

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЙ
НАГРУЗКЕ**

А. В. ЛООС, Ю. И. РЯБЧИКОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Для генерирования мощных кратковременных импульсов электроэнергии в ряде систем используют импульсный режим работы трехфазного синхронного генератора через мостовой двухполупериодный выпрямитель на активную нагрузку (рис. 1).

В настоящее время для исследований режимов работы синхронного генератора при выпрямительной нагрузке наибольшее применение нашли приближенные методы, использование которых предполагает пренебрежение высшими гармониками токов и напряжений на стороне переменного тока, учет на стороне выпрямленного тока только средних значений за период повторяемости. Не учитываются также переходные и сверхпереходные составляющие токов синхронного генератора [1, 2, 3].

Однако точное определение динамических свойств системы синхронный генератор-выпрямитель-нагрузка требует решения полной системы нелинейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами.

Математическое моделирование синхронного генератора при выпрямительной нагрузке позволяет уменьшить число принимаемых допущений. Однако исследование переходных процессов и в данном случае представляет определенные трудности.

Основные из них связаны с разработкой модели трехфазного двухполупериодного выпрямителя, так как известные методы моделирования диода на основе сопротивлений в модели исследуемого устройства приводят к появлению замкнутых контуров, составленных из нечетного числа усилителей с большим коэффициентом усиления. Наличие же в схеме решения подобных контуров алгебраического типа вызывает дрейф и помехи при решении [4]. Известные способы сочетания методов математического моделирования с физическим моделированием выпрямителя также не нашли широкого распространения вследствие больших трудностей, связанных с устойчивостью и настройкой источников тока» [5].

Следствием указанных причин является широко распространенное упрощенное моделирование переходных процессов в синхронном генераторе при выпрямительной нагрузке, заключающееся в замене уравнений реального выпрямителя уравнением его внешней характеристики [6]. Такое представление ведет к пренебрежению высшими гармониками токов и напряжений, обусловленных наличием выпрямителя, и является неприемлемым при решении многих задач.

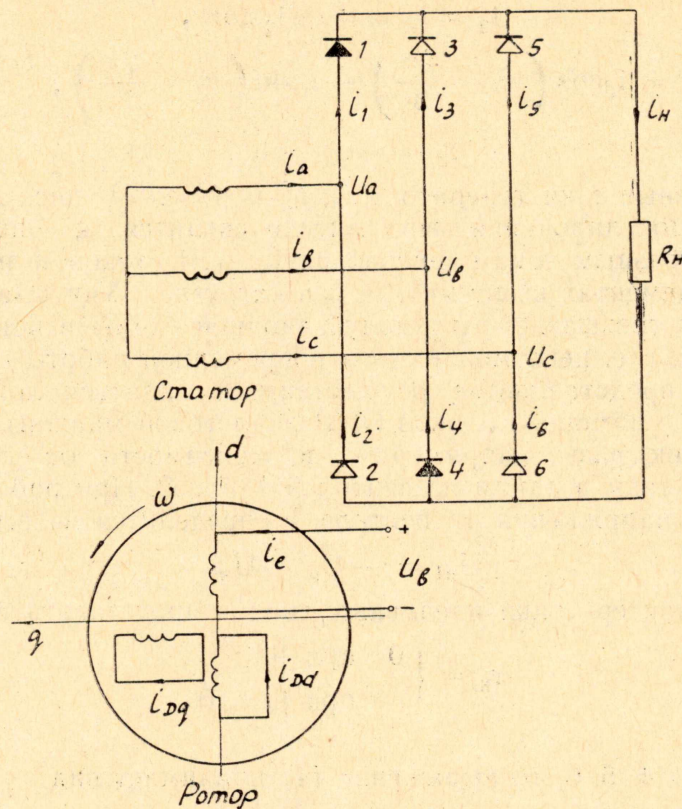


Рис. 1. Схема работы синхронного генератора на выпрямительную нагрузку

Ниже при моделировании синхронного генератора, работающего на выпрямительную нагрузку, учитываются переходные процессы в выпрямителе. Полная система уравнений машинно-вентильного каскада состоит из уравнений генератора, выпрямителя и цепи нагрузки. Уравнения синхронного генератора наиболее просто представить в системе координат d, q :

