

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЕНТИЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО ГЕНЕРАТОРА

А. В. ЛООС, Ю. И. РЯВЧИКОВ, Г. А. СИПАЙЛОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Для генерирования мощных импульсов энергии миллисекундной длительности в ряде систем используют синхронный генератор, работающий в режиме внезапного включения через неуправляемый полупроводниковый выпрямитель на активную нагрузку (рис. 1, а). Вентильные импульсные генераторы нашли широкое применение в импульсной сварке, электроэрозионной обработке металлов и для питания многих других импульсных потребителей. Они имеют большие возможности в отношении регулировки параметров импульсов и частоты их следования, хорошие габаритно-весовые показатели.

Однако в настоящее время не изучен целый ряд теоретических вопросов, затрудняющих проектирование и применение вентильных импульсных генераторов. К таким вопросам относятся: определение согласованного сопротивления нагрузки и влияние его величины на энергетические показатели системы, влияние степени явнополюсности, угла включения на нагрузку, отсутствие расчетных соотношений для тока, мощности в нагрузке и многие другие.

Анализ этих вопросов при учете полного комплекса факторов приводит к необходимости решения полной системы дифференциальных уравнений, составленных для синхронного генератора, выпрямителя и нагрузки. Приведем некоторые результаты исследований вентильного импульсного генератора, выполненных на АВМ МН14 [1].

При внезапном коротком замыкании на зажимах вентильного импульсного генератора вслед за большим всплеском тока следуют значительные колебания. При коротком замыкании напряжение на зажимах выпрямителя равно нулю, и при идеальных вентилях падения напряжения на любом из них также равны нулю. Фазные напряжения  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  связаны с падениями напряжения на вентилях соотношениями:

$$\begin{aligned}U_a &= \frac{1}{3} (2U_1 - U_3 - U_5), \\U_b &= \frac{1}{3} (2U_3 - U_1 - U_5), \\U_c &= \frac{1}{3} (2U_5 - U_1 - U_3).\end{aligned}\quad (1)$$

Следовательно, при  $R_n=0$ , фазные напряжения  $U_a=U_b=U_c=0$ , т. е. синхронный генератор работает в режиме симметричного короткого

замыкания, переходный процесс в нем может быть рассчитан по известным соотношениям [2].

Учитывая невозможность одновременной работы двух вентилях одной фазы получаем, что токи в открытых вентилях равны фазным токам генератора. Наличие в фазных токах апериодических составляющих нарушает угол между ними, что и вызывает пульсации тока на выходе генератора. Продолжительность этих колебаний зависит от величины постоянной времени якорной цепи. Длительность переходного процесса зависит от величины постоянных времени  $T_a$ ,  $T''_d$ ,  $T'_d$ . Пиковое значение тока может превышать номинальный ток генератора, в зависимости от параметров, в 5—20 раз. После первого всплеска ток нагрузки вначале уменьшается сравнительно быстро, причем скорость затухания зависит в основном от величины постоянных времени  $T''_d$  и  $T_a$ , затем он медленно уменьшается до установившегося значения с постоянной времени  $T'_d$ .

Сопротивление нагрузки уменьшает всплеск тока  $i_H$  и сглаживает его колебания, причем чем больше  $R_H$  по сравнению со сверхпереходным сопротивлением  $x''_d$ , тем значительно уменьшаются колебания тока. Определение согласованного сопротивления нагрузки производилось построением зависимости  $i^2_H R_H = f(R_H)$  для различных значений сверхпереходного сопротивления генератора.

Максимальная ударная мощность соответствует сопротивлению нагрузки  $R_H = 1,5 x''_d$ , однако максимальная величина энергии, передаваемой в нагрузку, в зависимости от требуемой длительности импульса обеспечивается при сопротивлениях  $R_H = (1,5 \div 2) x''_d$ . Это объясняется тем, что с течением времени происходит затухание сверхпереходных процессов, внутреннее сопротивление генератора увеличивается и, следовательно, условие согласования генератора и нагрузки изменяется. При увеличении длительности импульса сопротивление  $R_H$  должно выбираться из условия получения максимальной энергии в нагрузке и, следовательно, будет сдвигаться в сторону больших значений. Если сопротивление нагрузки находится в пределах  $(1,5 \div 2) x''_d$ , то трехфазная двухполупериодная схема выпрямления работает в режиме горения вентилях группами по три. При дальнейшем увеличении  $R_H$  в схеме чередуются двух- трехвентильные режимы.

