

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРЯДНОГО УСТРОЙСТВА  
С ДРОССЕЛЯМИ НАСЫЩЕНИЯ**

Ф. П. ЗВЕРЕВ, А. Б. ЦУКУБЛИН, Г. А. СИПАЙЛОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

При разработке автономных систем часто возникает задача одновременного электроснабжения от одного генератора различных по характеру нагрузок, особое место среди которых занимают низкочастотные импульсные источники. Работая в циклическом режиме «заряд-разряд», эти источники создают помехи остальным потребителям, требующим стабильности напряжения.

Использование в импульсных источниках в качестве накопительного элемента емкости приводит к необходимости выбора такого зарядного устройства, которое обеспечивало бы отсутствие резких всплесков тока и провалов напряжения основного генератора в момент заряда. Подходя к решению данной проблемы с учетом того, что

- 1) основным источником энергии является трехфазный синхронный генератор,
- 2) мощность, потребляемая зарядным устройством, составляет лишь часть полной мощности генератора,
- 3) при заряде схема должна обеспечить отсутствие резких всплесков тока, а так же учитывая, что схема зарядного устройства должна быть максимально проста и надежна, из всего многообразия зарядных устройств в настоящей статье рассмотрена схема выпрямителя управляемого дросселями насыщения, включенными в разрыв нейтральной точки трансформатора (рис. 1). Кроме того, в управляемом режиме такая схема обеспечивает постоянство тока генератора независимо от величины нагрузки, что отвечает требованиям, перечисленным выше.

Примем для простоты анализа, что напряжение на первичной обмотке трансформатора (рис. 1) поддерживается постоянным по амплитуде, что соответствует работе его от генератора с регулятором напряжения, а характеристика намагничивания дросселей насыщения аппроксимируется двумя прямыми, т. е. индуктивное сопротивление ненасыщенного дросселя бесконечно большое ( $z_{др} \approx \infty$ ), а насыщенного представляется конечной величиной ( $z_{др} = jx_{др} + r_{др}$ ). С учетом последнего допущения дроссель может проводить ток только текущий согласно с током подмагничивания.

Из теории работы выпрямителей, управляемых дросселями насыщения [1], известно, что регулирующее действие дросселей наблюдается лишь при токах нагрузки, равных току подмагничивания ( $I_d = I_n$ ), а при  $I_d < I_n$  выпрямитель работает как мостовой неуправляемый.

Здесь можно различить два режима подмагничивания дросселей: принудительное, когда в цепь подмагничивания включено большое ин-

дуктивное сопротивление, и свободное, когда сопротивление источника подмагничивания близко к нулю. Независимо от типа нагрузки на выходе выпрямителя в такой системе выпрямленный ток в управляемом

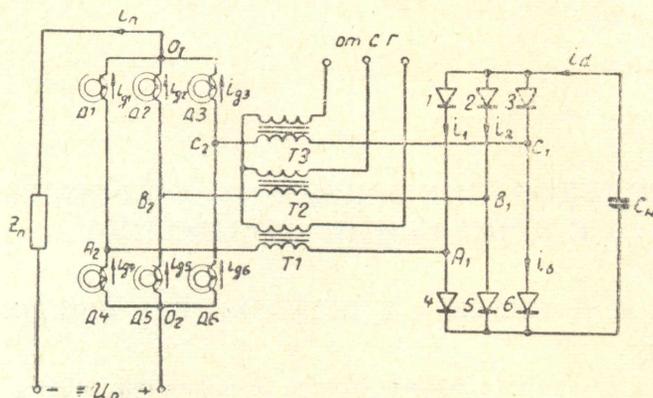


Рис. 1. Схема зарядного устройства

режиме ( $I_d = I_n$ ) полностью соответствует току подмагничивания не только по величине, но и по форме. Поэтому наибольший интерес для зарядного устройства представляет принудительное подмагничивание, обеспечивающее при заряде конденсатора практически сглаженный выпрямленный ток.

