

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АВТОНОМНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА УПРАВЛЯЕМЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Б. Л. ЛУКУТИН, А. Б. ЦУКУБЛИН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Широкое применение тиристорных преобразователей частоты в качестве автономных источников электропитания выдвигает новые задачи исследования синхронного генератора, являющегося первичным источником энергии в таких системах. В частности, представляет интерес реакция якоря машины, нагруженной на преобразователь частоты при соизмеримости мощностей нагрузки и генератора.

Рассмотрим процессы в синхронном генераторе, работающем на управляемый выпрямитель, за период управления. Углы управления выпрямителем изменяются по арккосинусоидальному закону:

$$\alpha = \arccos \gamma \sin \omega_2 t,$$

где γ — коэффициент глубины модуляции;

ω_2 — угловая частота выходного напряжения.

С изменением угла управления будет меняться величина фазного тока, коэффициент мощности и длительность углов коммутации γ . В результате поток якоря за период управления выпрямителем будет меняться как по величине, так и по положению в пространстве.

Разделим условно переходный процесс в генераторе, вызванный изменением угла управления α , на две составляющие: высокочастотную, обусловленную коммутационным действием выпрямителя, и низкочастотную, обусловленную дискретным изменением угла управления вентилями.

Физическая картина низкочастотного переходного процесса в машине в основном определяется изменением первой гармоники фазного тока генератора за период управления выпрямителем. Поэтому низкочастотный переходный процесс может быть рассмотрен без учета угла коммутации γ , влияние которого учитывается высокочастотным переходным процессом. Для выявления закона изменения первой гармоники фазного тока разобьем действительную кривую тока на участки, равные по длительности периоду напряжения машины. Точки разбиения выбираем в моменты перехода кривой соответствующего фазного напряжения через нуль. В результате получим $k = \frac{\omega_1}{2\omega_2}$ функций для каждой фазы:

$$\begin{aligned} & i_{1A}(\omega_1 t), \quad i_{2A}(\omega_1 t), \quad \dots, \quad i_{kA}(\omega_1 t); \\ & i_{1B}(\omega_1 t), \quad i_{2B}(\omega_1 t), \quad \dots, \quad i_{kB}(\omega_1 t); \\ & i_{1C}(\omega_1 t), \quad i_{2C}(\omega_1 t), \quad \dots, \quad i_{kC}(\omega_1 t); \end{aligned}$$

где ω_1 — угловая частота генератора.

Разложение в ряд Фурье каждой из этих функций позволяет определить амплитуду и фазу первой гармоники:

$$A_{1ij} = \sqrt{a_{1ij}^2 + b_{1ij}^2};$$

$$\varphi_{1ij} = \arctg \frac{a_{1ij}}{b_{1ij}};$$

где a_{1ij} и b_{1ij} — коэффициенты при косинусной и синусной составляющих гармонического ряда.

Так как углы управления выпрямителем меняются по арккосинусoidalному закону, время работы вентиля моста различно. Следовательно, амплитуда и фаза первой гармоники тока различны как от интервала к интервалу, так и по фазам генератора в каждый момент времени. Выделяя из этой системы прямую последовательность фаз

$$\dot{A}_{1i} = \frac{1}{3} (\dot{A}_{1iA} + a \dot{A}_{1iB} + a^2 \dot{A}_{1iC}),$$

получаем, что прямая последовательность первых гармоник фазных токов меняется по амплитуде от 0 при $\alpha=90^\circ$ до максимального значения при $\alpha=0^\circ$ и по фазе от чисто индуктивного тока при $\alpha=90^\circ$ до чисто активного при $\alpha=0^\circ$. Законы изменения фазы и амплитуды при достаточно больших кратностях $\frac{\omega_1}{\omega_2}$ (например, ω_1 и ω_2 отличаются на порядок)

приближаются к синусоидальным.

Зная закон изменения прямой последовательности токов и напряжение генератора, можно заменить его реальную выпрямительную нагрузку некоторой эквивалентной фазной нагрузкой. Эта нагрузка будет симметричной по фазам, а ее величина и характер зависят от угла регулирования α : при $\alpha=90^\circ$ — бесконечно большая индуктивная, при $\alpha=0^\circ$ — конечная чисто активная. При этом высшими гармоническими тока, а также составляющими обратной и нулевой последовательности пренебрегаем. Допустимость такой идеализации оправдана тем, что только прямая последовательность фаз первой гармоники вращается синхронно с индуктором и, следовательно, оказывает определяющее влияние на поток машины. Величина сопротивления эквивалентной нагрузки каждой фазы генератора определяется выражением

$$Z_3(\omega_2 t) = \frac{R}{\sqrt{\sin \omega_2 t}},$$

R — эквивалентное фазное сопротивление неуправляемого выпрямителя.

