

## О ВЫБОРЕ СХЕМЫ ВЫПРЯМЛЕНИЯ В БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ГЕНЕРАТОРАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Г. А. СИПАЙЛОВ, А. Б. ЦУКУБЛИН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Вопрос о выборе схемы выпрямления появляется всякий раз при проектировании бесколлекторных генераторов постоянного тока типа синхронный генератор-выпрямитель. Особую актуальность приобретает этот вопрос при проектировании возбuditелей, являющихся первым каскадом бесколлекторных ЭМУ постоянного и переменного тока [1, 2]. Однако до сих пор в технической литературе нет конкретных рекомендаций по этому вопросу.

В настоящей статье дается анализ выбора схемы выпрямления для маломощного бесколлекторного генератора постоянного тока типа синхронный генератор-выпрямитель. Характерной особенностью этих установок является то, что они должны обеспечивать максимальное использование генератора во всем диапазоне изменения нагрузок. При этом необходимо учитывать простоту и надежность установки, а также минимальный вес и габариты. С этой точки зрения из всего многообразия выпрямительных схем можно выделить лишь мостовые схемы выпрямления и однополупериодные при соединении генератора звездой. Что же касается других схем выпрямления (схемы с уравнивающим реактором, каскадные схемы и т. д.), то ввиду конструктивной громоздкости они не рассматриваются.

Важное преимущество двухполупериодных схем выпрямления перед однополупериодными заключается в том, что при питании от трансформатора они дают для одинаковых нагрузок больший коэффициент использования и меньший коэффициент пульсаций. При питании от синхронного генератора картина работы выпрямителей изменяется, что связано с наличием у синхронного генератора реакции якоря. Поэтому выбор схемы выпрямления необходимо проводить с учетом реакции якоря синхронного генератора, а также величины нагрузки.

При анализе сделаны следующие допущения:

1. Вентили принимаются идеальными, т. е. не учитывается прямое сопротивление вентиля, а обратное равно бесконечности. Необходимо отметить, что это допущение не является совершенно произвольным, если учесть, что машины малой мощности имеют относительно высокие значения активного сопротивления якорной обмотки.

2. Генератор дает синусоидальное напряжение и под нагрузкой, т. е. высшие гармонические реакции якоря, вызванные несинусоидальностью якорного тока, полностью уничтожаются демпферными контурами ротора.

Как известно [1, 2], работа маломощного синхронного генератора

на выпрямительный блок характеризуется высоким  $\cos \varphi$  генератора, значения которого лежат в пределах  $\cos \varphi = 1 \div 0,96$ . Поэтому с достаточной степенью точности можно считать, что вентильная нагрузка является активной для генератора.

Векторная диаграмма для этого случая изображена на рис. 1. В соответствии с векторной диаграммой фазное напряжение, при постоянном токе возбуждения выразится

$$U_1 = \sqrt{\frac{E_0^2 - 2I_1^2 x_{0d} x_{0q}}{2}} + E_0 \sqrt{\frac{E_0^2}{4} - I_1^2 x_{aq} (x_{ad} - x_{aq})} - I_1 r. \quad (1)$$

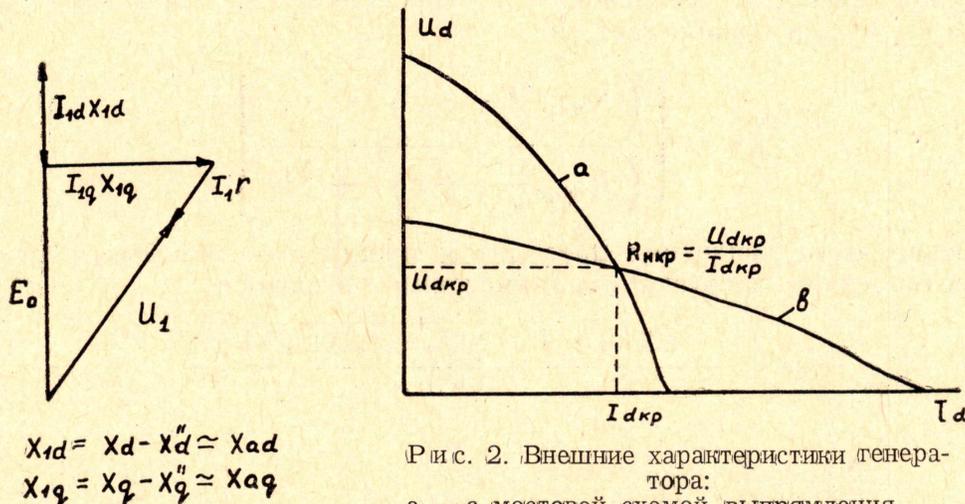


Рис. 1. Векторная диаграмма генератора.

