_{c0}}{F}\right)^2}{R_n^2 + \left(\frac{X_{c0}}{F}\right)^2}, \quad (\text{V}, 25)$$

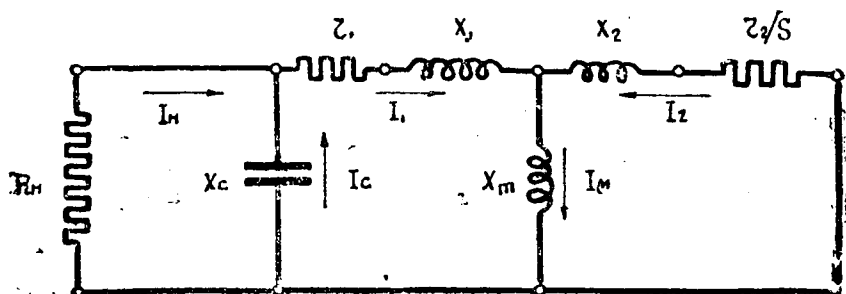


Рис. 41.

$$X_{\text{экр.}} = x_1 - \frac{R_n^2 X_c}{R_n^2 + X_c^2} = X_{10} F - \frac{R_n^2 \frac{X_{c0}}{F}}{R_n^2 + \left(\frac{X_{c0}}{F}\right)^2}. \quad (\text{V}, 26)$$

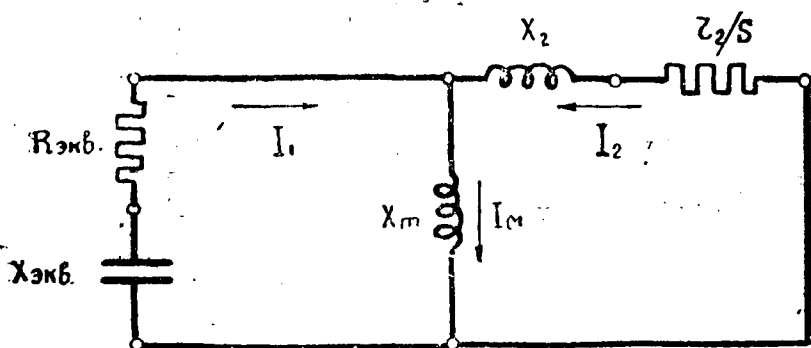


Рис. 42.

В результате этого преобразования эквивалентная схема примет вид, изображенный на рис. 42.

Этой эквивалентной схеме будет соответствовать векторная диаграмма, представленная на рис. 43.

Эквивалентную схему рис. 42 мы и используем в нашем исследовании.

Прежде всего определим X_{m0} .

Для этого воспользуемся известным уже нам из предыдущего, соотношением, согласно которому полные сопротивления внутренней и внешней цепей системы численно равны, но противоположны по знаку.

Применив это положение к эквивалентной схеме, изображенной на рис. 42, мы можем записать:

$$R_{\text{экр.}} + jX_{\text{экр.}} + \frac{jX_m \left(\frac{r_2}{S} + jx_2 \right)}{\frac{r_2}{S} + jx_2 + jX_m} = 0. \quad (\text{V}, 27)$$

Или, после математических преобразований:

$$\frac{r_2}{S} R_{\text{экр.}} - x_{\text{экр.}} x_2 - X_m (X_{\text{экр.}} + x_2) + j \left[\frac{r_2}{S} X_{\text{экр.}} + R_{\text{экр.}} x_2 + X_m (R_{\text{экр.}} + \frac{r_2}{S}) \right] = 0. \quad (\text{V}, 28)$$

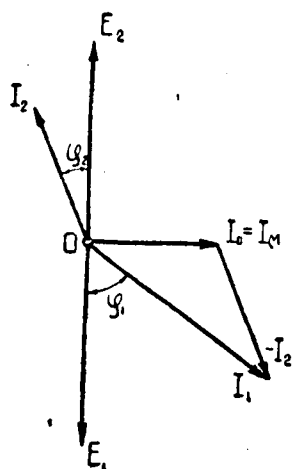


Рис. 43.

Учитывая то, что комплексное число может быть равно нулю только при равенстве нулю его действительной и мнимой частей, придем к зависимостям:

$$\left. \begin{aligned} X_m &= \frac{\frac{r_2}{S} R_{\text{экр.}} - X_{\text{экр.}} x_2}{X_{\text{экр.}} + x_2}, \\ X_m &= \frac{- \left(\frac{r_2}{S} X_{\text{экр.}} + R_{\text{экр.}} x_2 \right)}{R_{\text{экр.}} + \frac{r_2}{S}}. \end{aligned} \right\} (\text{V}, 29)$$

Или, выражая параметры системы через их значения при исходной частоте 50 Hz и коэффициент относительной частоты, получим значение X_{m0} :

$$\left. \begin{aligned} X_{m0} &= \frac{\frac{r_2}{S} R_{\text{экр.}} - X_{\text{экр.}} x_{20} F}{F (X_{\text{экр.}} + x_{20} F)}, \\ X_{m0} &= \frac{- \left(\frac{r_2}{S} X_{\text{экр.}} + R_{\text{экр.}} x_{20} F \right)}{F \left(R_{\text{экр.}} + \frac{r_2}{S} \right)}. \end{aligned} \right\} (\text{V}, 30)$$

Приравняв правые части полученных выражений и сократив на F , получим выражение:

$$\left(\frac{r_2}{S} R_{\text{экр.}} - X_{\text{экр.}} x_{20} F \right) \left(R_{\text{экр.}} + \frac{r_2}{S} \right) =$$

$$= - \left(\frac{r_2}{S} X_{экв.} + R_{экв.} x_{2_0} F \right) (X_{экв.} + x_{2_0} F). \quad (V, 31)$$

После математических преобразований этого выражения получаем следующее квадратное, относительно S , уравнение:

$$S^2 R_{экв.} (x_{2_0} F)^2 + S r_2 (R_{экв.}^2 + X_{экв.}^2) + R_{экв.} r_2^2 = 0. \quad (V, 32)$$

Ранее для скольжения мы имели выражение:

$$S = \frac{F - a}{F}. \quad (II, 35)$$

Если в уравнении (V, 32) подставить значения: S из выражения (II, 35), $R_{экв.}$ из выражения (V, 25) и $X_{экв.}$ из выражения (V, 26) и произвести математические преобразования, то получится одно уравнение с одним неизвестным F в следующем виде:

$$AF^5 + BF^4 + CF^3 + DF^2 + EF + G = 0, \quad (V, 33)$$

где $A = r_1 R_N^2 x_{2_0}^2$,

$$B = r_2 x_{1_0} R_N^2 - 2a x_{2_0}^2 r_1 R_N^2,$$

$$C = a^2 x_{2_0}^2 r_1 R_N^2 + r_1 X_{c_0}^2 x_{2_0}^2 + R_N X_{c_0}^2 x_{2_0}^2 + r_1 r_2 R_N^2 - a r_2 X_{1_0} R_N^2 + r_1 r_2^2 R_N^2,$$

$$D = 2a r_1 X_{c_0}^2 - 2a R_N X_{c_0}^2 x_{2_0}^2 - a r_1 r_2 R_N^2 + r_2 x_{1_0} X_{c_0}^2,$$

$$E = a^2 r_1 X_{c_0}^2 + a^2 R_N X_{c_0}^2 x_{2_0}^2 + r_1 r_2 X_{c_0}^2 + r_2 R_N X_{c_0}^2 - a r_2 x_{1_0} X_{c_0}^2 - r_2 R_N X_{c_0}^2 + r_1 r_2^2 X_{c_0}^2 + r_2^2 R_N X_{c_0}^2,$$

$$G = a r_2 R_N^2 X_{c_0}^2 - a r_1 r_2 X_{c_0}^2 - a r_2 R_N X_{c_0}^2.$$

Так как полученное уравнение (V, 33) очень громоздко, то практически удобнее решать систему уравнений (V, 32) и (II, 35) графическим методом, определяя их корни F и S по пересечению кривых, построенных по этим уравнениям.

В этом случае удобно предварительно решить уравнение (V, 32) относительно S , отбросив не имеющие физического смысла отрицательные корни. Это решение будет иметь вид:

$$S = \frac{-(R_{экв.}^2 + X_{экв.}^2) + \sqrt{(R_{экв.}^2 + X_{экв.}^2)^2 - 4R_{экв.}^2 (x_{2_0} F)^2}}{2R_{экв.} (x_{2_0} F)^2}. \quad (V, 34)$$

Определив F из выражений (V, 33) или (V, 34) и (II, 35) и X_{m_0} из выражений (V, 30), переходим к дальнейшим расчетам.

Зная X_{m_0} по кривым $X_{m_0} = f(I_\mu)$ и $I_\mu X_{m_0} = f(I_\mu)$, которые должны быть известны из опыта холостого хода, произведенного при исходной частоте 50 Hz, можно определить значения I_μ и $I_\mu X_{m_0}$, а по ним и токи I_1 и I_2 из выражений, вытекающих из векторной диаграммы и эквивалентной схемы:

$$I_1 Z_{экв.} = I_\mu X_m = I_\mu X_{m_0} F, \quad (V, 35)$$

$$I_2 Z_2 = I_\mu X_m = I_\mu X_{m_0} F, \quad (V, 36)$$

откуда

$$I_1 = \frac{I_\mu X_{m_0} F}{Z_{\text{экв.}}}, \quad (\text{V}, 37)$$

$$I_2 = \frac{I_\mu X_{m_0} F}{Z_2}. \quad (\text{V}, 38)$$

Ток во вторичной цепи генератора можно выразить и следующей формулой:

$$I_2 = I_1 \sqrt{\frac{R_{\text{экв.}} (\alpha - F)}{r_2 F}}. \quad (\text{V}, 39)$$

Она получается следующим образом: берется выражение, вытекающее из векторной диаграммы

$$I_1 \cos \varphi_1 = -I_2 \cos \varphi_2 \quad (\text{V}, 40)$$

и из него определяется ток I_2 . Полученное для I_2 выражение преобразовывается, путем подстановки в него значений $\cos \varphi_1$ и $\cos \varphi_2$, выраженных через соотношения сторон треугольников сопротивлений первичной и вторичной цепей. Дальнейшей подстановкой значений: Z_2 из выражения (V, 36), $Z_{\text{экв.}}$ из выражения (V, 35) и S из выражения (II, 35), после математических преобразований, и получается формула (V, 39).

Э. д. с. генератора определяется формулой:

$$E_1 = I_\mu X_{m_0} F. \quad (\text{V}, 41)$$

Напряжение на клеммах генератора может быть определено из соотношения:

$$U_1 = I_1 Z_{\text{вн.}} = I_\mu X_{m_0} F \frac{Z_{\text{вн.}}}{Z_{\text{экв.}}}, \quad (\text{V}, 42)$$

где $Z_{\text{вн.}}$ — сопротивление внешней сети, определяемое по формуле:

$$Z_{\text{вн.}} = \frac{\sqrt{(R_\mu X_c^2)^2 + (X_c R_\mu^2)^2}}{R_\mu^2 + X_c^2}. \quad (\text{V}, 43)$$

Коэффициент мощности $\cos \varphi_1$ определяется по формуле:

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_{\text{экв.}}}{Z_{\text{экв.}}}. \quad (\text{V}, 44)$$

Коэффициент полезного действия генератора определяется известной формулой:

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma \Delta P}{P_{\text{пол.}} + \Sigma \Delta P}, \quad (\text{V}, 45)$$

где $P_{\text{пол.}}$ — полезная мощность, отдаваемая генератором;
 $\Sigma \Delta P$ — суммарные потери генератора, определяемые выражением:

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_{\text{ж}} + \Delta P_{\text{жс}} + \Delta P_{\text{си}_1} + \Delta P_{\text{си}_2}.$$

Здесь ΔP_m — механические потери генератора (при $n = \text{const}$ постоянны);

$\Delta P_{ж.} = \Delta P_{ж. ст.} + \Delta P_{ж. рот.}$ — потери в стали генератора, состоящие из:

$\Delta P_{ж. ст.}$ — потерь в стали статора и
 $\Delta P_{ж. рот.}$ — " " ротора.