Согласно [4] его величина связана с сопротивлением нагрузки выпрямителя как

$$R = \frac{r_H \cdot k_{IU}}{k_{II}};$$

где

$$k_{II} = \frac{I_{\phi 1}}{I_H}; \quad k_{IU} = \frac{U_{\phi 1}}{U_H};$$

$U_{\phi 1}$, $I_{\phi 1}$ — действующие значения первых гармоник фазных напряжений и токов генератора;

I_H , U_H — средние значения выпрямленного тока и напряжения.

Соотношение между активной и индуктивной составляющими нагрузки, эквивалентной управляемому выпрямителю, определяется как

$$r_3 = R;$$

$$x_3 = R \sqrt{\frac{1}{\gamma^2} \sec^2 \omega_2 t - 1}.$$

Соответственно поток якоря будет изменяться во времени как по своей величине, так и по положению в пространстве. При уменьшении α от 90° до 0° он будет поворачиваться в пространстве, одновременно увеличиваясь по амплитуде от чисто продольного, размагничивающего потока, до чисто поперечного.

Правомерно предположить, что его максимальное размагничивающее действие будет проявляться при некотором промежуточном значении угла управления α . В результате этого возникает модуляция суммарного магнитного потока машины частотой управления выпрямителем. Эта модуляция вызывает модуляцию той же частотой напряжения генератора. Степень модуляции, при условии постоянства э. д. с. холостого хода, будет зависеть от скорости вращения генератора, усиливаясь с увеличением последней, от величины нагрузки выпрямителя и от глубины регулирования γ .

Высокочастотный переходный процесс определяется наличием индуктивностей источника и коммутационным действием выпрямителя. В режиме нормальных нагрузок работа выпрямителя сопровождается периодическими двухфазными замыканиями через вентили. Прямая последовательность тока перекрытия находится как ток замыкания за дополнительным сопротивлением, равным сопротивлению обратной последовательности системы относительно перекрывающихся анодов. Реакция якоря за малый промежуток времени короткого замыкания практически не проявляется. Однако такая картина справедлива лишь для одиночного замыкания. При выпрямительной нагрузке замыкания происходят циклически и реакция якоря в конечном итоге начнет проявляться тем больше, чем больше угол коммутации γ .

Известно, что переходный процесс в системе синхронный генератор-выпрямитель приближенно описывается дифференциальным уравнением первого порядка [1, 3]. Следовательно, при дискретном уменьшении α , ток генератора будет экспоненциально нарастать, а угол коммутации γ увеличиваться.

При замыканиях в цепи генератора в статорной обмотке возникают токи, создающие поток реакции якоря Φ_{ad} . Под действием тока роторных цепей создается поток $\Delta\Phi_r$, состоящий из двух компонент, одна из которых обусловлена свободным током обмотки возбуждения, другая — является следствием свободных токов демпферных цепей. Если бы короткое замыкание продолжалось достаточно долго, то поток машины уменьшился бы до некоторого определенного значения, соответствующего установившемуся току короткого замыкания.

Однако через некоторый промежуток времени короткое замыкание прекращается, в результате чего поток реакции якоря уменьшается и результирующий поток окажется меньше своего вынужденного значения. В установившемся режиме для определенного соотношения коммутационного и внекоммутационного интервалов к моменту следующего перекрытия поток ротора возрастает до своего предыдущего значения.

При увеличении угла коммутации γ соотношение между длительностью коммутационного и внекоммутационного интервалов меняется и поток ротора к началу следующего перекрытия не сможет достичь своего первоначального значения. Длительность переходного процесса, вызванного изменением угла γ , будет определяться соответствующими сверхпереходными и переходными постоянными времени в зависимости от величины угла γ и параметров машины. Изменение угла коммутации влияет на величину выпрямленного тока и коэффициент мощности ϕ определяет высокочастотную составляющую переходного процесса.