Рассматривая возможные режимы работы зарядного устройства, необходимо отметить, что за исключением точки короткого замыкания в схеме наблюдаются чередующиеся двух- и трехвентильные режимы работы выпрямителя. При принудительном подмагничивании в двухвентильном режиме в схеме оказываются насыщенными только два дросселя, соответствующие проводящим вентилям (рис. 1), и поэтому

$$i_1 = i_6, \quad i_{1g} = i_{6g} = i_n, \quad \text{т. е. в в этом режиме}$$

$$i_1 = i_6 = i_{1g} = i_{6g} = i_d = i_n(t).$$

В трехвентильном режиме наблюдается аналогичная картина

$$i_1 + i_2 = i_6 = i_d; \quad i_{1g} + i_{2g} = i_n(t); \quad i_d(t) = i_n(t)$$

$$\text{и если } i_n(t) = I_n = \text{const}, \quad \text{то и } i_d(t) = I_d = \text{const}.$$

т. е. идеально сглажен. С учетом вышеизложенного схема с дросселями насыщения (рис. 1) может быть представлена некоторой эквивалентной с неизменными анодными параметрами и полностью управляемыми вентилями, угол открытия которых ( $\alpha$ ) является переменной функцией и зависит от величины напряжения на накопительном конденсаторе. Поскольку время накопления энергии значительно ( $10^2$ — $10^3$  раз) превышает период изменения напряжения источника, расчет схемы можно вести по дискретным точкам, считая, что за период э. д. с. напряжение на конденсаторе остается постоянным, т. е. реальную кривую заряда заменить ступенчатой. Такой прием позволяет производить расчет в конкретный момент времени как при работе схемы на противоз. д. с. и при идеально сглаженном выпрямленном токе.

Пользуясь методом эквивалентного генератора [2], напряжение на емкости в момент времени  $t_1$  определим

$$u_c(t_1) = \frac{3}{4} \sqrt{3} E_m \cos \alpha(t_1) - \frac{3}{\pi} i_d x_\phi - 2i_d R_\phi, \quad (1)$$

где  $E_m$  — амплитудное значение фазной э. д. с. на вторичной обмотке трансформатора;  $x_\phi = x_\tau + x_d$  — сумма индуктивных сопротивлений приведенного трансформатора и насыщенного дросселя;  $r_\phi = r_\tau + r_d$  — сумма активных сопротивлений приведенного трансформатора и дросселя насыщения.

Следует отметить, что при включении дросселей насыщения в первичную цепь параметры трансформатора должны быть приведены к первичной обмотке.

Учитывая, что при принудительном подмагничивании в управляемом режиме ток зарядки стабилен  $i_d = I_d = I_n$ , определим угол открытия вентиляей

$$\alpha = \arccos \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{I_n x_\phi}{E_m} \left( \frac{t}{C_n x_\phi} + \frac{3}{\pi} + 2 \frac{r_\phi}{x_\phi} \right). \quad (2)$$

Таким образом, по мере заряда конденсатора  $C_n$  угол  $\alpha$  меняется по закону косинуса от  $90^\circ$  до  $0^\circ$  (последнее наблюдается при переходе в неуправляемый режим).

При заданном токе подмагничивания время управляемого заряда может быть определено из выражения

$$T_{II} = t_{\max} = C_n x_\phi \left( \frac{3\sqrt{3}}{4} \frac{E_m}{I_n x_\phi} - 2 \frac{r_\phi}{x_\phi} - \frac{3}{\pi} \right) \quad (3)$$

и является временем цикла зарядки накопителя.