$$\begin{aligned}
 -U_d &= p\Psi_d + \omega\Psi_q + r_i i_d, \\
 -U_q &= p\Psi_q - \omega\Psi_d + r_i i_q, \\
 U_f &= p\Psi_f + r_f i_f, \\
 0 &= r\Psi_{Dd} + r_{Dd} i_{Dd}, \\
 0 &= p\Psi_{Dq} + r_{Dq} i_{Dq},
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 \Psi_d &= x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_{Dd}, \\
 \Psi_q &= x_q i_q + x_{aq} i_{Dq}, \\
 \Psi_f &= x_{ad} i_d + x_f i_f + x_{ad} i_{Dd}, \\
 \Psi_{Dd} &= x_{ad} i_d + x_{ad} i_f + x_{Dd} i_{Dd}, \\
 \Psi_{Dq} &= x_{aq} i_q + x_{Dq} i_{Dq}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

В представленной системе уравнений не учитывается насыщение магнитной цепи по путям основного магнитного потока и потоков рассеяния. Однако их учет не представляет определенных трудностей и в случае необходимости может быть осуществлен по известным методикам [5]. При рассмотрении электромеханических переходных процессов к системе (1), (2) необходимо добавить уравнение движения ротора.

В результате решения уравнений (1), (2) возможно получение токов i_d и i_q синхронного генератора (узел 1, рис. 2), с помощью уравнений линейных преобразований.

$$\begin{aligned}
 i_a &= i_d \cos \theta + i_q \sin \theta, \\
 i_b &= i_d \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_q \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right), \\
 i_c &= -i_a - i_b.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

получаем фазные токи генератора i_a, i_b, i_c (узел II, рис. 2).

Задача моделирования выпрямителя сводится к определению по полученным фазным токам генератора i_a, i_b, i_c токов и напряжений в различных элементах выпрямителя и в нагрузке. Учитывая невозможность работы трехфазной двухполупериодной схемы в четырехвентильных режимах, т. е. невозможность одновременной работы двух вентилей одной фазы, представляется осуществимым задаться логикой работы выпрямителя с помощью блоков ОНР аналоговой машины МН-14. Действительно, ток фазы, например i_a , в зависимости от его полярности всегда равен току в одном из вентилей 1 или 2. При работе же вентиля 2 падение напряжения на вентиле 1 определится из выражения

$$U_{B1} = -U_H - U_{B2} \tag{4}$$

Если характеристики идеальных диодов представить в виде

$$r_k = \begin{cases} 0 & \text{при } i_k > 0, \\ \infty & \text{при } i_k \leq 0, \end{cases}$$

где

$k=1, 2, 3, 4, 5, 6$, то выражение (4) принимает вид

$$U_{B1} = -U_H \tag{5}$$

Аналогичные соотношения можно получить и для остальных токов и напряжений выпрямителя. Падение напряжения на нагрузке находится по соотношению:

$$U_H = (i_1 + i_3 + i_5) R_H = i_H R_H. \tag{6}$$

По известным падениям напряжений на вентилях U_{B1}, U_{B3}, U_{B5} нетрудно найти напряжение на зажимах выпрямителя:

$$\begin{aligned}
 U_a &= \frac{1}{3} (2U_{B1} - U_{B3} - U_{B5}), \\
 U_b &= \frac{1}{3} (2U_{B3} - U_{B1} - U_{B5}), \\
 U_c &= -U_a - U_b.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Модель выпрямителя представлена на рис. 2 узлом V. Для определения неизвестных напряжений U_d и U_q по полученным U_a, U_b, U_c воспользуемся уравнениями линейных преобразований:

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{2}{3} \left[U_a \cos \theta + U_b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + U_c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right], \\
 U_q &= \frac{2}{3} \left[U_a \sin \theta + U_b \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + U_c \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right].
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Схема решения уравнений (8) представлена узлом III на рис. 2.