В установившемся режиме для анализа высокочастотных переходных процессов системы можно воспользоваться методикой, предложенной М. Г. Шехтманом, И. А. Глебовым, А. Ф. Крогерисом и др., согласно которой основной магнитный поток машины мало зависит от коммутационного действия выпрямителя [1]. Допустимость такого упрощения возможна как для машин, имеющих демпферные обмотки на индукторе, так и для машин без демпферных обмоток [2]. Таким образом, в упрощенном методе анализа синхронный генератор представляется для выпрямителя как система, состоящая из симметричных неискаженных э. д. с. за индуктивным сопротивлением коммутации. Для машин с демпферными обмотками величина этого сопротивления равна

$$x_k = \frac{x_d'' + x_2}{2}. \quad (1)$$

Расчет системы синхронный генератор — управляемый выпрямитель с учетом как высокочастотной, так и низкочастотной составляющих переходного процесса, а также соизмеримости мощностей нагрузки и генератора можно произвести по методике, предлагаемой ниже.

Рассчитаем систему, состоящую из синхронного генератора, работающего на выпрямитель, управляемый по арккосинусоидальному закону. Выпрямитель нагружен на активно-индуктивную нагрузку, отношение частот ω_1/ω_2 велико.

В силу индуктивного характера нагрузки, кривая выходного тока выпрямителя имеет синусоидальную форму частоты ω_2 . Разобьем выходную синусоиду выпрямителя на N равных, достаточно малых интервалов длительностью Δt и будем считать, что ток выпрямителя не меняется на интервале дискретизации. Тогда на каждом интервале имеем установившийся режим работы синхронного генератора через выпрямитель на бесконечно большую индуктивность. Переход от одного интервала к другому осуществляется скачком за счет изменения угла управления α .

Воспользуемся для каждого отрезка времени Δt упрощенной методикой расчета.

Действующее значение расчетной неискаженной э. д. с. E наиболее просто определяется по векторной диаграмме напряжений, которая для явнополюсного маломощного синхронного генератора будет иметь вид, представленный на рис. 1.

Считаем, что параметры генератора и нагрузки известны: $x_d, x_q, x_d', x_d'', x_2, r, E_0, x_h, r_h$.

Расчетная схема с учетом сделанных допущений представлена на рис. 2. Фазные э. д. с. схемы описываются уравнениями

$$\begin{aligned} e_1 &= \sqrt{2} E \sin \omega_1 t; \\ e_2 &= \sqrt{2} E \sin (\omega_1 t + 120^\circ); \\ e_3 &= \sqrt{2} E \sin (\omega_1 t + 240^\circ), \end{aligned}$$

где E — действующее значение неискаженной э. д. с. на интервале дискретизации.

Переходный процесс тока в системе приближенно описывается уравнением

$$(L_h + L_\phi) \frac{dI_h}{dt} + \left(r_h + r + \frac{3x_\phi}{\pi} \right) I_h = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E \cos \alpha, \quad (2)$$

из которого для i -го интервала, зная значение I_h и E на предыдущем интервале, можно определить приращение тока ΔI_{hi} :

$$\Delta I_{hi} = \frac{\frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{i-1} \cos \alpha_i - \left(r_h + r + \frac{3x_\phi}{\pi} \right) I_{hi-1} \Delta t}{L_h + L_\phi}. \quad (3)$$

