ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА
ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 265 1973

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО СОВМЕСТНО С ЦИКЛОКОНВЕРТОРОМ

Г. А. СИПАЙЛОВ, В. Н. БАЗАРОВ, А. В. ЛООС

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и аппаратов и общей электротехники)

Необходимость получения низкочастотного (от долей до десятка герц) напряжения приводит к использованию системы, состоящей из синхронного генератора (СГ) и встречно-параллельного управляемого выпрямителя-циклоконвертора (ЦК). При этом кривая выходного напряжения, являясь огибающей, составленной из отрезков синусоид фазных напряжений питающего СГ, может менять свою форму от прямоугольной до близкой к синусоиде. При прямоугольном выходном напряжении работа ЦК осуществляется при угле регулирования, равном нулю. Общая схема системы представлена на рис. 1, а. Наличие автоматического регулятора возбуждения, который стабилизирует выходное напряжение, позволяет системе нормально функционировать при переменной скорости вращения СГ. При этом частота на выходе остается постоянной, а ее стабильность достигается соответствующим расчетом минимальной частоты СГ [1]. Совершенно ясно, что включение второй ветви ЦК может производиться только после спадания тока в нагрузке до нуля во избежание короткого замыкания СГ. При коммутации с одной ветви ЦК на другую в СГ протекают переходные процессы, которые должны быть учтены при выборе и расчете как самого генератора, так и силовой части ЦК.

Работа СГ совместно с ЦК, содержащим полупроводниковые вентили, характеризуется сложными электромагнитными процессами, обусловленными нелинейностью характеристик управляемых вентилей и магнитными связями многоконтурных цепей генератора. Точный аналитический расчет подобных систем в настоящее время невозможен. Однако существует ряд способов, позволяющих приближенно анализировать электромагнитные процессы в сложных преобразовательных установках.

Наибольшее распространение в литературе [2, 3] получил аналитический метод с применением схем замещения. Питающий генератор заменяют источником э. д. с. с включением в каждую фазу эквивалентной индуктивности машины и активного сопротивления обмотки. Суть такой замены заключается в замене сложных уравнений переходных процессов СГ более простыми, приемлемыми для аналитических исследований.

Применение разностных уравнений более удобно для анализа установившихся режимов СГ и ЦК, так как в этом случае длительность

проводимости и коммутации остается постоянной. Принципиально возможно аналитическое исследование системы по полной системе уравнений для СГ и ЦК методом припасовывания, но практическая применяемость метода определяется сложностью дифференциальных уравнений, высоким порядком, присутствием периодических коэффициентов, громоздкостью расчетов. Трудным является и вопрос стыковки решений на границах интервалов.

Таким образом, краткий обзор аналитических методов показывает, что анализ переходных процессов в исследуемой системе аналитически труден и требует применения вычислительной техники.

Исследования с помощью цифровых вычислительных машин, однако, вызывают неоправданно большие затраты машинного времени и трудность обработки результатов. Более удобным поэтому является применение аналоговой вычислительной техники.

Математическое моделирование СГ и ЦК позволяет уменьшить число применяемых допущений. Однако исследование переходных процессов и в данном случае представляет определенные трудности. Основные из них связаны с моделированием ЦК, так как известные методы моделирования вентиля на основе сопротивлений в модели ведут к появлению замкнутых контуров с нечетным числом усилителей и суммарным коэффициентом передачи, большим единицы. Модель системы получается неустойчивой. Моделирование с использованием внешней характеристики одной ветви ЦК не учитывает влияние коммутаций выпрямителя на СГ и не позволяет исследовать сам ЦК.