Необходимые для решения гармонические функции угла θ получаются от генератора синусоидальных колебаний (узел IV, рис. 2).

В разработанной модели синхронного генератора, работающего на выпрямительную нагрузку, отсутствуют неустойчивые элементы. Ее реализация на базе аналоговой вычислительной машины позволила ре-

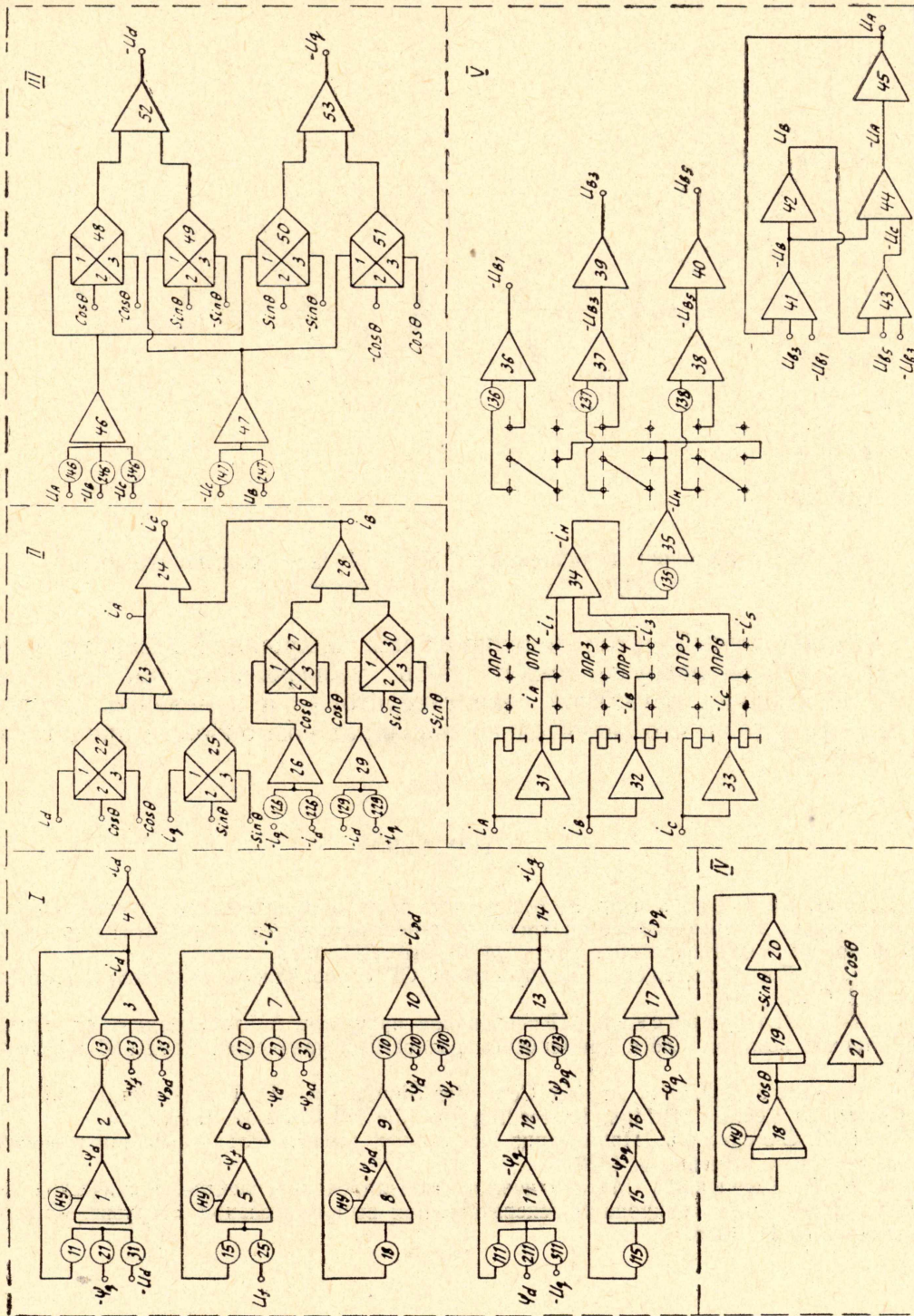


Рис. 2. Математическая модель синхронного генератора при выпрямительной нагрузке

шить широкий круг задач при разработке и исследовании машинно-вентильных каскадов.