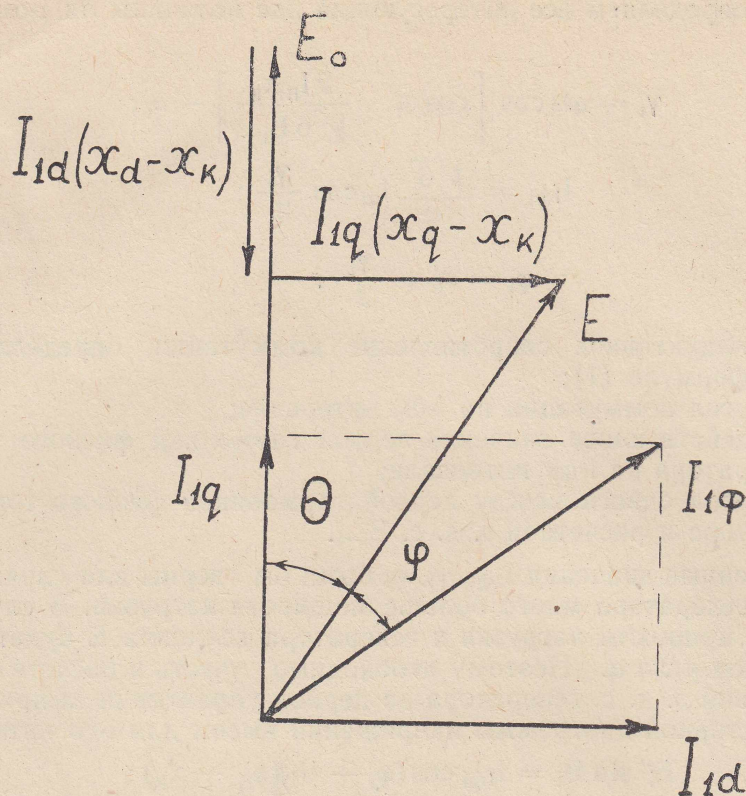


Рис. 1. Векторная диаграмма

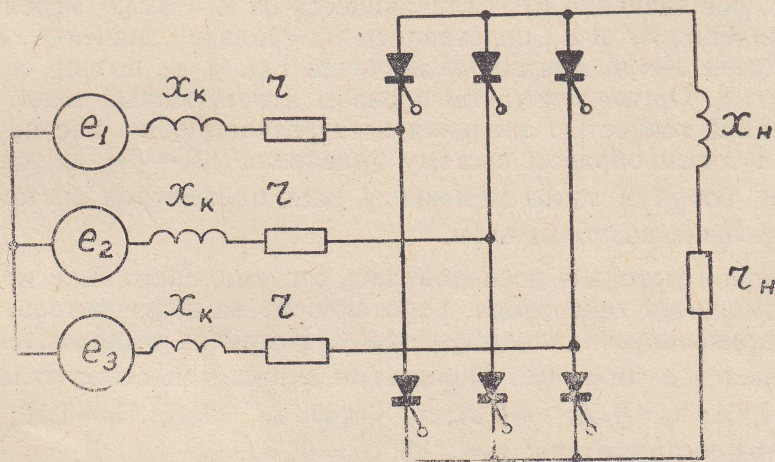


Рис. 2. Расчетная схема

В соответствии с приведенными выше рассуждениями, величина x_ϕ зависит от угла коммутации γ и в нашем случае ее следует брать как среднее значение между x_d'' и x_d . Однако определяющей индуктивностью в уравнении (3) является индуктивность нагрузки L_n . Как правило, величина L_n на один, два порядка выше значения фазной индуктивности генератора.

По найденному приращению ΔI_{ni} определяем полный ток на i -ом интервале:

$$I_{ni} = I_{ni-1} + \Delta I_{ni}. \quad (4)$$

Считая в первом приближении, что величина неискаженной э. д. с. не изменилась при изменении угла управления выпрямителем от значения

α_{i-1} до α_i , определяем все интересующие нас величины на i -ом интервале.

$$\gamma_i = \arccos \left[\cos \alpha_i - \frac{2 I_{\text{н}i} x_{\text{к}}}{\sqrt{6} E_{i-1}} \right] - \alpha_i; \quad (5)$$

$$I_{\text{ф}i} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{\text{н}i} \cos \frac{\gamma_i}{2}; \quad (6)$$

$$\varphi_i = \alpha_i + \frac{\gamma_i}{2}. \quad (7)$$

где $x_{\text{к}}$ — индуктивное сопротивление коммутации, определяемое по формуле (1);

γ_i — угол коммутации на i -ом интервале;

$I_{\text{ф}i}$ — действующее значение первой гармоники фазного тока генератора на i -ом интервале;

φ_i — угол сдвига между первой гармоникой фазного тока генератора и расчетной э. д. с. E_{i-1} .

Полученные значения $I_{\text{ф}i}$, γ_i , φ_i были бы верны для случая, когда мощность генератора много больше мощности нагрузки. В случае соизмеримости мощности нагрузки и генератора величина E будет меняться с изменением угла α . Поэтому необходимо учесть в расчете изменение неискаженной э. д. с. генератора за период управления выпрямителем.