Потери в стали состоят из потерь на гистерезис ΔP_h и потерь на токи Фуко ΔP_Φ .

Потери в стали статора:

$$\Delta P_{ж. ст.} = \Delta P_{h ст.} F + \Delta P_{\Phi ст.} F^2,$$

где $\Delta P_{h ст.}$ и $\Delta P_{\Phi ст.}$ — потери на гистерезис и токи Фуко в статоре при заданном токе намагничивания и исходной частоте.

Потери в стали ротора:

$$\Delta P_{ж. рот.} = \Delta P_{h р.} (\alpha - F) + \Delta P_{\Phi р.} (\alpha - F)^2,$$

где $\Delta P_{h р.}$ и $\Delta P_{\Phi р.}$ — потери на гистерезис и токи Фуко в роторе для заданного тока намагничивания при исходной частоте.

ΔP_{Cu_1} — потери в меди первичной цепи генератора;

ΔP_{Cu_2} — " " " вторичной " " " ;

$$\Delta P_{Cu_2} = 3I_2^2 r_2 = P_{пол.} S.$$

Коэффициент полезного действия генератора в значительной мере зависит от частоты индуктированного тока.

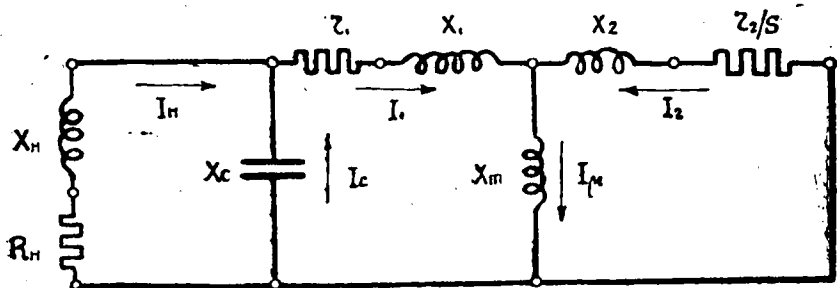


Рис. 44.

При смешанной безмоторной нагрузке генератора потребителями, обладающими активным сопротивлением R_n и индуктивным сопротивлением X_n , исходная эквивалентная схема установки примет вид, изображенный на рис. 44.

Дальнейшее преобразование схемы и методика расчетов остаются теми же, что и при случае чисто активной нагрузки. Изменяются только лишь значения входящих в фор-

мулы и схемы сопротивлений, которые в этом случае нагрузк примут вид:

$$R_{эвк.} = r_1 + \frac{R_N X_c^2}{R_N^2 + (X_N - X_c)^2}, \quad (V, 46)$$

$$X_{эвк.} = x_1 + \frac{X_N X_c^2 - X_c (R_N^2 + X_N^2)}{R_N^2 + (X_N - X_c)^2}, \quad (V, 47)$$

$$Z_{вн.} = \frac{\sqrt{(R_N X_c^2)^2 + [X_N X_c^2 - X_c (R_N^2 + X_N^2)]^2}}{R_N^2 + (X_N - X_c)^2}. \quad (V, 48)$$

Или же, выражая эти сопротивления через параметры си-

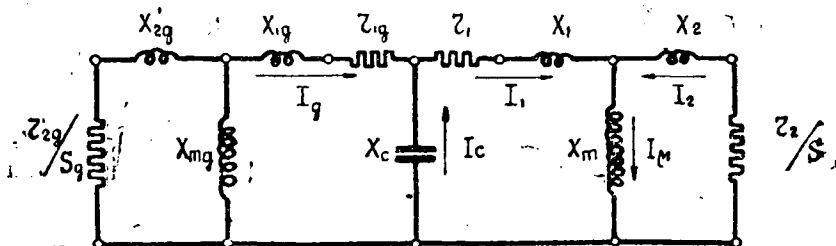


Рис. 45.

стемы при частоте 50 Hz и коэффициент относительной частоты, получим:

$$R_{эвк.} = r_1 + \frac{R_N \left(\frac{X_{c0}}{F}\right)^2}{R_N^2 + \left(X_{N0} F - \frac{X_{c0}}{F}\right)^2}, \quad (V, 46')$$

$$X_{эвк.} = x_{10} F + \frac{X_{N0} F \left(\frac{X_{c0}}{F}\right)^2 - \frac{X_{c0}}{F} [R_N^2 + (X_{N0} F)^2]}{R_N^2 + \left(X_{N0} F - \frac{X_{c0}}{F}\right)^2}, \quad (V, 47')$$

$$Z_{вн.} = \frac{\sqrt{\left|R_N \left(\frac{X_{c0}}{F}\right)^2\right|^2 + \left\{X_{N0} F \cdot \left(\frac{X_{c0}}{F}\right)^2 - \frac{X_{c0}}{F} [R_N^2 + (X_{N0} F)^2]\right\}^2}}{R_N^2 + \left(X_{N0} F - \frac{X_{c0}}{F}\right)^2} \quad (V, 48')$$

Уравнения (V, 32) и (II, 35) рекомендуется решать графическим методом, так как выражение для F в виде одного уравнения с одним неизвестным получается при рассматриваемой нагрузке еще более громоздким, чем уравнение (V, 33) для случая чисто активной нагрузки.

Рассмотренная методика остается в силе и при чисто моторной нагрузке. В этом случае исходная эквивалентная схема установки будет характеризоваться рис. 45.

Здесь значок „ δ “ при отдельных сопротивлениях показывает, что они относятся к цепи двигателя. Эквивалентные же сопротивления и полное сопротивление внешней сети в этом случае примут значения:

$$R_{эвк.} = r_1 + \frac{R_\delta X_c^2}{R_\delta^2 + (X_\delta - X_c)^2}, \quad (V, 49)$$

$$X_{эвк.} = x_1 + \frac{X_\delta X_c^2 - X_c(R_\delta^2 + X_\delta^2)}{R_\delta^2 + (X_\delta - X_c)^2}, \quad (V, 50)$$

$$Z_{вн.} = \frac{\sqrt{(R_\delta X_c^2)^2 + [(X_\delta X_c^2 - X_c(R_\delta^2 + X_\delta^2))]^2}}{R_\delta^2 + (X_\delta - X_c)^2}, \quad (V, 51)$$

где

$$R_\delta = r_{1\delta} + \frac{\left(\frac{r'_{2\delta}}{S_\delta}\right) \cdot X_{m\delta}^2}{\left(\frac{r'_{2\delta}}{S_\delta}\right)^2 + (x'_{2\delta} + X_{m\delta})^2}, \quad (V, 52)$$

$$X_\delta = x_{1\delta} + \frac{\left(\frac{r'_{2\delta}}{S_\delta}\right)^2 X_{m\delta} + X_{m\delta}(x'_{2\delta})^2 + x'_{2\delta} X_{m\delta}^2}{\left(\frac{r'_{2\delta}}{S_\delta}\right)^2 + (x'_{2\delta} + X_{m\delta})^2} \quad (V, 53)$$

Пересчет параметров системы соответствующих частоте 50Hz на параметры, соответствующие действительной частоте, осуществляется, так же как и раньше, путем введения коэффициента относительно частоты F . Дальнейший ход решения задачи аналогичен решению при предыдущих характерных нагрузках.

Для определения соотношений самовозбужденного генератора, работающего на нагрузку при постоянном числе оборотов, можно воспользоваться и графическим методом.

Этот метод основан на, известном уже нам, соотношении: равенстве по величине и противоположности по знаку проводимостей генератора и внешней сети.

Если бы мы на одном и том же чертеже построили кривые этих двух проводимостей, в зависимости их от частоты, и отыскали бы на них такую общую точку, в которой обе частоты совпали бы, то задача определения частоты генератора при данной нагрузке была бы решена.

На рис. 46 представлена круговая диаграмма проводимости асинхронного генератора при постоянной частоте ω_0 и перемен-

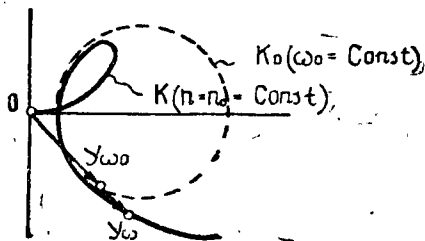


Рис. 46.

ном числе оборотов и показано, как, пользуясь ею, определить проводимость этого генератора для скольжения S_{ω_0} и определенного состояния насыщения магнитопровода машины при работе его с постоянным числом оборотов n_0 и переменной частотой.

Проводимость генератора, работающего при постоянной частоте ω_0 , для скольжения S_{ω_0} определяется по круговой диаграмме проводимостей отрезком Y_{ω_0} .

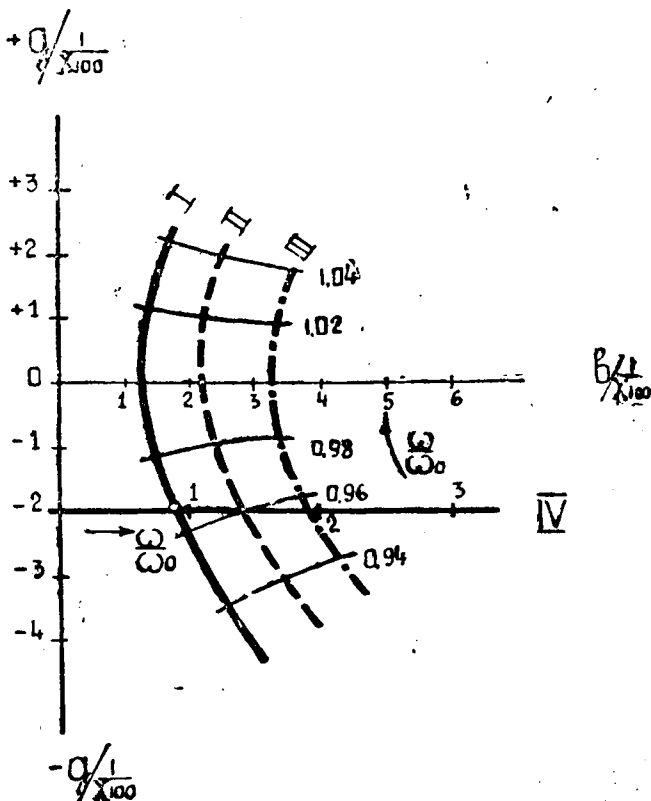


Рис. 47.

Проводимость этого же генератора, работающего с постоянным числом оборотов $n_0 = \frac{60\omega_0}{2\pi p}$, при том же скольжении и магнитном состоянии, характеризуется отрезком Y_{ω_0} .