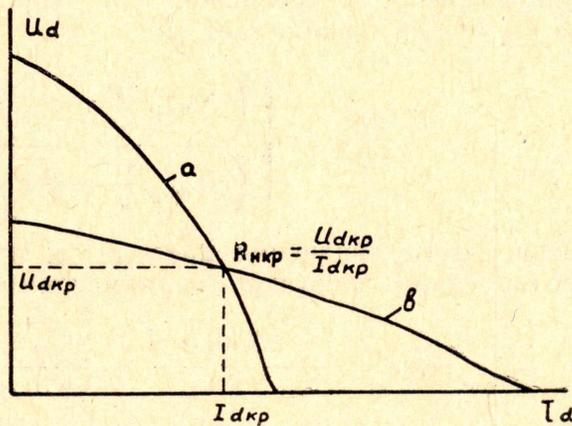


Рис. 2. Внешние характеристики генератора:  
а — с мостовой схемой выпрямления,  
б — с однополупериодной схемой выпрямления.

Выражая выпрямленные напряжения и ток через известные [3] коэффициенты связи  $\frac{U_1}{U_d} = k_{1u}$  и  $\frac{I_1}{I_d} = k_{1i}$  и подставляя их в (1), получим

уравнение внешней характеристики генератора, работающего на выпрямитель:

$$U_d = \frac{1}{k_{1u}} \sqrt{\frac{E_0^2 - 2I_d^2 x_{ad} x_{aq} k_{1i}^2}{2}} + E_0 \sqrt{\frac{E_0^2}{4} - I_d^2 x_{aq} (x_{ad} - x_{aq}) k_{1i}^2} - I_d r \cdot k_{1i} \quad (2)$$

Считая, что сопротивления генератора остаются постоянными при смене схемы выпрямления, получим, что наклон характеристики в основном зависит от коэффициентов  $k_{1u}$  и  $k_{1i}$ .

На рис. 2 даны внешние характеристики генератора для однополупериодной и двухполупериодной схемы выпрямления, полученные согласно уравнению (2) для трехфазного генератора. Как видно из кривых, в какой-то точке (назовем ее критической) происходит пересечение характеристик, т. е. до этой точки генератор дает большую мощность при работе на мостовую схему выпрямления. Однако при нагрузке, превышающей значение критической, вследствие реакции якоря генератора мостовая схема выпрямления дает значения мощности генератора значительно ниже, чем однополупериодная.

Значение нагрузки в критической точке и связь ее с параметрами машины может быть получена путем совместного решения уравнений

(2) для однополупериодной и мостовой схем выпрямления. Обозначая  $k_{1U}''$ ,  $k_{1i}''$  — значения коэффициентов для мостовой схемы, а  $k_{1U}'$ ,  $k_{1i}'$  — для однополупериодной, получим

$$\left[ \left( R_{\text{нкр}} \frac{k_{1U}'}{k_{1i}'} + r \right)^2 + x_{\text{ақ}}^2 \right] \frac{1}{2} = \frac{K_{1i}'}{K_{1i}''} \cdot \frac{\left( R_{\text{нкр}} \frac{k_{1U}'}{k_{1i}''} + r \right)^2 + x_{\text{ад}} x_{\text{ақ}}}{\left( R_{\text{нкр}} \frac{K_{1U}''}{K_{1i}''} + r \right)^2 + x_{\text{ад}} x_{\text{ақ}}} \quad (3)$$

Решение этого уравнения относительно  $R_{\text{нкр}}$  дает связь критической нагрузки с параметрами генератора. Для машин с равномерным воздушным зазором уравнение (3) упрощается за счет  $x_{\text{ад}} = x_{\text{ақ}}$  и  $x_{1d} = x_{1q} = x_d$  и приобретает вид

$$\frac{k_{1i}'}{k_{1i}''} = \left[ \frac{\left( R_{\text{нкр}} \frac{k_{1U}''}{k_{1i}''} + r \right)^2 + x_d^2}{\left( R_{\text{нкр}} \frac{k_{1U}'}{k_{1i}'} + r \right)^2 + x_d^2} \right] \frac{1}{2} \quad (4)$$