Рассматривая трехвентильный режим схемы, можно отметить, что при стабильном токе зарядки контур коммутации сохраняет свои параметры неизменными во все время управляемого заряда. Это позволяет сделать вывод о том, что в зоне регулирования угол коммутации вентиляей остается постоянным и не зависит от величины напряжения на конденсаторе. С учетом идеальной сглаженности тока угол коммутации может быть определен выражением

$$\gamma \approx \arccos \left( 1 - \frac{2I_n x_\phi}{\sqrt{3}E_m} \right). \quad (4)$$

Наличие угла регулирования ( $\alpha$ ) и угла коммутации ( $\gamma$ ) обуславливается временной сдвиг фазного тока трансформатора относительно напряжения и определяют коэффициент мощности зарядного устройства

$$\cos \varphi_1 \approx \cos \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right). \quad (5)$$

Анализ этого выражения с учетом (2) и (4) показывает, что по мере накопления энергии в конденсаторе коэффициент мощности меняется в широких пределах практически по линейному закону. Однако наиболее характерным для оценки зарядного устройства в целом является среднециклическое значение коэффициента мощности. С учетом постоянства угла коммутации и времени цикла зарядки среднециклическое значение  $\cos \varphi_{1cp}$  определится

$$\cos \varphi_{1cp} = \frac{1}{T_{II}} \int_0^{T_{II}} \cos \varphi_1(t) dt = 0.5 [1 + b] \frac{\cos \left( \frac{\gamma}{2} + \xi \right)}{\cos \xi}, \quad (6)$$

где

$$\operatorname{tg} \xi = \frac{1}{1-b^2} \left( \frac{\pi}{2} - b \sqrt{1-b^2} - \arcsin b \right), \quad b = \frac{4I_n x_\phi}{3\sqrt{3}E_m} \left( \frac{3}{\pi} + 2 \frac{r_\phi}{x_\phi} \right).$$

Проведенные расчеты для реальных схем зарядных устройств в соответствии с выражением (6) показывают, что среднециклический ко-

эффицент мощности не превышает значений  $\cos\varphi_{\text{ср}} \approx 0,5$ , что является серьезным недостатком устройств подобного типа.

Вторым энергетическим фактором, определяющим зарядное устройство, является к. п. д. Рассматривая к. п. д. как отношение энергий накапливаемой к затрачиваемой, можно определить, что мгновенное значение к. п. д. зависит от параметров схемы и времени зарядки

$$\eta = \frac{W_c}{W_c + W_R} = \frac{1}{1 + 6 \frac{p_{\phi} C_n}{t} \kappa_i^2}, \quad (7)$$

где  $\kappa_i = \frac{I_{\text{фэф}}}{I_d} = \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{\gamma}{3\pi}}$  — коэффициент трехфазной мостовой схемы по току [3].

Таким образом, по мере накопления энергии в конденсаторе к. п. д. увеличивается, достигая в конце зарядки величин, близких к единице. Среднециклическое значение к. п. д., определяемое аналогично коэффициенту мощности, может быть определено выражением

$$\eta = 1 - \frac{6C_n p_{\phi} \kappa_i^2}{T_{\text{ц}}} \ln \left( 1 - \frac{T_{\text{ц}}}{6C_n p_{\phi} \kappa_i^2} \right). \quad (8)$$

Анализ этого выражения позволяет сделать вывод о том, что в маломощных системах ( $W_c \approx 10^3$  дж) при напряжении на конденсаторе