Эти проводимости связаны между собою зависимостью:

$$Y_{\omega} = \frac{Y_{\omega_0}}{1 + S_{\omega_0}}, \quad (\text{V}, 54)$$

а частоты соотношением:

$$\omega = \omega_0 (1 + S_{\omega_0}). \quad (V, 55)$$

Определив, таким образом, проводимости для различных скольжений, и строят кривую проводимости машины при вращении ее с постоянной скорости вращения n_0 и данном насыщении машины.

Поступая так для различных состояний насыщения машины, мы получим ряд этих кривых.

Обычно при построении таких кривых значения проводимостей машины выражают в долях реактивной проводимости $\left(\frac{1}{X_{100}}\right)$ ненасыщенной машины при частоте ω_0 .

Соединяя между собою принадлежащие отдельным кривым этого ряда точки с одинаковым значением относительной частоты $\frac{\omega}{\omega_0}$, мы наносим на чертеж сетку вспомогательных кривых равных частот при различных насыщениях машины (см. рис. 47—кривые $\frac{\omega}{\omega_0}$).

На этом же рисунке необходимо изобразить диаграмму проводимости (отрицательной) цепи нагрузки при переменной частоте, нанесен относящуюся к ней вспомогательную шкалу относительной частоты.

Отысканием относительной частоты, при которой обе проводимости совпадают, и заканчивается графический метод решения поставленной задачи.

На рис. 47 показано определение относительной частоты указанным методом для случая включения в цепь нагрузки параллельно активного сопротивления R и конденсаторов емкостью C , при следующих их численных значениях:

$$R = 0,5 X_{100} \text{ ом}; \quad \omega_0 C = 2 \frac{1}{X_{100}} \text{ сименс.}$$

Кривые I, II и III рис. 47 означают проводимости асинхронной машины при различных насыщениях (I—ненасыщенная машина) и при переменной частоте; горизонтальная прямая IV—это геометрическое место конца отрезка проводимости внешней цепи (взятой с обратным знаком) при изменении частоты.

Из рис. 47 видно, что при относительной частоте $\frac{\omega}{\omega_0} = 0,965$ и $\frac{1}{X_{10}} = 1,75 \frac{1}{X_{100}}$ обе проводимости совпадают, т. е. при данной нагрузке устанавливается частота $\omega = 0,965 \omega_0$ и напряжение, при котором

$$\frac{1}{X_{10}} = 1,75 \frac{1}{X_{100}}.$$

Чтобы решить, имеет ли вообще место самовозбуждение, достаточно рассмотреть значения частот в точке пересечения кривой проводимости асинхронной ненасыщенной машины (кривая I на рис. 41) с внешней проводимостью цепи (взятой с обратным знаком):

$$Y_{\omega} = f\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) \text{ и } -Y_{\text{вн}} = f\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right).$$

Если существует одна точка пересечения a , то для нее должно выполняться неравенство:

$$\left[\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)_{\text{вн.}}\right]_a < \left[\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)_{\text{ген.}}\right]_a, \quad (\text{V}, 56)$$

чтобы самовозбуждение имело место, так как в этом случае при определенной частоте $\frac{\omega}{\omega_0}$, определяемой соотношением

$$\left[\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)_{\text{вн.}}\right]_a < \frac{\omega}{\omega_0} < \left[\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)_{\text{ген.}}\right]_a, \quad (\text{V}, 57)$$

в области насыщения будет выполняться условие равенства проводимостей генератора и внешней цепи.

При двух точках пересечения этих проводимостей a_I и a_{II} в одной точке должно соблюдаться неравенство:

$$\left[\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)_{\text{вн.}}\right]_{a_I} < \left[\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)_{\text{ген.}}\right]_{a_I}, \quad (\text{V}, 58)$$

а во второй — неравенство:

$$\left[\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)_{\text{вн.}}\right]_{a_{II}} > \left[\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)_{\text{ген.}}\right]_{a_{II}}, \quad (\text{V}, 59)$$

для того чтобы при какой-либо частоте соблюдалось равенство проводимостей, т. е. имело место самовозбуждение.

При отношении частот $\frac{\omega}{\omega_0}$, близком к единице, кривая проводимости машины при переменной частоте лишь немного отклоняется от нормальной окружности проводимости асинхронной машины при $\omega_0 = \text{const}$, так что можно использовать последнюю, определяя отношение частот для каждой точки из величины скольжения по формуле:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = 1 + S.$$

Включение емкости конденсаторов возбуждения возможно и во вторичную цепь генератора. В этом случае эквивалентная схема примет вид, изображенный на рис. 48.

Применив положение о равенстве по величине и противоположности по знаку полных сопротивлений генератора и

сети, действительное и для рассматриваемого случая, получим:

$$-\frac{r_2}{S} + j \left(x_2 - \frac{X_c}{S^2} \right) + \frac{jX_m R_{\text{эkv.}} - X_m X_{\text{эkv.}}}{R_{\text{эkv.}} + j(X_{\text{эkv.}} + X_m)} = 0. \quad (\text{V}, 60)$$

Или, после преобразований:

$$\left[\frac{r_2}{S} R_{\text{эkv.}} - x_2 X_{\text{эkv.}} + \frac{X_c}{S^2} X_{\text{эkv.}} - X_m \left(x_2 - \frac{X_c}{S^2} + X_{\text{эkv.}} \right) \right] + j \left[R_{\text{эkv.}} x_2 - R_{\text{эkv.}} \frac{X_c}{S^2} + \frac{r_2}{S} X_{\text{эkv.}} + X_m \left(\frac{r_2}{S} + R_{\text{эkv.}} \right) \right] = 0. \quad (\text{V}, 61)$$

Приравняв нулю действительную и мнимую части полученного комплексного выражения и решая их относительно X_m , получим:

$$\left. \begin{aligned} X_m &= \frac{\frac{r_2}{S} R_{\text{эkv.}} - x_2 X_{\text{эkv.}} + \frac{X_c}{S^2} X_{\text{эkv.}}}{x_2 - \frac{X_c}{S^2} + X_{\text{эkv.}}}, \\ X_m &= \frac{R_{\text{эkv.}} \cdot \frac{X_c}{S^2} - R_{\text{эkv.}} x_2 - \frac{r_2}{S} X_{\text{эkv.}}}{\frac{r_2}{S} + R_{\text{эkv.}}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{V}, 62)$$

Или, выражая параметры системы через их значения при

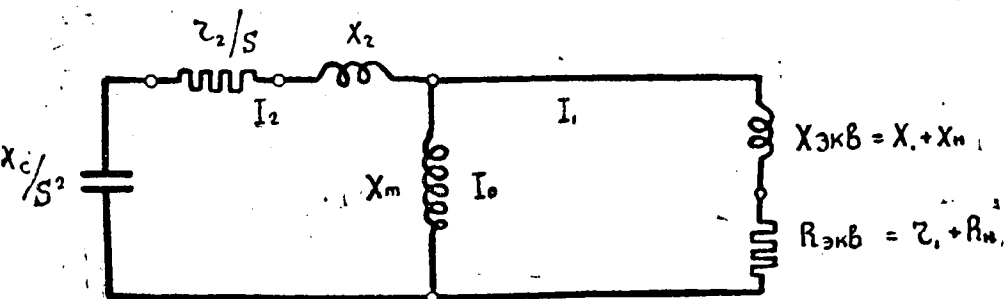


Рис. 48.

исходной частоте 50 Hz и коэффициент относительной частоты, получим:

$$\left. \begin{aligned} X_{m0} &= \frac{\frac{r_2}{S} R_{\text{эkv.}} - x_{20} X_{\text{эkv.0}} F^2 + \frac{X_{c0}}{S^2} X_{\text{эkv.0}}}{F \left(x_{20} F - \frac{X_{c0}}{FS^2} + X_{\text{эkv.0}} F \right)}, \\ X_{m0} &= \frac{R_{\text{эkv.}} \cdot \frac{X_{c0}}{F^2 S^2} - R_{\text{эkv.}} x_{20} - \frac{r_2}{S} X_{\text{эkv.0}}}{\frac{r_2}{S} + R_{\text{эkv.}}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{V}, 63)$$

Приравняв правые части полученных выражений, после математических преобразований, получим:

$$S^4 R_{\text{экв.}} x_{20}^2 F^4 + S^3 (r_2 X_{\text{экв.}0}^2 F^4 + r_2 R_{\text{экв.}}^2 F^3) + \\ + S^2 (r_2^2 R_{\text{экв.}} F^2 - 2R_{\text{экв.}} X_{c_0} x_{20} F^2) + R_{\text{экв.}} X_{c_0}^2 = 0. \quad (\text{V}, 64)$$

Подставив в это выражение значение

$$S = \frac{F - \alpha}{F}, \quad (\text{II}, 35)$$

придем, после математических преобразований, к уравнению с одним неизвестным F , имеющему следующий вид:

$$AF^5 + BF^4 + CF^3 + DF^2 + EF + G = 0, \quad (\text{V}, 65)$$

где $A = R_{\text{экв.}} x_{20}^2 + r_2 X_{\text{экв.}0}^2$;

$$B = -3\alpha r_2 X_{\text{экв.}0}^2 - 4\alpha R_{\text{экв.}} x_{20}^2;$$

$$C = r_2 R_{\text{экв.}}^2 + r_2^2 R_{\text{экв.}} - 2R_{\text{экв.}} X_{c_0} x_{20} + 3\alpha^2 r_2 X_{\text{экв.}0}^2 + 6\alpha^2 R_{\text{экв.}} x_{20}^2;$$

$$D = 4\alpha R_{\text{экв.}} X_{c_0} x_{20} - 4\alpha^3 R_{\text{экв.}} x_{20}^2 - \alpha^3 r_2 X_{\text{экв.}0}^2 - 3\alpha r_2 R_{\text{экв.}}^2 - \\ - 2\alpha r_2^2 R_{\text{экв.}};$$

$$E = \alpha^2 r_2^2 R_{\text{экв.}} + R_{\text{экв.}} X_{c_0}^2 + \alpha^4 R_{\text{экв.}} x_{20}^2 - 2\alpha^2 R_{\text{экв.}} X_{c_0} x_{20} + \\ + 3\alpha^2 r_2 R_{\text{экв.}}^2;$$

$$G = -\alpha^3 r_2 R_{\text{экв.}}^2.$$

И в данном случае совместное решение уравнений (V, 64) и (II, 35) удобнее осуществить графическим методом.