Анализируя осциллограммы переходных процессов вентилях импульсного генератора (рис. 2), нетрудно установить, что вследствие нелинейности вольтамперных характеристик вентилях синхронный генератор испытывает несимметричную нагрузку по фазам. Действительно, в результате коммутации вентилях все время происходит перераспределение нагрузки по фазам с периодичностью в 180 эл. градусов. По этой причине периодические составляющие фазных токов сдвинуты относительно друг друга на 120 эл. градусов и, если не учитывать затухание, имеют одинаковую форму и амплитуду, т. е. имеются признаки, характерные для симметричного режима работы синхронного генератора. Это обстоятельство наводит на мысль о возможности замены выпрямителя с нагрузкой на стороне выпрямленного тока такой симметричной нагрузкой, при которой переходные процессы в синхронном генераторе будут близки друг к другу.

Решения на аналоговой модели показали, что значение эквивалентной нагрузки зависит как от величины  $R_H$ , так и от режимов работы выпрямителя, причем для случая работы вентилях выпрямителя группами по три она оказалась равной  $\frac{2}{3} R_H$ , а при чередующихся двух- трехвентильных режимах несколько меньшей.

К этому же результату можно прийти и аналитически. Сравнивая схемы, изображенные на рис. 1, а, 1, б, отметим, что они будут строго

эквивалентны друг другу лишь в том случае, если зависимость фазных напряжений от фазных токов в обеих схемах выражается одним и тем же соотношением.

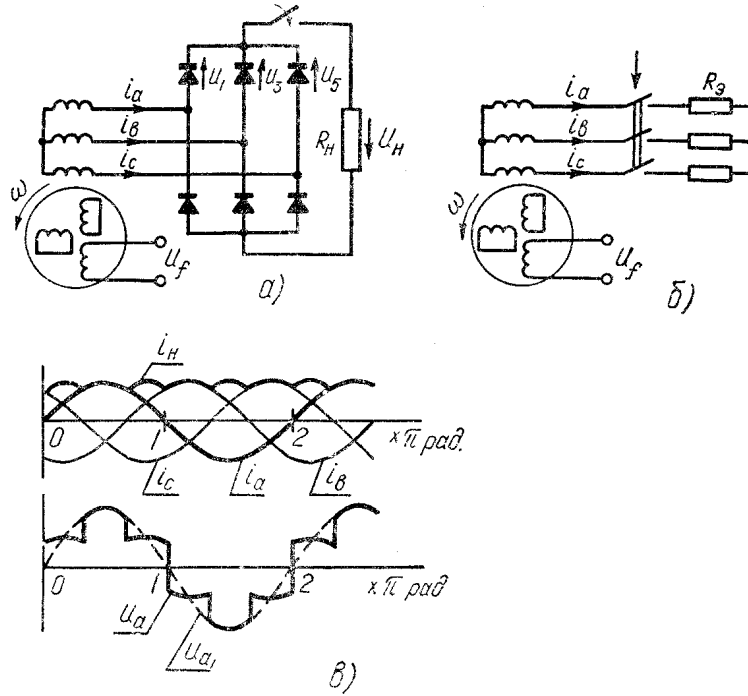


Рис. 1

Для схемы замещения эта связь выражается уравнением

$$U_a = R_3 i_a, \quad (2)$$

Для схемы с выпрямителем аналогичную зависимость сравнительно легко можно получить лишь для первых гармоник токов и напряжений.

На рис. 1, в, исходя из первых гармоник токов фаз, построены кривые тока нагрузки и одна из кривых фазного напряжения. Кривая фазного напряжения построена с учетом соотношения (1) для случая работы вентилях выпрямителя группами по три (при таком режиме падения напряжения на вентилях определяются направлением тока в соответствующих фазах и напряжением на нагрузке, например:  $U_1 = 0$  при  $i_a > 0$ ,  $U_1 = -U_H$  при  $i_a < 0$ , (аналогично для  $U_3$  и  $U_5$ ) и может быть представлена суммой нескольких составляющих; из которых основной является первая гармоника

$$U_{a1} = \frac{2}{3} R_H i_a. \quad (3)$$

Сравнивая (3) с (2), заключаем

$$R_3 = \frac{2}{3} R_H. \quad (4)$$

Следует отметить, что, поскольку при выводе (4) учитывались лишь первые гармоники фазного напряжений и токов, схемы, изображенные на рис. 1, не являются строго эквивалентными. Несмотря на это, решения переходных процессов в них, полученные на математической модели, практически совпадают в области трехвентильных режимов работы выпрямителя. Таким образом, возникает возможность рассчитывать переходные процессы вентильного импульсного генератора по схеме заме-

щения (рис. 1, в). Правомерность такого представления подтверждается практическим совпадением осциллограмм (рис. 2) фазных токов, токов ротора и потокосцеплений вентильного импульсного генератора (сплошные линии) с подобными осциллограммами, полученными при внезапном включении трехфазного синхронного генератора на симметричную активную нагрузку (пунктирные линии). Замена выпрямителя эквивалентной схемой позволяет рассчитать ток в нагрузке вентильного импульсного генератора по огибающей кривой фазных токов синхронного генератора, что значительно упрощает аналитические исследования [3].

