

## АВТОНОМНЫЙ ИСТОЧНИК ИМПУЛЬСНОЙ МОЩНОСТИ С СИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос, Ю. А. Романов, Ф. П. Зверев

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Известным методом получения импульсов тока и напряжения с необходимыми параметрами является непосредственное генерирование их с помощью специальных электрических машин — синхронных ударных генераторов. Такой способ получения импульсной мощности является, как правило, наиболее экономически выгодным при больших передаваемых в нагрузку энергиях (от 10 Мдж и выше) [1].

Однако иногда оказывается эффективным применение синхронного ударного генератора и при незначительных передаваемых энергиях, порядка нескольких сотен дж, например, в автономных источниках импульсной мощности.

Основное достоинство схемы питания с ударным синхронным генератором — структурная простота, исключая целый ряд промежуточных передаточных элементов и, следовательно, обеспечивающая более высокую надежность, а в ряде случаев и меньший вес системы, в сравнении со схемами с накоплением энергии в конденсаторных батареях.

Переходные процессы, происходящие при включении ударного генератора на нагрузку, описываются системой дифференциальных уравнений равновесия эдс, записанных для каждой из обмоток [2].

Аналитические исследования полной системы дифференциальных уравнений вследствие наличия большого числа переменных коэффициентов представляют большую трудность и не дают решения в общем виде.

В данном случае целесообразным является использовать для исследований метод физического и математического моделирования с применением аналоговых вычислительных машин.

Для упрощения анализа рассмотрим работу ударного синхронного генератора на активную нагрузку (наиболее часто встречающийся случай характера нагрузки для автономных импульсных систем малой мощности).

Одной из задач исследования работы ударного генератора на активную нагрузку является определение согласованного сопротивления нагрузки, при котором в ней выделится максимальная энергия. На рис. 1 представлены результаты расчетов на аналоговой вычислительной машине МН-14 зависимости энергии в активной нагрузке от величины ее сопротивления при различных индуктивностях рассеяния



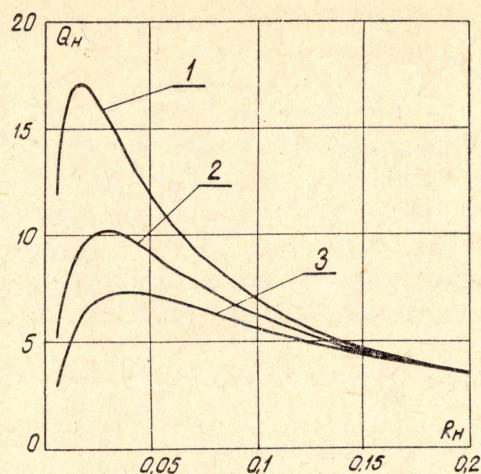


Рис. 1. Зависимость энергии в нагрузке от величины ее сопротивления при различных индуктивностях рассеяния статора

статорной обмотки. Остальные параметры генератора при этом оставались постоянными и были равны (в относительных единицах):

$$x_{ad} = 1; x_{\sigma r} = 0,01; R_r = 0; R_s = 0.$$

Кривые 1, 2, 3, приведенные на рис. 1, даны для сверхпереходных сопротивлений  $x''_d = 0,03; 0,05; 0,07$  соответственно. Как видно из кривых, максимальное значение энергии в нагрузке соответствует  $R_H$ , несколько меньшим  $x''_d$ . Из этого следует, что величина согласованного сопротивления нагрузки в случае ее активного и индуктивного характера различна. Причем отклонение сопротивления особенно сильно сказывается на величине передаваемой энергии при малых рассеяниях обмотки статора, т. е. для крупных машин.