Уравнение (V, 64) определяет и величину емкости конденсаторов возбуждения, необходимую для получения частоты F при рассматриваемой нагрузке машины. Расположенное по убывающим степеням X_{c_0} оно примет вид:

$$X_{c_0}^2 - 2x_{20} F^2 S^2 X_{c_0} + x_{20}^2 F^4 S^4 + \\ + F + \frac{r_2 F^2 S^3}{R_{\text{экв.}}} (R_{\text{экв.}}^2 + X_{\text{экв.}0}^2 F^2) + r_2^2 F^2 S^2 = 0. \quad (\text{V}, 66)$$

Решив это уравнение, получим:

$$X_{c_0} = x_{20} F^2 S^2 \pm SF \sqrt{-\frac{r_2 S}{R_{\text{экв.}}} (R_{\text{экв.}}^2 + X_{\text{экв.}0}^2 F^2) - r_2^2}. \quad (\text{V}, 67)$$

Подставив в выражение для X_{c_0} значение $S = \frac{F - \alpha}{F}$ и отбросив не имеющие физического значения корни, получим:

$$X_{c_0} = x_{20} (F - \alpha)^2 - \\ - (F - \alpha) \sqrt{-\frac{r_2 (F - \alpha)}{FR_{\text{экв.}}} (R_{\text{экв.}}^2 + X_{\text{экв.}0}^2 F^2) - r_2^2}. \quad (\text{V}, 68)$$

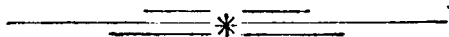
После определения F , X_{m_0} , при наличии кривых

$$X_{m_0} = f(I_\mu) \text{ и } I_\mu X_{m_0} = f(I_\mu),$$

дальнейшее решение задачи проходит по изложенной выше методике.

Можно конденсаторы возбуждения включить не в цепь ротора, а в цепь статора, нагрузку же снимать с колец ротора. В этом случае первичной цепью будет цепь ротора, а вторичной — цепь статора.

Последняя схема может привести к экономии в емкости конденсаторов возбуждения, так как они будут включены на более высокое напряжение статора по сравнению с напряжением сети, питаемой от ротора генератора.



ГЛАВА VI

РАБОТА АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ И ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЕ

§ 28. Исследование работы асинхронной машины в качестве генератора переменной частоты

Рассматривая уравнения (V, 33) и (V, 65), мы видим, что частота генератора зависит как от скорости вращения (α), так и сопротивлений его первичной и вторичной цепей.

Отсюда вытекает возможность изменения частоты генератора при работе его с постоянной скоростью вращения.

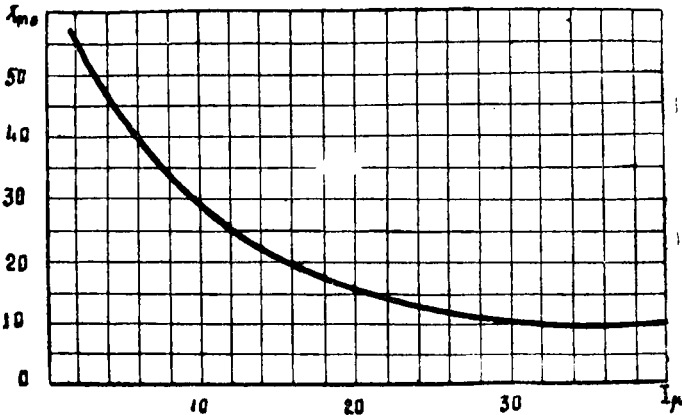


Рис. 49.

Практически удобными величинами для изменения частоты генератора являются емкость конденсаторов возбуждения, а для асинхронных генераторов с фазным ротором, кроме этого, еще и сопротивление цепи ротора.

Методика расчетов, изложенная ранее, применима и для рассматриваемого случая работы генератора.

Расчеты могут вестись по тем же формулам. Нужно только, в случае включения реостата в цепь ротора, в эти формулы вместо значений r_2 подставлять значение R_2 , являющееся при-

веденным к первичной цепи активным сопротивлением цепи ротора, включающим в себя активное сопротивление как обмотки ротора, так и реостата, включенного в цепь ротора. Применим в виде примера, эту методику для изучения работы в качестве генератора переменной частоты асинхронной машины типа КТ-30/1002, имеющей следующие исходные данные: $P=3$ квт; $n_c=1000$ об/мин; $U_1=380/220$ в; $U_2=198$ в; $r_1=1,75$ ом; $r_2=r'_2=4,3$ ом; $x_{1_0}=3,36$ ом; $x_{2_0}=x'_{2_0}=4,75$ ом. Кривая $X_{m0}=f(I_\mu)$ для этой машины представлена на рис. 49.

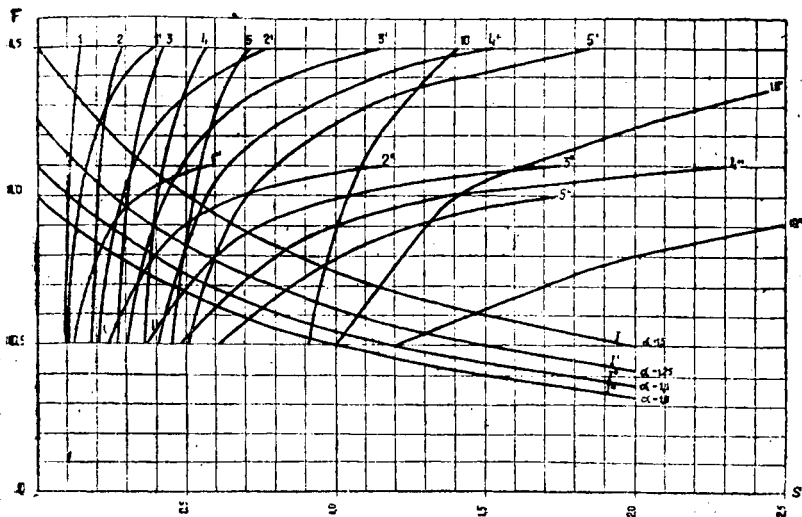


Рис. 50.

Исследуем работу этой машины, вращающейся с постоянной скоростью на постоянную активную нагрузку при различных значениях: α , X_{c0} и R_2 и при включении емкости конденсаторов возбуждения в цепь статора параллельно нагрузке.

Активную нагрузку примем равной $R_n=50$ ом.

Величине α будем давать значения: 1,0; 1,1; 1,25; 1,5;

" X_{c0} " " " : 40 ом; 20 ом; 10 ом;

" R_2 " " " : r_2 ; $2r_2$; $3r_2$; $4r_2$; $5r_2$; $10r_2$.

Расчеты и их результаты представлены на рис. 50—52.

На рис. 50 дано графическое решение уравнений (II, 35) и (V, 32). Кривые I представляют уравнение (II, 35), а остальные кривые — уравнение (V, 32).

Причем:

кривая I	построена при значении	$\alpha=1,5$
" I'	" " "	$\alpha=1,25$
" I''	" " "	$\alpha=1,1$
" I'''	" " "	$\alpha=1,0$

кривая 1	соответствует	$X_{c_0} = 40$ ом	и	$R_2 = r_2;$
" 2	"	"	"	$R_2 = 2r_2;$
" 3	"	"	"	$R_2 = 3r_2;$
" 4	"	"	"	$R_2 = 4r_2;$
" 5	"	"	"	$R_2 = 5r_2;$
" 10	"	"	"	$R_2 = 10r_2;$
кривая 1'	"	$X_{c_0} = 20$ ом	и	$R_2 = r_2;$
" 2'	"	"	"	$R_2 = 2r_2;$
" 3'	"	"	"	$R_2 = 3r_2;$
" 4'	"	"	"	$R_2 = 4r_2;$
" 5'	"	"	"	$R_2 = 5r_2;$
" 10'	"	"	"	$R_2 = 10r_2;$
кривая 1''	"	"	10 ом	и $R_2 = r_2;$
" 2''	"	"	"	$R_2 = 2r_2;$
" 3''	"	"	"	$R_2 = 3r_2;$
" 4''	"	"	"	$R_2 = 4r_2;$
" 5''	"	"	"	$R_2 = 5r_2;$
" 10''	"	"	"	$R_2 = 10r_2;$

На рис. 51 дан ряд кривых $F = f(R_2)$ при различных значениях α и X_{c_0} , а на рис. 52 — ряд кривых $F = f(X_{c_0})$ при различных значениях α и R_2 .

Из рассмотрения кривых рис. 51 и 52 видно, что изменением величин емкостного и активного сопротивлений возможно регулирование частоты генератора.

При относительно больших величинах емкостного сопротивления изменение его величины незначительно влияет на частоту, но по мере уменьшения сопротивления цепи конденсаторов влияние это усиливается, и частота начинает сильно изменяться.

Изменение активного сопротивления цепи ротора значительно влияет на частоту генератора. Имеет значение и число оборотов, характеризуемое коэффициентом α ; диапазон регулирования тем больше, чем выше скорость генератора.

Одновременным изменением емкостного сопротивления цепи возбуждения и активного сопротивления цепи ротора можно достигнуть регулирования частоты генератора в широких пределах и подобрать оптимальные условия работы генератора в изучаемом режиме.

При этом для уменьшения частоты значение X_{c_0} должно уменьшаться, а R_2 увеличиваться.

Генерирование токов переменной частоты можно было бы получить и от асинхронного генератора, включенного по схеме рис. 48, за счет изменения емкости конденсаторов возбуждения, включенных в цепь ротора, при питании нагрузки от статора.

Методика расчетов и в этом случае аналогична рассмотренной, с той лишь разницей, что основными, решаемыми графическим путем уравнениями являются теперь уравнения (II, 35) и (V, 64). Возможна модификация последней схемы путем вклю-

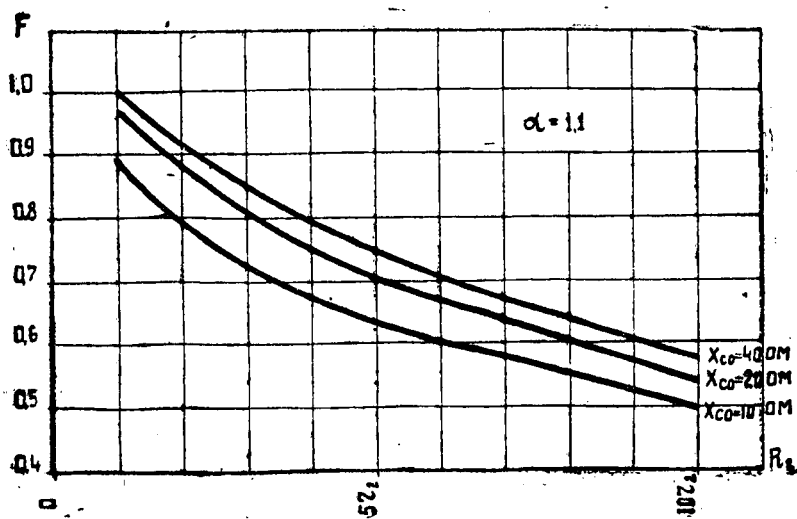
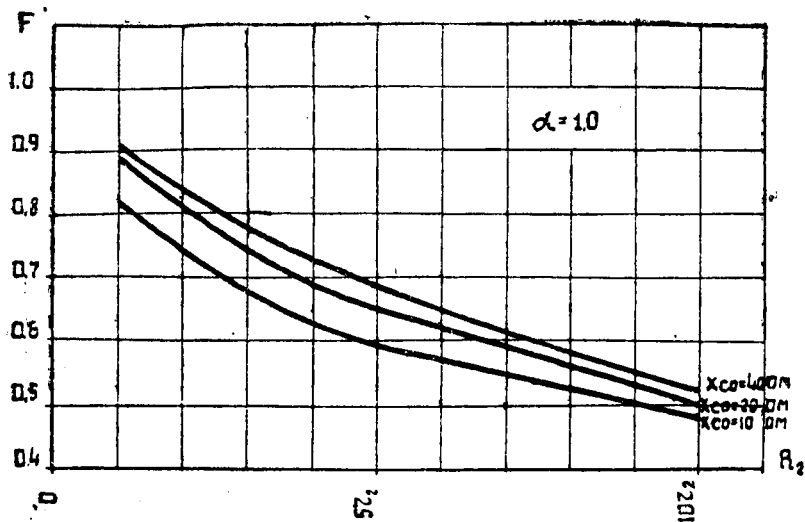


FIG. 51.