На рис. 3 приведена осциллограмма решения при внезапном включении трехфазного синхронного генератора через неуправляемый выпрямитель на активную нагрузку. Сравнение результатов расчетов на МН-14 с экспериментальными исследованиями показывают хорошую сходимость.

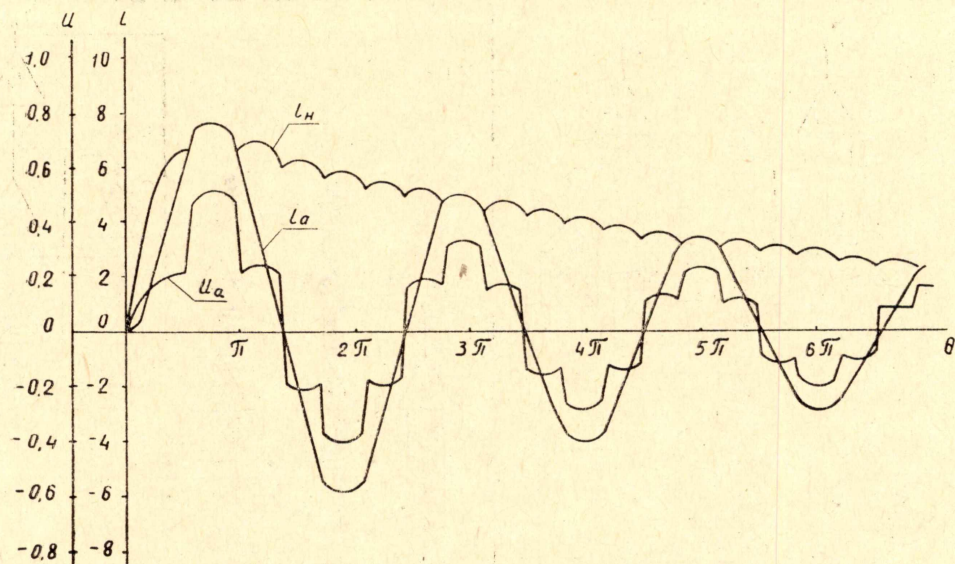


Рис. 3. Осциллограмма решения на $MN=14$; i_n — ток нагрузки, i_a — ток фазы, U_a — фазное напряжение

Разработанный метод моделирования синхронного генератора при выпрямительной нагрузке может быть усовершенствован введением учета насыщения магнитной цепи генератора и изменения скорости вращения ротора, что значительно расширит возможности представленной модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Л. Геворкян и др. Метод расчета зарядных кривых емкостного накопителя с питанием от трехфазного синхронного генератора через выпрямитель по огибающей фазового тока генератора. Труды МАИ, вып. 211, 1970.
2. А. И. Глебов. Система возбуждения СГ с управляемыми преобразователями. Изд. АН СССР, 1960.
3. И. Б. Набутовский. Исследование процессов в питающемся от синхронной машины выпрямителе с применением разностных уравнений. Труды ЛПИ, № 293, 1968.
4. Thomas A. Lipo, Analog Computer Simulation of a Three-Phase Full-wave Controlled Rectifier Bridge, Proceedings of the IEEE, № 12, 1969.
5. Н. И. Соколов. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах. «Энергия», 1970.
6. А. П. Типикин. Математическое моделирование электромеханических переходных процессов в синхронном генераторе при выпрямительной нагрузке. «Электромеханика», № 11, 1966.