Для упрощения анализа используем известную схему замещения ударного генератора в виде синусоидальной э. д. с. и последовательно включенных индуктивности  $L_r$  и активного сопротивления  $r_r$  [1]. Переходный процесс в цепи статора генератора при включении на активную нагрузку может быть описан в соответствии с принятой схемой замещения уравнением:

$$E_m \sin \omega t = L_r \frac{di_H}{dt} + i_H(R_H + r_r), \quad (1)$$

где

$E_m$  — амплитуда э. д. с. генератора,

$\omega$  — угловая частота,

$L_r, r_r$  — индуктивность и активное сопротивление генератора,

$R_H$  — активное сопротивление нагрузки.

Решение уравнения (1) имеет вид:

$$i_H = \frac{E_m}{\sqrt{(\omega L_r)^2 + (r_r + R_H)^2}} \left[ \sin(\omega t - \varphi) + \sin \varphi \cdot e^{-\frac{t(R_H + r_r)}{L_r}} \right], \quad (2)$$

где

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L_r}{r_r + R_H},$$

Исследование на максимум выражения для мощности в нагрузке  $i_H^2 R_H$  от величины  $R_H$ , при условии пренебрежения экспоненциальной состав-



ляющей тока, дает значение  $R_H$ , при котором в активной нагрузке выделится максимальная мощность:

$$R_H = \sqrt{r_r^2 + (\omega L_r)^2}. \quad (3)$$

Действительное значение сопротивления согласованной нагрузки будет несколько меньше. Однако для малых машин, имеющих, как правило,  $x''_d > 0,07$  и относительно большие значения активных сопротивлений обмоток, можно считать  $R_H \approx \sqrt{r_r^2 + (\omega L_r)^2}$ . Такой же вывод следует и из результатов исследований на аналоговой вычислительной машине.

Следовательно, при наиболее приемлемых параметрах схемы

$$\arctg \frac{\omega L_r}{r_r + R_H} \approx 45^\circ; \quad \frac{L_r}{R_H + r_r} \approx \frac{T}{2\pi}.$$

Здесь  $T$  — период эдс генератора. При таких значениях параметров схемы экспоненциальная составляющая тока затухает практически уже через полупериод питающего напряжения. Таким образом, ударное значение тока определяется амплитудой периодической составляющей, а длительность импульса тока равна  $\approx 0,6T$ .

Энергия, передаваемая в нагрузку за время импульса тока, равна:

$$Q_H = \int_0^{\frac{\pi + \varphi}{\omega}} i_H^2 R_H dt. \quad (4)$$

Для упрощения анализа соотношения (4) аппроксимируем выражение для тока (2) следующим образом:

$$i_H = \frac{E_m}{\sqrt{(\omega L_r)^2 + (R_H + r_r)^2}} \sin 0,835 \omega t. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4), получаем

$$Q_H = \frac{E_m^2 R_H}{(\omega L_r)^2 + (R_H + r_r)^2} \cdot \frac{0,6 \pi}{\omega}. \quad (6)$$

При внезапном коротком замыкании на зажимах электромагнитная энергия ударного генератора равна [3]:

$$Q_{эм} = \frac{2}{\omega} \frac{E_m^2}{\omega L_r} K_3 K_e, \quad (7)$$

где  $K_3$  — коэффициент затухания тока,

$K_e$  — коэффициент затухания эдс.

Определим часть энергии короткого замыкания на зажимах, которая переходит в нагрузку:

$$K_H = \frac{Q_H}{Q_{эм}} = \frac{R_H \omega L_r}{(\omega L_r)^2 + (R_H + r_r)^2} \cdot \frac{0,3 \pi}{K_3 K_e}. \quad (8)$$

Как показывает анализ выражения (8), возможные значения  $K_H$  лежат в пределах 0,5–0,75.

В случае индуктивной нагрузки значение  $K_H$  не превышает 0,25. Таким образом, при активной нагрузке использование генератора в 2–3 раза больше, чем при индуктивной.

Это объясняется тем, что при увеличении сопротивления нагрузки в случае ее активного характера рост полного комплексного сопротивления статорной цепи происходит медленнее, чем в случае индуктивной нагрузки.