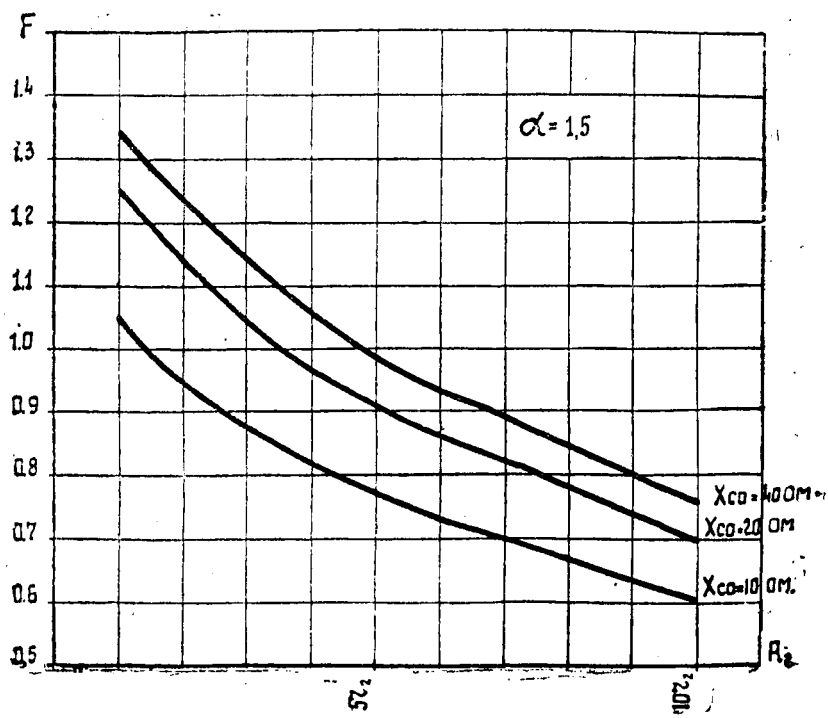
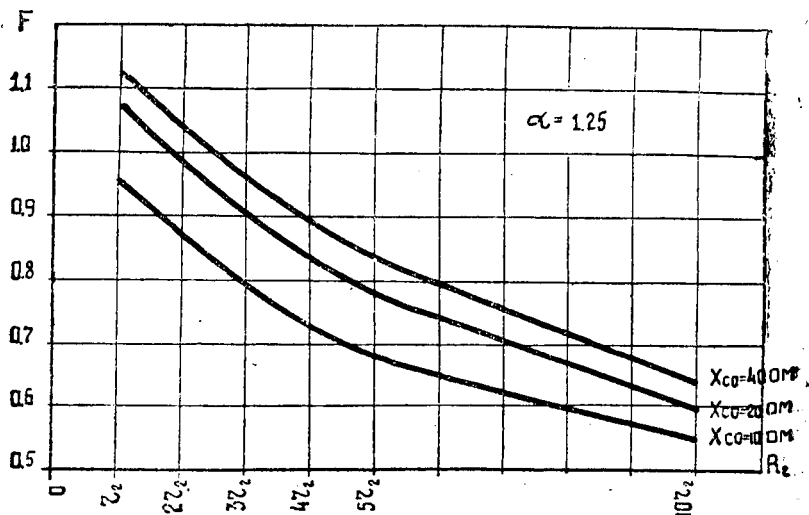


Рис. 51.

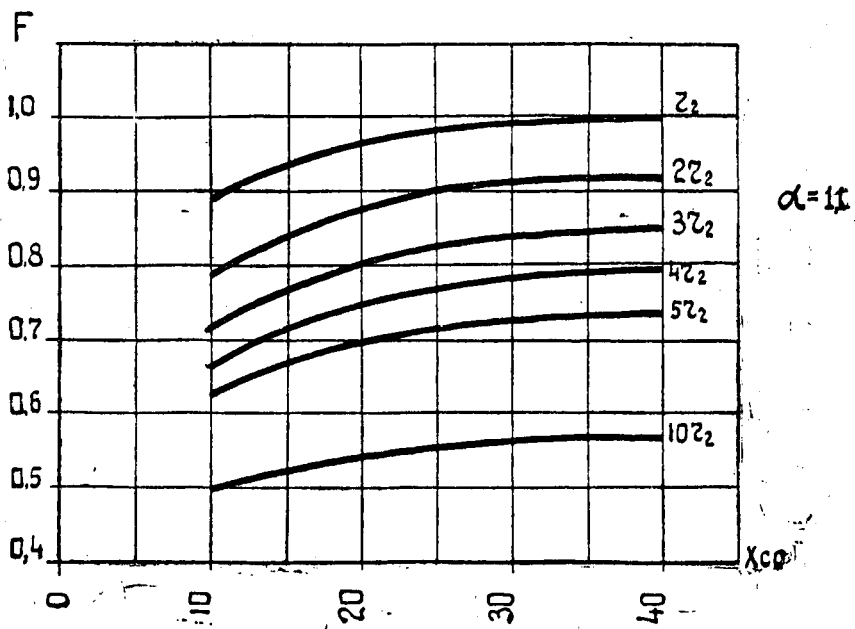
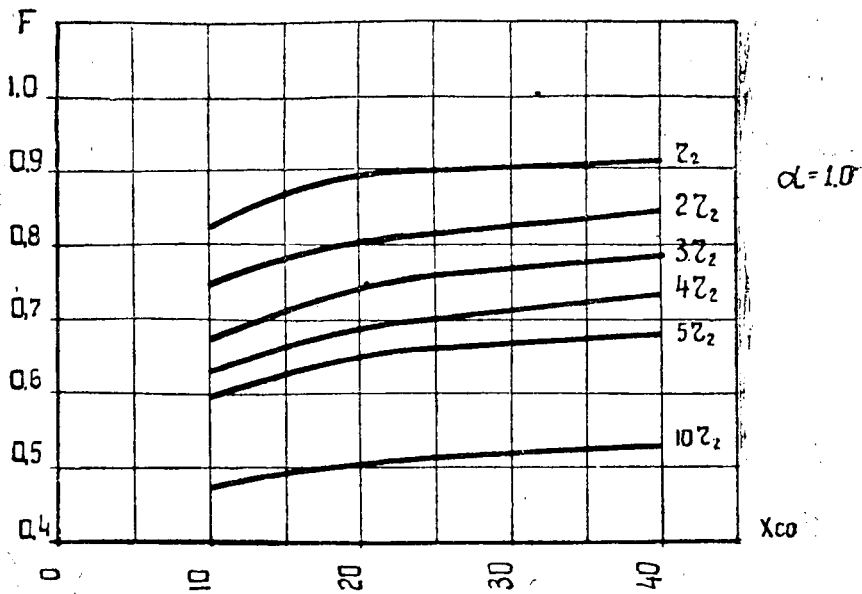


Рис. 52.

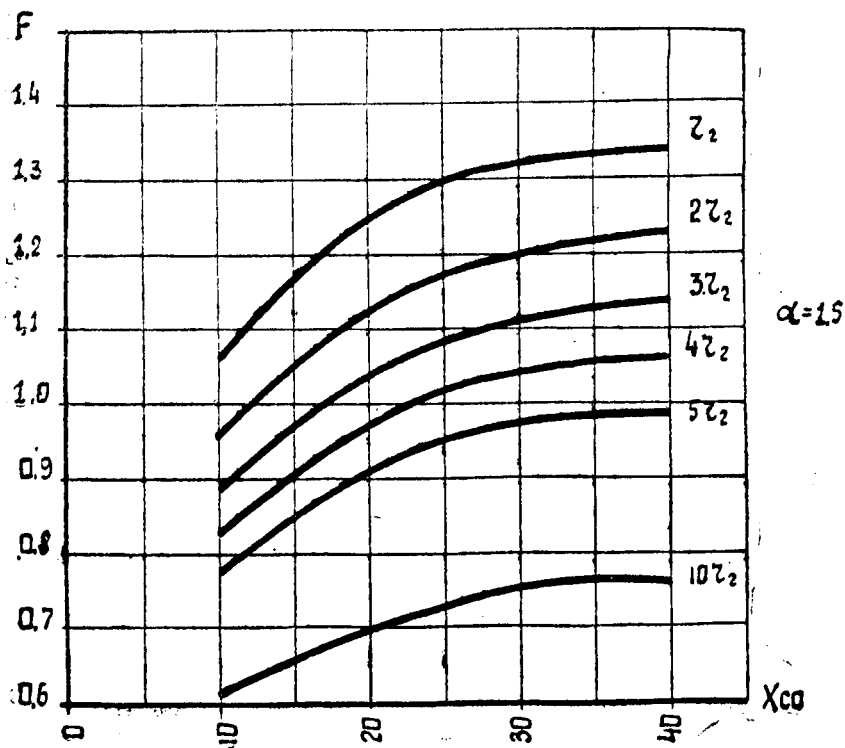
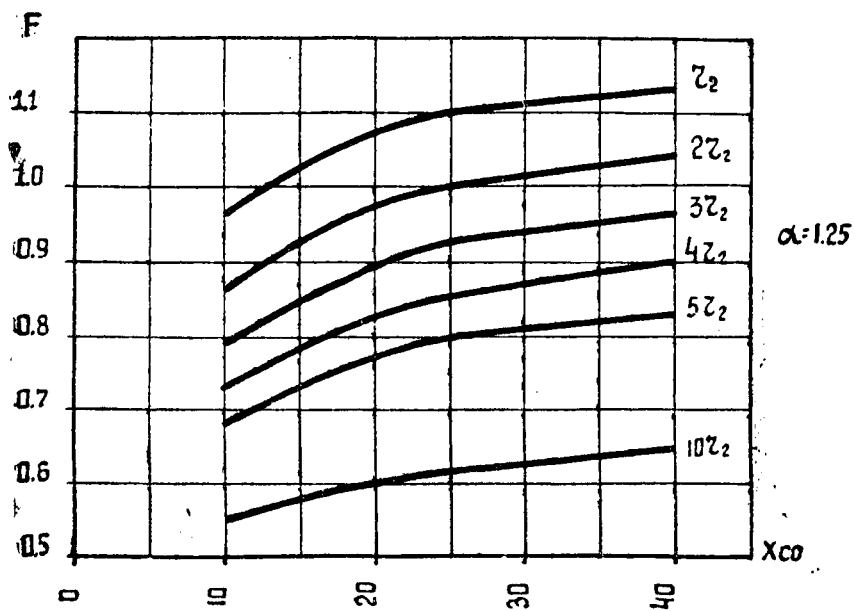


Рис. 52.

чения конденсаторов возбуждения в цепь статора и питания потребителей от колец ротора.