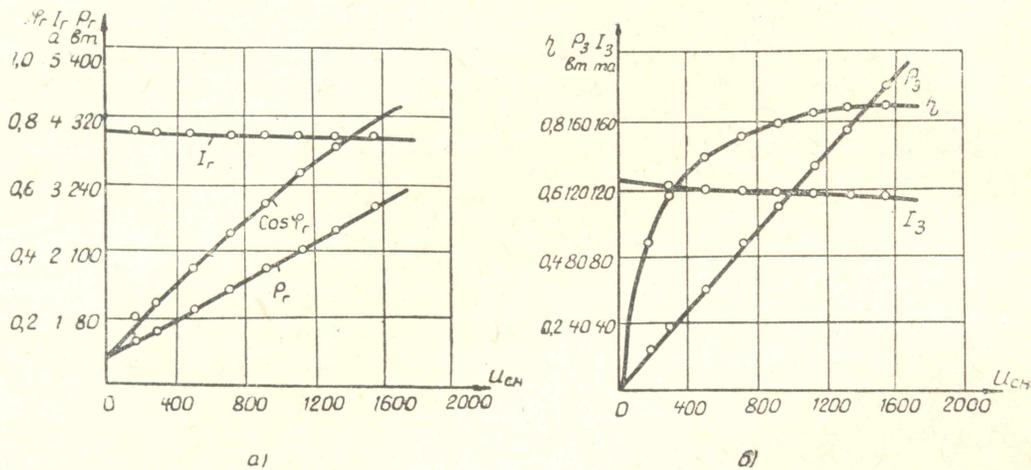


Рис. 2. Энергетические характеристики зарядного устройства со стороны а) генератора, б) зарядной цепи

порядка  $U_c \approx (1,5-2) \cdot 10^3$  (в) значения среднециклического к. п. д. достигают 0,7—0,75, что существенно выше, чем в системах с токоограничивающими сопротивлениями ( $\eta_{\text{max}} \leq 0,5$ ).

Экспериментальные исследования зарядного устройства, выполненного по схеме рис. 1, подтвердили правильность сделанных выше допущений и показали, что зарядные устройства с дросселями насыщения являются достаточно эффективными при создании низкочастотных импульсных источников. На рис. 2 приведены энергетические характеристики зарядного устройства с генераторной стороны (рис. 2, а) и со стороны накопительной емкости (рис. 2, б). Как видно из рисунков, ток заряда и ток генератора достаточно стабильны, что, с одной стороны, соответствует практически линейному нарастанию напряжения на емкости, а с другой — обеспечивает равномерную токовую загрузку генератора. Среднециклические значения к. п. д. и коэффициента мощности

соответственно составили здесь:  $\cos\varphi_{\text{ср}} = 0,47$ ;  $\eta_{\text{р}} = 0,72$ . Неизменность формы фазного тока трансформатора в зоне регулирования подтверждается стабильностью амплитуды основных гармонических составляющих (рис. 3) и свидетельствует о постоянстве угла коммутации ( $\gamma$ ) во все время управляемого заряда.

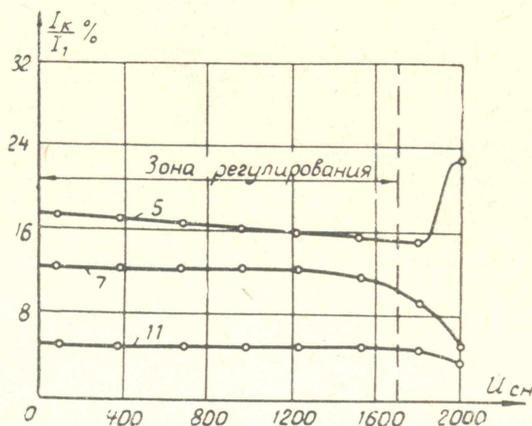


Рис. 3. Зависимость относительных значений амплитуд высших гармоник фазного тока от величины напряжения на емкости

Таким образом, проведенные аналитические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Схема с дросселями насыщения, включенными в разрыв нейтральной точки трансформатора, обеспечивает стабильность зарядного тока, который при принудительном подмагничивании может быть идеально сглажен.

2. Схема обеспечивает достаточно высокое значение среднециклического к. п. д. ( $\eta_{\text{ср}} = 0,7-0,75$ ), однако значения коэффициента мощности при этом не превышают 0,5.

3. Схема обеспечивает отсутствие резких всплесков тока в момент зарядки и равномерную токовую загрузку основного источника

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Г. Толстов, Г. П. Мосткова, Ф. И. Ковалев. Трехфазные силовые полупроводниковые выпрямители. Изд. АН СССР, 1963.

2. А. В. Поссе. Обоснование замены выпрямителя эквивалентным генератором для расчета переходных процессов. Изд-во АН СССР, «Энергетика и транспорт», 1965, № 4.

3. В. А. Зорин и др. Некоторые вопросы работы маломощного синхронного генератора на выпрямительную нагрузку. «Известия ТПИ», т. 145, 1966.