Из векторной диаграммы напряжений имеем для i -го интервала:

$$E_i' \sin \Theta_i = I_{\text{ф}i} \cos (\varphi_i + \Theta_i) (x_{\text{д}} - x_{\text{к}}); \quad (8)$$

$$E_i' \cos \Theta_i = E_0 - I_{\text{ф}i} \sin (\varphi_i + \Theta_i) (x_{\text{д}} - x_{\text{к}}). \quad (9)$$

Решив систему уравнений (8), (9) относительно неизвестных Θ_i и E_i' , находим новое значение E_i' , отличающееся от $E_i = E_{i-1}$. Усредняя полученные значения E_i' и E_i , подставляем их среднее значение в уравнение (3). Далее вычисляем новые значения $I_{\text{ф}i}$, γ_i , φ_i , по ним снова находим E_i и т. д. Организуя таким образом итерационный цикл, вычисляем с заданной точностью значения всех интересующих нас параметров.

Решая таким образом систему уравнений (3)—(9) на каждом интервале Δt , получим закон изменения всех параметров системы за период управления выпрямителем.

По данной методике исследовалась система, состоящая из синхронного маломощного генератора, работающего на выпрямитель, управляемый по арксинусоидальному закону. Нагрузка выпрямителя активно-индуктивная с $\cos \varphi = 0,8$. Параметры машины в относительных единицах: $x_{\text{д}} = 1,1$; $x_{\text{к}} = 0,68$; $r = 0,04$; $x_{\text{д}}' = 0,33$; $x_{\text{д}}'' = 0,15$; $E_0 = 1,18$; параметры нагрузки выпрямителя: $r_{\text{н}} = 2,88$; $x_{\text{н}} = 0,202$.

Расчеты проводились на ЦВМ, результаты представлены на рис. 3 а, б, где кривая 1 построена для кратности $\omega_1/\omega_2 = 48$; 2 — для $\omega_1/\omega_2 = 32$; 3 — для $\omega_1/\omega_2 = 16$.

Результаты расчетов полностью согласуются с приведенным выше описанием физической картины переходных процессов в синхронном генераторе за период управления выпрямителем. Так, на рис. 3 а видна модуляция действующего значения расчетной э. д. с. E , а ее форма подтверждает наше предположение о том, что наибольшее размагничивающее действие потока якоря проявляется при некотором промежуточном значении угла управления выпрямителем. Глубина модуляции увеличивается с увеличением скорости вращения генератора.

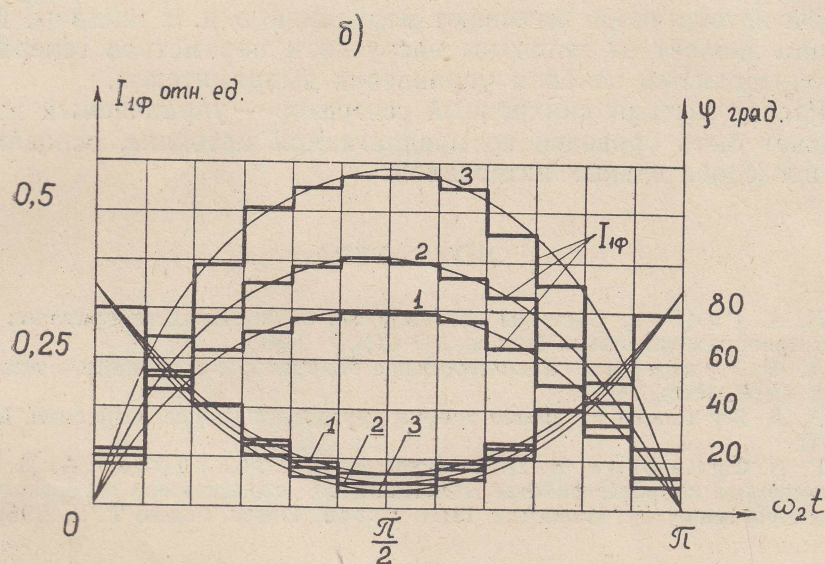
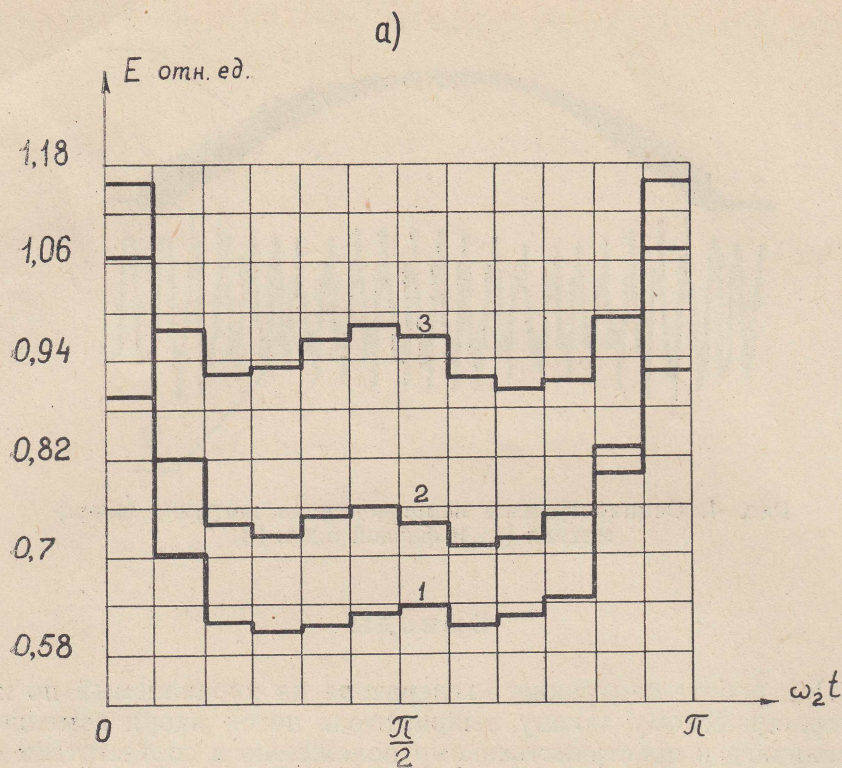