Неудобство всех рассмотренных схем заключается в том, что изменение частоты связано с коммутационными переключениями в первичной или вторичной цепях генератора. Это вносит осложнения в схему, придает регулированию частоты ступен-

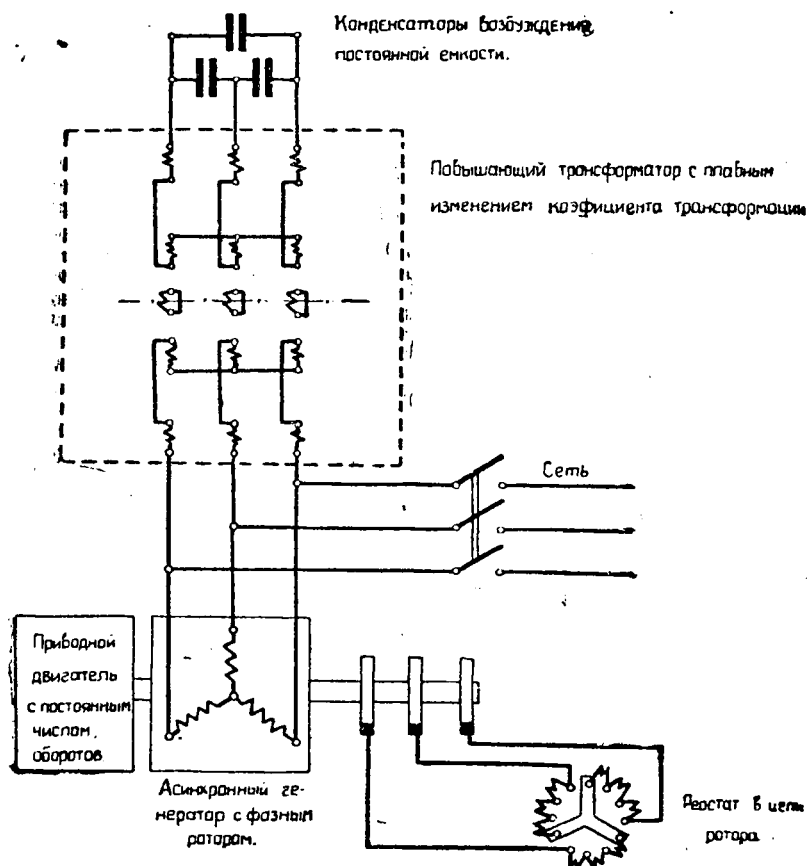


Рис. 53.

чатый характер и затрудняет применение повышающих трансформаторов в цепи возбуждения в целях экономии емкостей, значение которых при включении конденсаторов возбуждения на генераторное напряжение получается большим, особенно при питании двигательной нагрузки требующей большой рабочей емкости и, значительно превосходящей рабочую, пусковой емкости.

Автор избежал этих осложнений тем, что, в отличие от других исследователей (Голован, Дубенский), предложил метод

изменения частоты у генератора не путем изменения емкости конденсаторов возбуждения, а за счет изменения коэффициента трансформации трансформатора (или автотрансформатора), через который подключаются конденсаторы возбуждения постоянной емкости к первичной или вторичной обмоткам генератора.

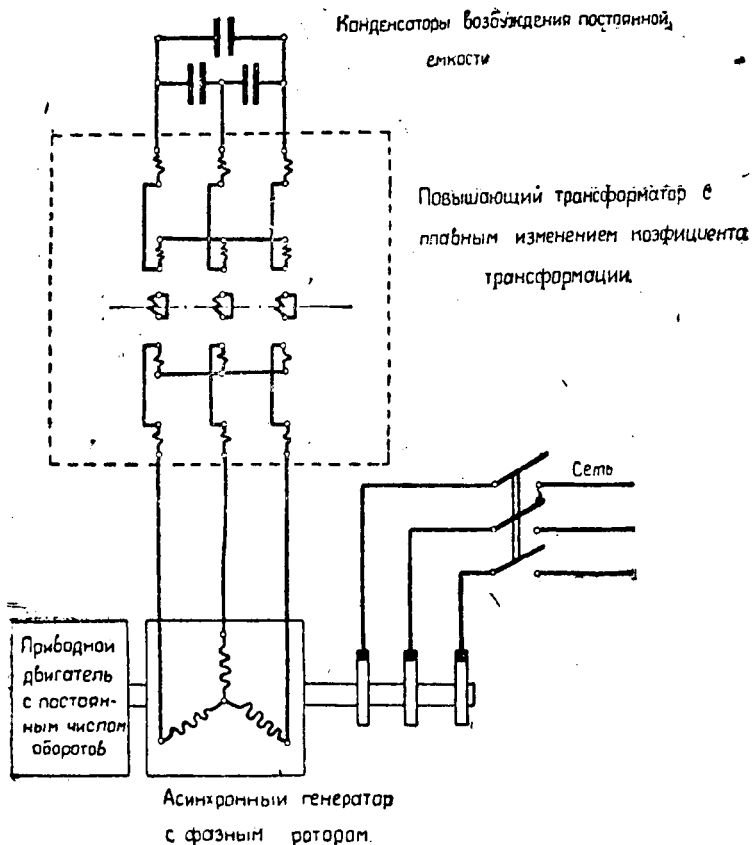


Рис. 54.

Применяя при этом методе специальные трансформаторы (или автотрансформаторы) с плавным изменением коэффициента трансформации без контактных переключений и включая конденсаторы возбуждения во вторичную цепь повышающего трансформатора этого типа, можно значительно уменьшить емкость этих конденсаторов и получить плавное регулирование частоты генератора, а при питании от него индукционных двигателей — плавное изменение их скорости вращения.

На рис. 53 и 54 даны примеры предложенных автором схем. Здесь конденсаторы возбуждения постоянной емкости включены во вторичную обмотку повышающего трансформатора с подвижной короткозамкнутой обмоткой.

Передвигая эту обмотку вручную или сервомотором небольшой мощности (через винтовое зацепление), можно получить плавное изменение частоты генератора без всяких контактных переключений, а при питании от него индукционного двигателя — плавное изменение числа оборотов этого двигателя.

Таким образом при работе асинхронного генератора на индивидуальную нагрузку возможны следующие компоновки элементов схемы.

1. Конденсаторы возбуждения включаются на зажимы первичной обмотки генератора параллельно с нагрузкой, а реостат —

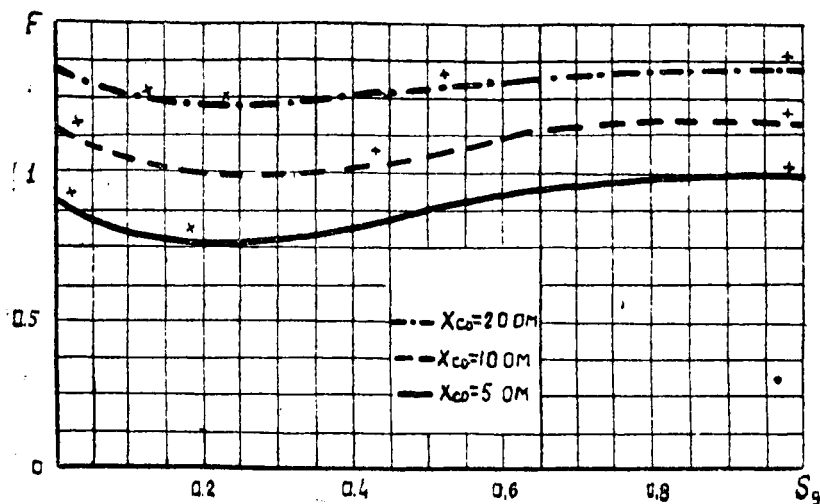


Рис. 55.

во вторичную обмотку генератора. Изменение частоты генератора достигается изменением емкости конденсаторов возбуждения и активного сопротивления реостата.

2. Конденсаторы возбуждения включаются во вторичную цепь генератора, а нагрузка — в первичную. Изменение частоты генератора достигается изменением емкости конденсаторов возбуждения.

3. Конденсаторы возбуждения постоянной емкости включаются на зажимы первичной или вторичной обмоток генератора через трансформатор или автотрансформатор с переменным коэффициентом трансформации, за счет изменения которого и происходит регулирование частоты генератора.

При всех этих компоновках схем установки, первичной и вторичной обмотками генератора могут быть как обмотки статора, так и обмотки ротора.

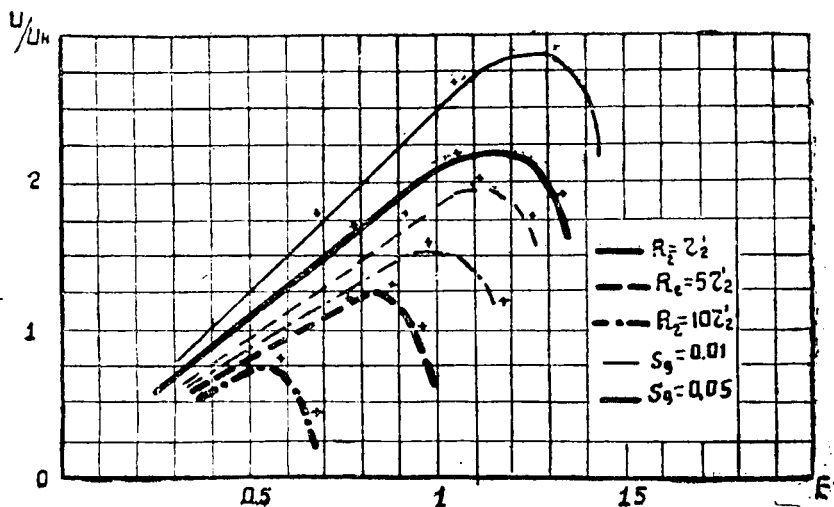


Рис. 56.

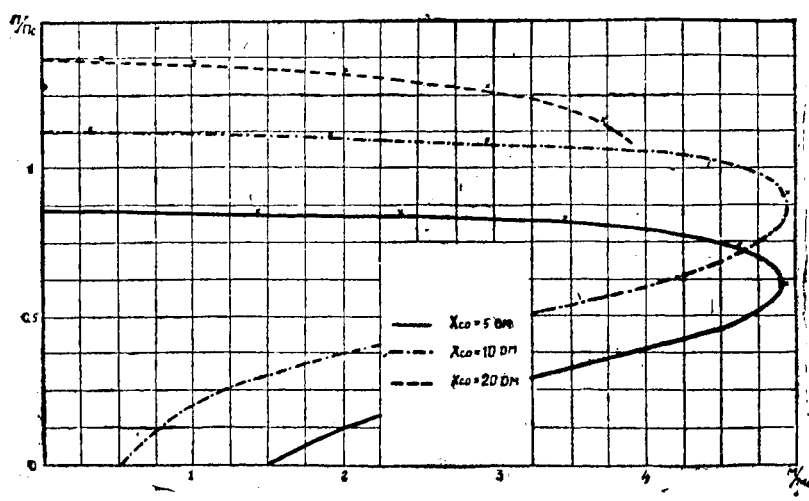


Рис. 57.

Исследованием работы асинхронного генератора переменной частоты на индукционный двигатель, соизмеримой с генератором мощности, с частотным регулированием его числа оборотов

в достаточно широких пределах, занимались Голован, Дубенский (МЭИ им. Молотова) и автор (Институт энергетики АН КазССР).