При изменениях скорости вращения, как следует из выражения (6), величина передаваемой в нагрузку энергии изменяется незначи-



тельно. Если пренебречь  $r_r$ , то при согласованной нагрузке величина  $Q_n = \text{const}$ .

При учете сопротивления  $r_r$  происходит некоторое возрастание энергии в нагрузке с увеличением скорости вращения. Однако возрастание энергии с увеличением скорости вращения ограничивается некоторым пределом, соответствующим значению  $Q_n$ , рассчитанному по (6) при  $r_r = 0$ . Поэтому увеличение энергии в нагрузке с ростом скорости вращения является характерным лишь для малых машин, у которых  $r_r$  велико.

Для экспериментальной проверки приведенных выше соотношений был изготовлен синхронный генератор в корпусе ЭМУ-12ПМ.

Осциллограмма тока эдс при работе на активную нагрузку приведена на рис. 2. Как видно, ток в нагрузке имеет колоколообразную

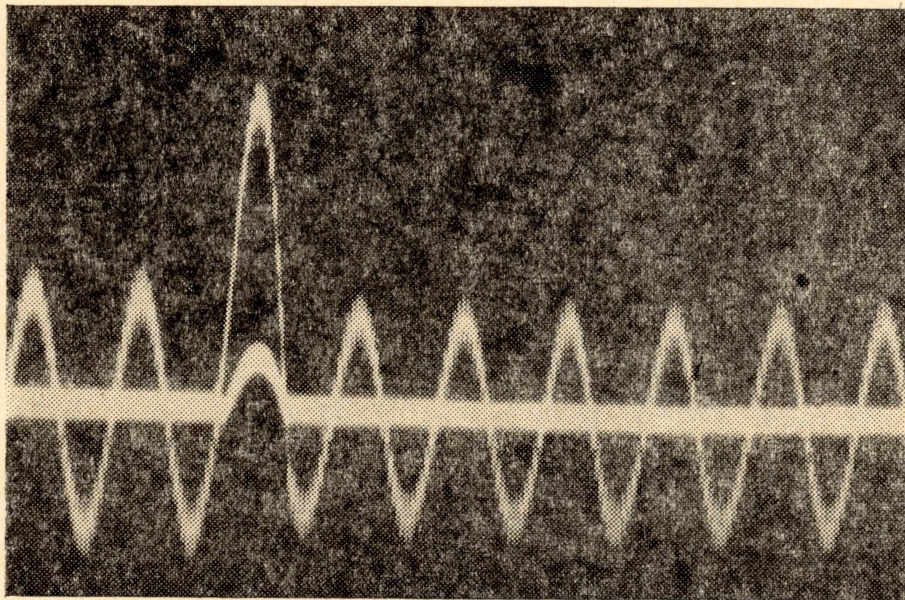


Рис. 2. Осциллограмма тока и эдс при работе на активную нагрузку

форму, а длительность импульса несколько больше полупериода э. д. с. генератора. Исследование зависимости мощности в нагрузке от величины сопротивления генератора показало, что максимум передаваемой мощности соответствует значению  $R_n = \sqrt{(\omega L_r)^2 + r_r^2} = 1,5 \text{ ом}$  при токе возбуждения генератора  $i_{вг} = 3 \text{ а}$ . Результаты этих исследований при различных токах возбуждения представлены на рис. 3. Смещение максимума мощности в сторону значений  $R_n$  при увеличении тока возбуждения объясняется насыщением магнитной цепи и происходящим при этом уменьшением  $L_r$ . Таким образом, результаты эксперимента находятся в соответствии с полученными выше закономерностями.

На рис. 4 представлена зависимость энергии в нагрузке от скорости вращения для согласованного сопротивления нагрузки и при постоянном возбуждении генератора. Увеличение скорости вращения вызывает увеличение энергии в активной нагрузке.