Решение этого уравнения приводит к простым соотношениям между сопротивлением нагрузки и параметрами генератора

$$R_{\text{нкр}} = \frac{-r \Delta k_p + \sqrt{r^2 \Delta k_p^2 - z_r \Delta k_{1i} \Delta k_{1U}}}{\Delta K_{1U}} \quad (5)$$

где

$$\Delta k_p = k_{1U}' k_{1i}' - k_{1U}'' \cdot k_{1i}'',$$

$$\Delta k_{1U} = (k_{1U}')^2 - (k_{1U}'')^2,$$

$$\Delta k_{1i} = (k_{1i}')^2 - (k_{1i}'')^2,$$

$$z_r^2 = x_d^2 + r^2.$$

Учитывая, что в синхронных генераторах малой мощности  $z_r \gg r$ , упрощаем выражения (5) до вида:

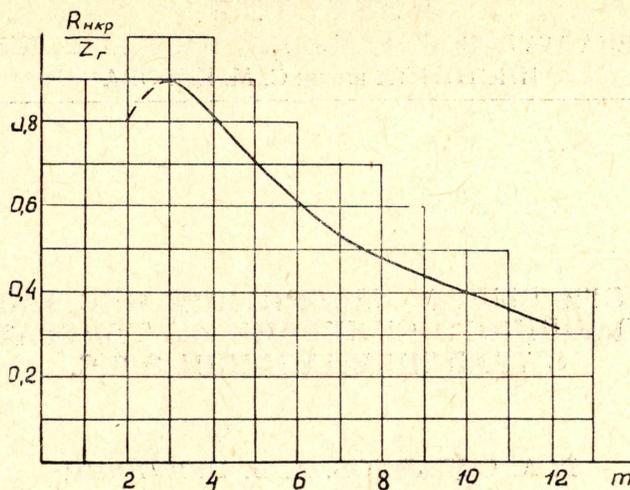
$$R_{\text{нкр}} \cong z_r \cdot \sqrt{\frac{(k_{1i}'')^2 - (k_{1i}')^2}{(k_{1U}')^2 - (k_{1U}'')^2}} \quad (6)$$

Таким образом, при сопротивлении нагрузки выше  $R_{\text{нкр}}$  во всех случаях наиболее выгодной является мостовая схема выпрямления. При больших нагрузках необходимо выбирать однополупериодную схему выпрямления, которая обеспечивает в этой области наибольшее использование генератора.

Поскольку коэффициенты  $k_{1U}$  и  $k_{1i}$  являются сложными функциями нагрузки, числа фаз и т. д., то предварительный выбор схемы выпрямления можно производить, исходя из рассмотрения идеализированного выпрямителя. С учетом этого критическое сопротивление нагрузки

$$R_{\text{нкр}} = z_r \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sin^2 \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}} \quad (7)$$

Как видно из (7), критическое сопротивление нагрузки зависит от числа фаз генератора. Рис. 3, иллюстрирующий эту зависимость, наглядно показывает, что с увеличением числа фаз границы применения мостовых схем расширяются, а при достаточно большом числе фаз схемы



Р и с. 3. Зависимость  $\frac{R_{нкp}}{Z_r}$  от числа фаз.

являются практически идентичными. Поэтому при проектировании бесколлекторных генераторов постоянного тока, а также различного рода бесколлекторных возбудителей вопрос о применении той или иной выпрямительной схемы должен решаться одновременно с вопросом о выборе числа фаз, параметров генератора, а также необходимого уровня пульсаций выпрямленного напряжения или тока.

С этой точки зрения можно рекомендовать для возбудителей многофазные системы с однополупериодной схемой выпрямления, а для генераторов, работающих на высокоомную нагрузку, мостовые выпрямительные схемы при относительно небольшом числе фаз.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Скороспешкин, Э. Ф. Оберган, Э. Н. Подборский. Бесколлекторный электромашинный усилитель (БЭМУ). Известия ТПИ, том 145, 1966.
2. А. Ф. Крogerис. Режимы источников питания трехфазных мостовых выпрямительных схем. Диссертация, Рига, 1954.
3. Г. А. Сипайлов, В. А. Зорин, Т. В. Кузнецова, А. Б. Цукублин. Некоторые вопросы работы маломощного синхронного генератора на выпрямительную нагрузку. Известия ТПИ, том 145, 1966.