Голован и Дубенский при этом ориентировались на схемы первых двух компоновок, причем емкость конденсаторов воз-

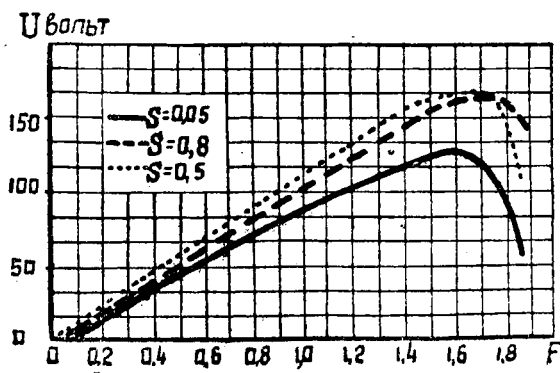


Рис. 58.

буждения изменялась ими ступенями, путем контактных переключений в цепи возбуждения.

Полученные ими результаты частично характеризуются рис. 55—61.

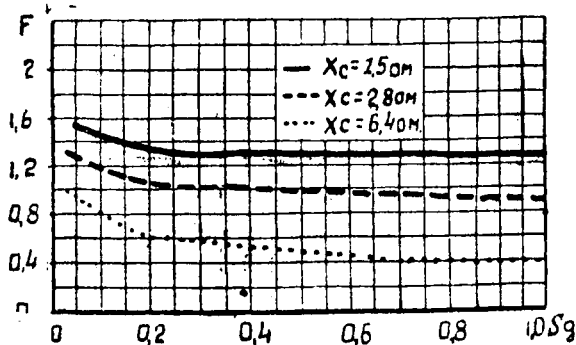


Рис. 59.

Данные, приведенные на рисунках 55, 56 и 57, относятся к первой компоновке схемы с использованием машины типа КТ-30/1002 в качестве генератора, с числом 1500 об/мин и машины типа И-2-30/6 в качестве двигателя.

Рисунки 58, 59, 60 и 61 иллюстрируют работу машины типа АИ-30-4 в качестве генератора, вращающегося с двойной синхронной скоростью, а индукционного двигателя типа МКА-13/6— в качестве нагрузки, при второй компоновке схемы.

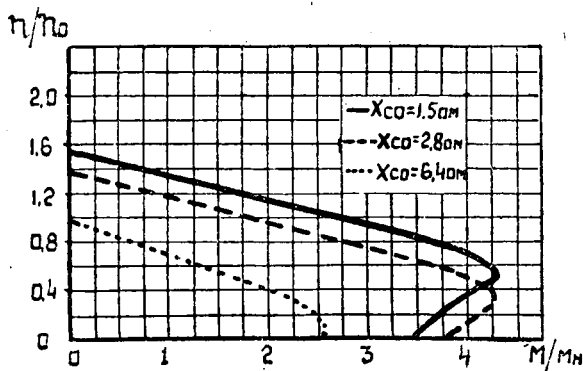


Рис. 60.

Как видим, рабочая емкость конденсаторов возбуждения приведенная к эквивалентной звезде и напряжению первичной обмотки, получилась очень большой (от 80 до 640 μF на фазу для первой установки и от 500 до 2120 μF на фазу для второй).

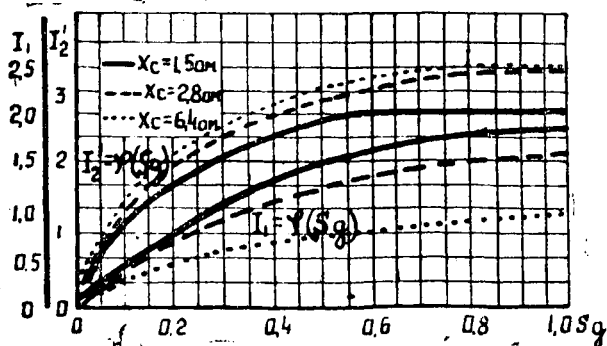


Рис. 61.

Применяя к рассмотренному случаю работы асинхронных машин третью компоновку схемы в соответствии с рисунками 53 и 54, при использовании высоковольтных конденсаторов возбуждения, можно было бы значительно снизить емкость этих конденсаторов, избежать контактных переключений в цепи

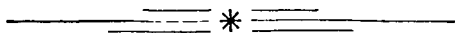
возбуждения и достигнуть более плавного регулирования в тех же пределах.

Ограничиваясь только этими частичными данными, автор считает необходимым отметить, что изучение возможностей практического применения асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением для регулируемого привода еще не закончено.

Возникает ряд вопросов, требующих дальнейшего изучения.

Главные из них связаны с проблемой снижения потерь при низких частотах и использования энергии скольжения генераторов без применения сложных устройств, а также с исследованиями переходных процессов.

Более расширенную трактовку вопросов, связанных с применением асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением в электроприводе, автор предполагает дать в следующей книге.



ГЛАВА VII ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обычные асинхронные машины могут самовозбуждаться за счет емкости и остаточного магнетизма и быть использованы в качестве генераторов для работы на самостоятельную сеть.

2. Условием устойчивого самовозбуждения и работы генератора на холостом ходу и под нагрузкой является такой подбор параметров системы, при котором достигается равенство по величине и противоположность по знаку полных сопротивлений (проводимостей) генератора и внешней сети.

3. Напряжение и ток холостого хода, с достаточной для инженерной практики точностью, могут быть определены по пересечению магнитной характеристики генератора и вольтамперной характеристики конденсаторов возбуждения, построенных для частоты возникающих колебаний, определяемой условиями резонанса.

4. При работе генератора на холостом ходу область его самовозбуждения ограничена двумя пределами (верхним и нижним).

5. Производственное значение холостого хода самовозбужденного генератора с конденсаторным возбуждением определяется не только генераторными установками, но распространяется и на установки индукционных машин при их использовании в качестве двигателей, так как с ним связаны:

а) перенапряжения, за счет самовозбуждения, при отключении индукционных двигателей с индивидуальным исправлением коэффициента мощности и переходные процессы, возникающие при повторном включении их самовозбужденными в сеть;

б) возможность использования явления самовозбуждения для целей эффективного торможения индукционных двигателей.

6. Асинхронные генераторы могут работать на любую по характеру нагрузку, при условии обеспечения баланса реактивных отстающих и опережающих мощностей системы.

7. Устойчивая работа асинхронных генераторов возможна при насыщении их магнитной системы более высокой, чем при двигательном режиме; степень насыщения определяется характером нагрузки.

8. Конденсаторы возбуждения могут включаться параллельно нагрузке, последовательно с ней, а также во вторичную цепь генератора при включении нагрузки в его первичную цепь.

9. Величина емкости конденсаторов возбуждения зависит от конструктивных данных генератора, схемы включения конденсаторов, напряжения на их зажимах, характера нагрузки и режима работы генератора.

При работе асинхронного генератора на сеть, подключенную к нему через повышающий трансформатор, перенос конденсаторов возбуждения на сторону высокого напряжения дает значительное снижение величины их емкости; при распределении энергии на генераторном напряжении экономию в емкости конденсаторов возбуждения можно получить за счет включения их через повышающий трансформатор.

10. Регулирование напряжения асинхронных генераторов легко осуществимо многообразными методами; имеется возможность создать схемы автоматического регулирования и стабилизации напряжения генератора при работе их на переменную нагрузку.

11. Возможными режимами работы асинхронного генератора под нагрузкой являются:

- а) работа при постоянной частоте;
- б) работа при постоянном числе оборотов и незначительном изменении частоты, определяемом изменением скольжения при изменении нагрузки;
- в) работа при постоянном числе оборотов в качестве генератора переменной частоты с изменением ее в широких пределах.

12. Асинхронные генераторы с параллельным, относительно нагрузки, включением конденсаторов возбуждения не боятся коротких замыканий и имеют внешнюю характеристику аналогичную внешней характеристике шунтовых генераторов постоянного тока.

Часто, после короткого замыкания, эти генераторы теряют остаточный магнетизм; восстановление его легко осуществить одним из следующих методов:

- а) кратковременным включением машины на сеть переменного тока по схеме двигателя;
- б) разрядом через обмотку генератора конденсаторов;
- в) кратковременным пропусканием через две фазы соединенных звездой обмоток генератора постоянного тока от переносного аккумулятора напряжением 4—6 в.

При работе асинхронного генератора на индивидуальную сеть, в условиях отсутствия сети переменного тока, можно рекомендовать последний метод. Переносный аккумулятор, в этом случае, удобно заряжать от купроксенного или селенового выпрямителя с питанием его непосредственно от отпаек обмотки генератора, или через понизительный трансформатор.

13. Асинхронные генераторы со смешанным включением конденсаторов возбуждения параллельно нагрузке и последовательно с ней при коротком замыкании имеют повышение напря-

жения и тока генератора; величина их зависит от емкости конденсаторов возбуждения и схемы их включения.

При включении конденсаторов возбуждения по схеме „короткий шунт“ емкость их при коротком замыкании определяется суммой емкостей параллельно и последовательно включенных конденсаторов, а при схеме „длинный шунт“ она равна емкости последовательно включенных конденсаторов возбуждения.

Возможно создание специальных схем генераторов смешанного возбуждения за счет разбивки шунтовых и серийных емкостей на части и включения их в схему в различных комбинациях. Этим можно достигнуть управления характеристиками генераторов как при нагрузке, так и при коротком замыкании.

14. При работе асинхронного генератора без регулирования напряжения в случае сброса его нагрузки имеет место повышение напряжения, величина которого зависит от характера нагрузки, определяющей емкость конденсаторов возбуждения.

Разбивкой конденсаторов возбуждения на группы, включаемые и выключаемые вместе с нагрузкой, можно значительно снизить напряжение на зажимах генератора при сбросе нагрузки.

15. При работе асинхронной машины в режиме генератора переменной частоты, с изменением ее в широких пределах, возможны следующие методы регулирования частоты:

- а) изменение емкости конденсаторов возбуждения, включенных параллельно нагрузке;
- б) изменение активного сопротивления реостата, включенного во вторичную цепь генератора;
- в) изменение емкости конденсаторов возбуждения, включенных во вторичную цепь генератора;
- г) изменение коэффициента трансформации трансформатора (или автотрансформатора), через который в первичную или вторичную цепь генератора включены конденсаторы возбуждения постоянной емкости.

16. При регулировании частоты генератора изменением емкости конденсаторов возбуждения, включенных параллельно нагрузке, уменьшению емкости конденсаторов возбуждения соответствует увеличение частоты генератора и наоборот. При относительно малых значениях емкостей конденсаторов возбуждения изменение их величины незначительно изменяет частоту генератора. По мере увеличения емкости конденсаторов возбуждения влияние ее на изменение частоты усиливается, и диапазон регулирования увеличивается.

17. При регулировании частоты генератора изменением активного сопротивления реостата, включенного во вторичную цепь генератора, увеличению сопротивления реостата соответствует уменьшение частоты генератора и наоборот.

18. При регулировании частоты генератора изменением емкости конденсаторов возбуждения, включенных во вторич-

ную цепь генератора, увеличению емкости конденсаторов возбуждения соответствует увеличение частоты генератора и наоборот.

19. При регулировании частоты генератора изменением коэффициента трансформации трансформатора, через который включены конденсаторы возбуждения постоянной емкости, частотные характеристики зависят от схемы включения этого трансформатора.

При включении его параллельно нагрузке частотные характеристики аналогичны характеристикам п. 16.

При включении его во вторичную цепь генератора частотные характеристики аналогичны характеристикам п. 18.

Регулирование же частоты может происходить более плавно при меньшей емкости конденсаторов возбуждения (при повысительном трансформаторе).