Разработанная нами модель СГ и ЦК позволяет решить многие задачи по исследованию переходных режимов. Наиболее удобным, с точки зрения моделирования, оказывается применение дифференциальных уравнений в осях d, q. Для выполнения линейных преобразований в модель вводятся блоки перемножения. Дифференциальные уравнения СГ при общепринятых допущениях имеют вид [4].

$$
\left.
\begin{aligned}
p\Psi_d &= -U_d - \omega\Psi_q - ri_d \\
p\Psi_q &= -U_q + \omega\Psi_d - ri_q \\
p\Psi_f &= U_f - r_f i_f \\
p\Psi_{Dd} &= -r_{Dd} i_{Dd} \\
p\Psi_{Dq} &= -r_{Dq} i_{Dq} \\
i_d &= \frac{x_f x_{Dd} - x^2_{ad}}{\Delta}\Psi_d - \frac{x_{ad}(x_{Dd} - x_{ad})}{\Delta}\Psi_f - \frac{x_{ad}(x_f - x_{ad})}{\Delta}\Psi_{Dd} \\
i_f &= \frac{x_d x_{Dd} - x^2_{ad}}{\Delta}\Psi_f - \frac{x_{ad}(x_{Dd} - x_{ad})}{\Delta}\Psi_d - \frac{x_d(x_d - x_{ad})}{\Delta}\Psi_{Dd} \\
i_{Dd} &= \frac{x_d x_f - x^2_{ad}}{\Delta}\Psi_{Dd} - \frac{x_{ad}(x_f - x_{ad})}{\Delta}\Psi_d - \frac{x_{ad}(x_d - x_{ad})}{\Delta}\Psi_f \\
i_q &= \frac{x_{Dq}}{\Delta'}\Psi_q - \frac{x_{aq}}{\Delta'}\Psi_{Dq} \\
i_{Dq} &= \frac{x_q}{\Delta'}\Psi_{Dq} - \frac{x_{aq}}{\Delta'}\Psi_q
\end{aligned}
\right\}, \quad (1)
$$

где

$$
\Delta = x_d x_f x_{Dd} + 2x^3_{ad} - x^2_{ad}(x_d + x_f + x_{Dd}),
$$

$$
\Delta' = x_q x_{Dq} - x^2_{aq}.
$$

Томск-4,
ул. Белинского, 53
Библиотека ТПИ

Уравнения ветви ЦК:

$$\left.\begin{aligned} U_a &= \frac{1}{3}(2U_1 - U_3 - U_5);\quad U_b = \frac{1}{3}(2U_3 - U_5 - U_1) \\ U_a &+ U_b + U_c = 0 \\ i_н R_н &= U_1 + U_2 = U_3 + U_4 = U_5 + U_6 \\ i_н &= i_1 + i_3 + i_5 = i_2 + i_4 + i_6 \\ i_a &= i_1 + i_2;\quad i_b = i_3 + i_4;\quad i_c = i_5 + i_6 \\ i_a &+ i_b + i_c = 0 \end{aligned}\right\}, \qquad (2)$$

где 1, 2, 3, 4, 5, 6 — номера вентилей.

Падение напряжения на вентиле определится

$$U_{bк} = R_{bк} i_к,$$

где

$$R_{bк} = \begin{cases} 0 & \text{при } i_к \geqslant 0, \\ \infty & \text{при } i_к < 0; \end{cases}$$

$$к = 1, 2, 3, 4, 5, 6.$$

Для получения напряжений U_d, U_q и токов i_a, i_b воспользуемся широко известными формулами линейного преобразования:

$$i_a = i_d \cos \omega t + i_q \sin \omega t;\quad i_b = i_d \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + i_q \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$U_d = \frac{2}{3}\left[U_a \cos \omega t + U_b \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + U_c \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\right],$$

$$U_q = \frac{2}{3}\left[U_a \sin \omega t + U_b \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + U_c \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\right]. \qquad (3)$$