Рис. 3а, б. Расчетные кривые: а) действующего значения э.д.с. E ; б) действующего значения тока $I_{1\phi}$ и угла φ .
 1 — для кратности $\omega_1/\omega_2=48$; 2 — для $\omega_1/\omega_2=32$; 3 — для $\omega_1/\omega_2=16$

Экспериментальные исследования системы синхронный генератор — управляемый выпрямитель свидетельствуют о правильности теоретических положений и разработанной на их основе методике расчета. На рис. 4 показаны осциллограммы напряжения на нагрузке выпрямителя и фазной э. д. с. генератора. В качестве модельного генератора использовался высокочастотный индукторный генератор.

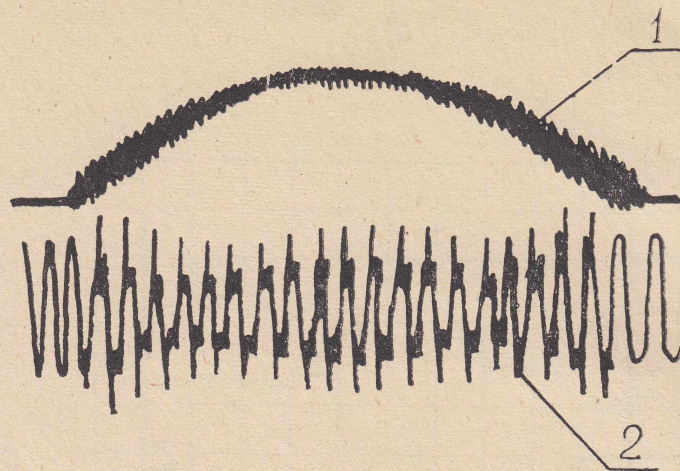


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на нагрузке выпрямителя (1) и фазной э.д.с. (2)

Выводы

1. При работе синхронного генератора на управляемый по какому-либо периодическому закону выпрямитель поток якоря изменяется по своей величине и пространственному положению в соответствии с законом управления выпрямителем.

2. В случае соизмеримости мощностей генератора и выпрямителя, изменения потока якоря вызывают модуляцию э. д. с. машины. Глубина модуляции зависит от величины нагрузки и параметров генератора, а форма определяется законом управления выпрямителем.

3. Расчет системы синхронный генератор — управляемый выпрямитель может быть проведен по предлагаемой методике, основанной на методе последовательных интервалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Глебов. Системы возбуждения синхронных генераторов с управляемыми преобразователями. Изд-во АН СССР, 1960.
2. А. Ф. Кростерис. Бесконтактные генераторы постоянного тока. Изд-во АН Латв. ССР, Рига, 1961.
3. А. А. Булгаков. Новая теория управляемых выпрямителей. М., «Наука», 1970.
4. Г. А. Сипайлов, В. А. Зорин, Т. В. Кузнецова, А. Б. Цукублин. Некоторые вопросы работы маломощного синхронного генератора на выпрямительную нагрузку. Известия ТПИ, т. 145, Томск, изд-во ТГУ, 1966.