Экспериментальные исследования реакции якоря при активной и индуктивной нагрузке показали, что действие реакции якоря при активной нагрузке значительно меньше. Отношения амплитуды эдс гене-



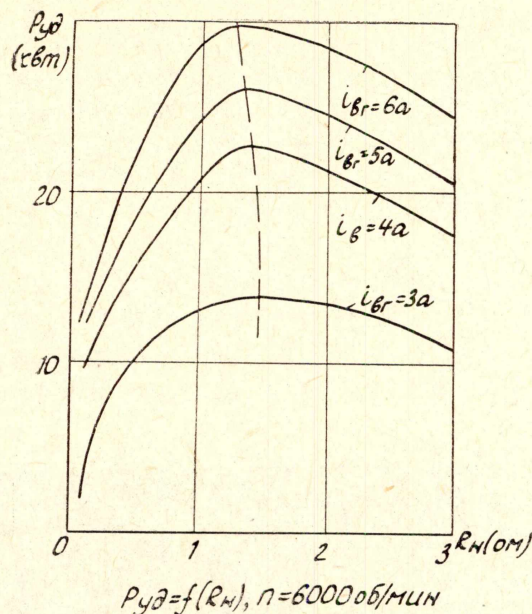


Рис. 3. Зависимость мощности в активной нагрузке от величины сопротивления при различных токах возбуждения

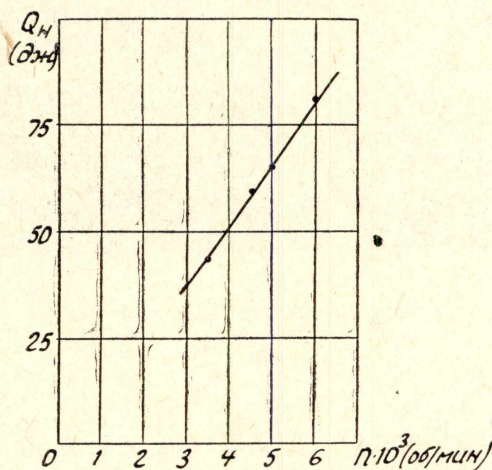


Рис. 4. Зависимость энергии в активной нагрузке от скорости вращения

ратора после импульса к амплитуде эдс холостого хода при согласованной активной и индуктивной нагрузках соответственно равны:

$$\frac{E_{mR}}{E_m} = 0,92; \quad \frac{E_{mL}}{E_m} = 0,74.$$

Нарастание эдс после импульса до значения эдс холостого хода происходит с суммарной постоянной времени контуров ротора. В малых машинах эта постоянная времени мала и, как видно из рис. 2, уже через 6÷10 периодов происходит восстановление эдс до максимального значения и, следовательно, представляется возможность вновь производить включение генератора на нагрузку. Возможность



работы генератора на активную нагрузку при таких малых периодах повторения импульсов определяет его главное достоинство — возможность концентрации во времени больших мощностей и энергий в нагрузке. При этом средняя мощность в нагрузке приближается к габаритной мощности генератора. Таким образом, для получения такой же средней мощности в схемах импульсного питания с накопительными конденсаторами необходимая мощность зарядного генератора с учетом к. п. д. схемы превышает габаритную мощность ударного генератора. Выполненные экспериментальные исследования подтвердили сделанные ранее теоретические выводы и показали, что ударный синхронный генератор малых габаритов является перспективным источником питания в автономных системах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Сипайлов, В. В. Ивашин, А. В. Лоос, К. А. Хорьков. Получение электромагнитных энергий при совместной работе ударного генератора и конденсаторной батареи. Электричество, № 8, 1967.
2. А. В. Лоос, Г. А. Сипайлов. Математическое моделирование электромагнитных процессов ударного генератора. Известия ТПИ, т. 152, 1966.
3. Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. Энергия и машинная постоянная ударного генератора. Известия ТПИ, т. 132, 1965.