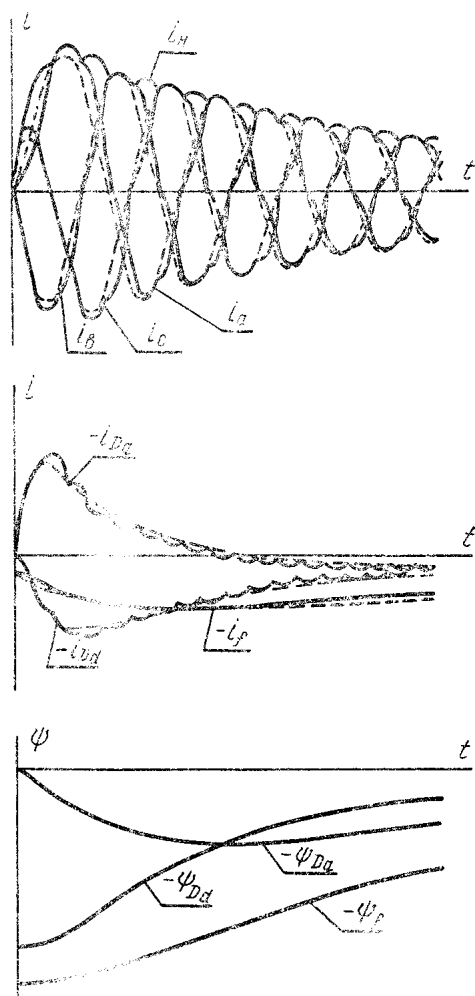


Рис. 2. Осциллограммы токов и потокосцеплений: — вентильного импульсного генератора при  $R_H=0,1$ , - - - - - синхронного генератора при симметричной нагрузке  $R_o = \frac{2}{3} R_H = 0,0666$ .

Параметры генератора:  $X_d=X_q=1,05$ ,  $X_{Dd}=X_{Dq}=1,05$ ,  $x_f=1,2$ ,  $x_a=1$ ,  $\Gamma_f=\Gamma_{Dd}=\Gamma_{Dq}=\Gamma=0,02$

Основные результаты исследований на АВМ по полной системе дифференциальных уравнений были проверены при экспериментальных исследованиях на целом ряде макетных образцов. Результаты эксперимента хорошо согласуются с теоретическими выводами. На рис. 3 приведена осциллограмма фазных токов, снятых на физической модели генератора, имеющего габаритную мощность 3, 5 квт, при работе по схемам рис. 1, а и рис. 1, б. Осциллограммы получены путем совмещения негативов при печатании. Как видно из рис. 3, фазные токи практически совпадают.

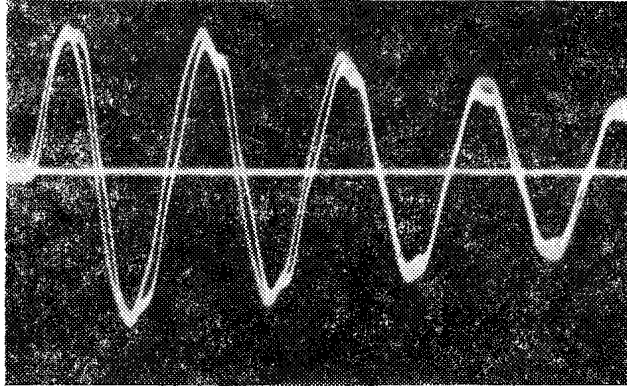


Рис. 3. Экспериментальные осциллограммы фазных токов при работе по схемам рис. 1, а и рис. 1, б

### Выводы

1. Основным режимом работы трехфазной схемы выпрямления вентильного импульсного генератора при согласованных значениях сопротивлений нагрузки является режим горения вентилей группами по три. Согласованное сопротивление нагрузки вентильного импульсного генератора  $R_n = (1,5-2) x''_d$ .

2. Расчет тока нагрузки вентильного импульсного генератора возможно производить по огибающей кривой фазных токов, полученных при внезапном включении синхронного генератора, на симметричную трехфазную активную нагрузку, величина которой равна  $R_0 = 1,5 R_n$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Лоос, Ю. И. Рябчиков. Математическое моделирование синхронного генератора при выпрямительной нагрузке. Изв. ТПИ, т. 242, 1972.
2. И. И. Трещев. Методы исследования машины переменного тока. «Энергия», 1969.
3. А. В. Лоос. Применение метода последовательного дифференцирования при расчете переходных процессов электромашинных источников импульсов, Изв. ТПИ. Настоящий сборник.