20. Диапазон регулирования частоты генератора можно расширить при регулировании комбинированным методом. Он зависит также от числа оборотов генератора (тем больше, чем выше обороты).

21. При работе асинхронного генератора на индивидуальную нагрузку, создаваемую индукционным двигателем, регулирование частоты генератора является, одновременно, и регулированием числа оборотов этого двигателя.

22. При работе генератора на индукционный двигатель с частотным регулированием его скорости вращения за счет изменения емкости конденсаторов возбуждения, включенных параллельно нагрузке (или коэффициента трансформации при аналогичном включении конденсаторов возбуждения постоянной емкости через трансформатор с переменным коэффициентом трансформации), увеличение емкости этих конденсаторов (или соответствующее ему изменение коэффициента трансформации при постоянной емкости конденсаторов возбуждения) вызывает перемещение механической характеристики двигателя вниз и повышение ее жесткости. Наибольшей целесообразности достигает этот метод регулирования при работе на высоких частотах.

23. При частотном регулировании скорости вращения индукционного двигателя за счет изменения величины активного сопротивления реостата, включенного во вторичную цепь генератора, питающего этот двигатель, увеличение активного сопротивления этого реостата приводит к смягчению механической характеристики двигателя и перемещению ее вниз. Обычно этот метод регулирования применяется совместно с предыдущим методом (см. II. 22).

24. При частотном регулировании скорости вращения индукционного двигателя, питающегося от асинхронного генератора с конденсаторами возбуждения во вторичной цепи этого генератора (или конденсаторами постоянной емкости, включенными во вторичную цепь генератора через трансформатор с пере-

менным коэффициентом трансформации), изменение емкости этих конденсаторов (или коэффициента трансформации трансформатора при постоянной емкости конденсаторов возбуждения) вызывает практически параллельное смещение механической характеристики индукционного двигателя. Этот метод наиболее целесообразен при низких частотах.

25. Диапазон регулирования зависит от скорости вращения генератора (тем больше, чем больше число оборотов генератора), от параметров системы генератор — двигатель, и при числе оборотов генератора, равном полуторному значению от синхронных (по двигательному режиму при 50 Hz), практически может быть доведен до 6—8-кратного.

26. При частотном регулировании скорости вращения индукционного двигателя, работающего от асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением, напряжение меняется, практически, прямо пропорционально частоте, что обеспечивает работу двигателя при постоянном потоке.

27. Сброс моторной нагрузки, питающейся от генератора переменной частоты, вызывает недопустимую перегрузку генератора.

28. Емкость конденсаторов возбуждения генератора, необходимая для пуска от него индукционного двигателя соизмеримой с ним мощности, значительно превосходит рабочую емкость. Так как в качестве приводного двигателя генератора переменной частоты проще всего использовать индукционный двигатель с питанием от сети переменного тока стандартной частоты, то имеется полная возможность сконструировать схему установки так, чтобы разворот регулируемого двигателя происходил от сети с дальнейшим питанием его от генератора переменной частоты. Это дает возможность обойтись конденсаторами рабочей емкости.

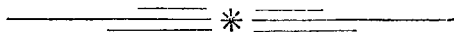
29. Асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением являются предельно простыми и надежными машинами, не требующими квалифицированного обслуживания.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Будзко и Ф. А. Горяинов. Самовозбуждающийся асинхронный генератор. *Электричество*, № 8, 1939.
2. А. Т. Голован и И. П. Барбараш. Работа асинхронного генератора в режиме с самовозбуждением. *Электричество*, № 3, 1944.
3. А. Т. Голован и А. А. Дубенский. Асинхронный самовозбуждающийся генератор переменной частоты. *Электричество*, № 5, 1945.
4. А. А. Дубенский. Некоторые вопросы теории и применения асинхронного генератора переменной частоты с самовозбуждением (диссертация). 1945.
5. Ю. Д. Зубков. Экспериментальное исследование работы асинхронных моторов в генераторном самовозбуждающемся (при помощи емкости) режиме. (Рукописный отчет о работе, проведенной автором в электроцехе з-да „Коминтерн“, 1936 г.)
6. Ю. Д. Зубков. Питание маломощных радиопередающих устройств от асинхронных машин, работающих в генераторном самовозбуждающемся режиме. (Диссертация). 1945.
7. Ю. Д. Зубков. Условия возбуждения и работы асинхронной машины, возбужденной от конденсаторов, в генераторном режиме, *Известия Казахского филиала АН СССР, серия Энергетическая* № 1 (25), 1945.
8. Ю. Д. Зубков. Материалы заявок: „Асинхронный генератор с регулированием частоты“ и „Агрегат асинхронных машин“ (Справка № 970, НКЭП 1945).
9. Ю. Д. Зубков. Построение круговой диаграммы по данным технических справочников и каталогов, *Вестник Казахского филиала АН СССР*, № 4 (13), 1946.
10. А. А. Иванов. О самовозбуждении бесколлекторных асинхронных машин. Труды Одесского промышленного института, электротехнический факультет, вып. II (5), 1940.
11. А. А. Иванов. Исследование режимов работы асинхронного генератора на индивидуальную сеть. Труды Одесского промышленного института, электротехнический факультет, вып. III (6), 1940.
12. А. А. Иванов. Компаундированный асинхронный генератор. *Электричество* № 9, 1940.
13. Под ред. Г. Н. Петрова и др. *Электрические машины*, ч. 1, 1940.
14. В. С. Ракита. Динамическое торможение асинхронных двигателей. *Вестник электропромышленности*, № 10, 1940.
15. Р. Рихтер. *Электрические машины*, т. 4, 1939.
16. П. А. Свириденко. Использование асинхронных двигателей в качестве генераторов. *Вестник электропромышленности*, № 7—8, 1943.
17. П. Ф. Скворцов. Асинхронный генератор с конденсаторным возбуждением (диссертация). 1946.
18. Ю. Чет. Примечания редактора к книге Р. Рихтера — *Электрические машины*, т. 4, 1939.
19. К. И. Шенфер и П. А. Свириденко. Рекуперация энергии в промышленности, изд-во АН СССР, 1946.

20. W. C. Bloomquist. Bolce W. K. Application of capacitors for power-factor improvement of induction motors. Electrical Engineering, 1945, m. 64, № 5.

21. A. Leonhard. Allgemeines Verfahren für die Klärung der Selbsterregungsbedingungen bei elektrischen Maschinen. Archiv für Electrotechnik, 1942, m. 36, № 4.



ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Глава I. Работа асинхронных машин в генераторном режиме	
§ 1. Условия генераторного режима	5
§ 2. Работа асинхронной машины в качестве генератора с независимым возбуждением	5
§ 3. Работа асинхронной машины в качестве самовозбуждающегося генератора	7
Глава II. Работа асинхронных машин в генераторном режиме с конденсаторным возбуждением	
§ 4. Холостой ход	8
§ 5. Условия самовозбуждения системы	12
§ 6. Графоаналитический метод расчета самовозбуждения асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением при холостом ходе	15
§ 7. Определение параметров самовозбуждения по конструктивным данным машины	19
§ 8. Работа асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением в режиме холостого хода при изменении его скорости вращения в широких пределах	21
Глава III. Работа асинхронного самовозбуждающегося генератора под нагрузкой	
§ 9. Общие условия самовозбуждения и работы генератора под нагрузкой	29
§ 10. Возможные режимы работы асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением под нагрузкой	32
Глава IV. Работа асинхронного генератора на симметричную нагрузку при постоянной частоте	
§ 11. Общие условия и методика исследования	33
§ 12. Метод круговых диаграмм токов при изучении работы на симметричную нагрузку асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением	33
§ 13. Определение величины емкости конденсаторов возбуждения при включении их на генераторное напряжение	36
§ 14. Зависимость величины емкости конденсаторов возбуждения от напряжения на их зажимах	39
§ 15. Повышение напряжения асинхронного генератора при сбросе нагрузки	40
§ 16. Круговая диаграмма проводимостей при изучении работы асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением	41
§ 17. Построение внешних характеристик асинхронного генератора при помощи диаграммы проводимостей	45

§ 18. Методы регулирования напряжения асинхронных генераторов с конденсаторным возбуждением при работе их с постоянной частотой	51
§ 19. Регулирование напряжения асинхронного генератора изменением величины емкости параллельно включенных на его зажимы конденсаторов возбуждения	51
§ 20. Регулирование напряжения асинхронного генератора изменением напряжения на зажимах конденсаторов возбуждения при постоянной величине их емкости	53
§ 21. Регулирование напряжения путем вывода отпаяк от обмотки статора асинхронного генератора	56
§ 22. Регулирование напряжения насыщением магнитной системы асинхронного генератора	56
§ 23. Регулирование напряжения асинхронного генератора за счет включения на его зажимы насыщенного дросселя	58
§ 24. Регулирование напряжения включением трансформатора с переменным коэффициентом трансформации в отпайки от обмотки статора генератора	62
§ 25. Регулирование напряжения асинхронного генератора путем включения дополнительной емкости последовательно с нагрузкой	62

Глава V. Работа асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением на симметричную нагрузку при постоянной скорости вращения генератора и неизменном возбуждении

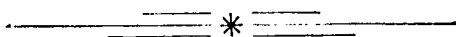
§ 26. Общие условия данного режима работы	71
§ 27. Методы расчета работы асинхронного генератора в изучаемом режиме	71

Глава VI. Работа асинхронного генератора при постоянной скорости вращения и переменной частоте

§ 28. Исследование работы асинхронной машины в качестве генератора переменной частоты	90
---	----

Глава VII. Заключение 104

Литература	109
----------------------	-----



Редактор А. В. Берендеев
Техн. редактор Н. А. Имаков

Сдано в набор 22/II 1949 г. Подписано к печати 22/III 1949 г.
Объем 7,0 п. л. Учетно-издат. 6,8 л. УГ 05037. Тираж 1000 экз.

Набрано и сматрицировано в Ленинграде, типография Западуголь.

Отпечатано в Типографии АН Казахской ССР, г. Алма-Ата,
ул. Виноградова, 26. Зак. 74.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
10	8 сверху	железа	стали
14	13 сверху	$(r_1 + jx_1) \bar{I}_1$	$(r_1 + jX_1) i_1$
15	7 сверху	энергии	мощности
24	3 сверху	$j(X_1 - X_c)$	$j(x_1 - X_c)$
25	7 сверху	графическим	графическим
42	формула (IV, 11)	$b_c = b + b_n ;$	$b_c = b_r + b_n ;$
50	21 снизу	железа	стали
50	2 снизу	на	до
65	10 снизу	$I_n = \frac{U_1}{\sqrt{R_n^2 + (X_n - X_{c1})^2}}$	$I_n = \frac{U_1}{\sqrt{R_n^2 + (X_n - X_{c1})^2}}$
77	формула (V, 26)	$X_{10} F$	$x_{10} F$
78	формула (V, 30)	$R_{\text{экр.}} X_{20} F$	$R_{\text{экр.}} X_{20} F$
79	15 сверху	$ag_2 X_{10} R_n^2$	$ag_2 x_{10} R_n^2$
83	20 снизу	относительно	относительной
98	5 сверху	обмоткам	обмотке
105	7 снизу	купроксенного	купроксного
106	24, 26, 28, 29 сверху	изменение	изменением

Цена 7 руб.

Цена 5 руб.

19
29002

ГНТБ России



162163