Система в целом работает в двух основных режимах: в установившемся (режим один) и переходном (режим два). Для вентиля пять имеем

$$U_{b5} = i_c R_c', \qquad (4)$$

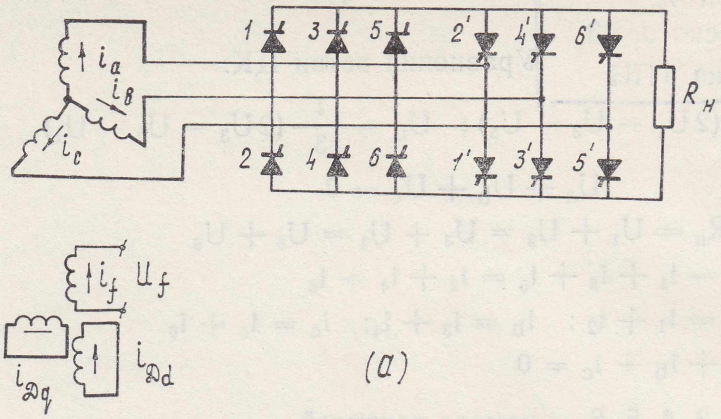
где R^1_c — сопротивление, вводимое в фазу. Наиболее наглядно логика работы ЦК отражается линейными диаграммами загрузки вентилей (рис. 1, б, в). Как видно из диаграмм, ЦК работает либо в двухтрехвентильном режиме, либо в режиме работы вентилей группами по три.

На основании уравнений (1, 2, 3, 4) была составлена модель СГ и ЦК при работе на активную нагрузку (рис. 2).

В режиме один подключена любая ветвь ЦК и СГ работает через выпрямитель в установившемся режиме. Модель СГ составлена по уравнениям (1, 3) в осях, состоит из двух частей: модели СГ (узел I) и модели преобразователя фазных токов (узел II).

Модель выпрямителя с нагрузкой (узел III) преобразователя напряжения (узел IV) и блок переключений режимов (узел V) составлены уравнениями (2, 3, 4).

Выходом модели выпрямителя являются фазные напряжения U_a, U_b, U_c, которые после преобразования вводятся в модель СГ. Блок переключения режимов (узел IV) предназначен для осуществления отключения одной ветви ЦК и включения другой ветви. Так как обе ветви ЦК не могут работать одновременно, то после того как ток в нагрузке спадет до нуля, снова включается модель той же ветви.



(а)

№вен.	60°	120°	180°	240°	300°	360°
1(1')						
2(2')			δ			
3(3')						
4(4')						
5(5')						
6(6')						

(б)

№вен.	60°	120°	180°	240°	300°	360°
1(1')						
2(2')						
3(3')						
4(4')						
5(5')						
6(6')						

(в)

Рис. 1. а — принципиальная схема системы СГ-ЦК; б, в — линейные диаграммы загрузки вентилей ЦК для 2- и 3-вентильных режимов соответственно

Модель блока переключения режимов работает следующим образом. Сигнал на отключение поступает от задающего импульсного генератора. Триод T_1 открывается и ОПР-5 перебрасывает контакты. Одна пара контактов осуществляет блокировку ОПР-5 через контакты ОПР-6, другая пара запитывает обмотку ОПР-6 и ОПР-7 через нормально замкнутые контакты ОПР-1 и ОПР-2 при прохождении тока i_c через нуль. Когда срабатывает ОПР-6, снимается блокировка с ОПР-5, но последнее блокируется через контакты ОПР-3 и ОПР-4. Контакты ОПР-7 разрывают основную цепь фазы «С» и подключают в нее сопротивления R^1_c. Ток $i_c \approx 0$.

После спадания тока в фазе «В», а значит и в нагрузке до нуля, ОПР-3 снимает блокировку с ОПР-5, которое снимает питание с ОПР-7. Схема возвращается в исходное положение (режим один) до прихода следующего импульса на триод T_1

В основу модели блока переключателя заложены физические процессы при работе выпрямителя. Предлагаемая модель позволяет реализовать широкий круг задач, связанных с работой как генератора, так и выпрямителя. К этим задачам в первую очередь относятся: определение

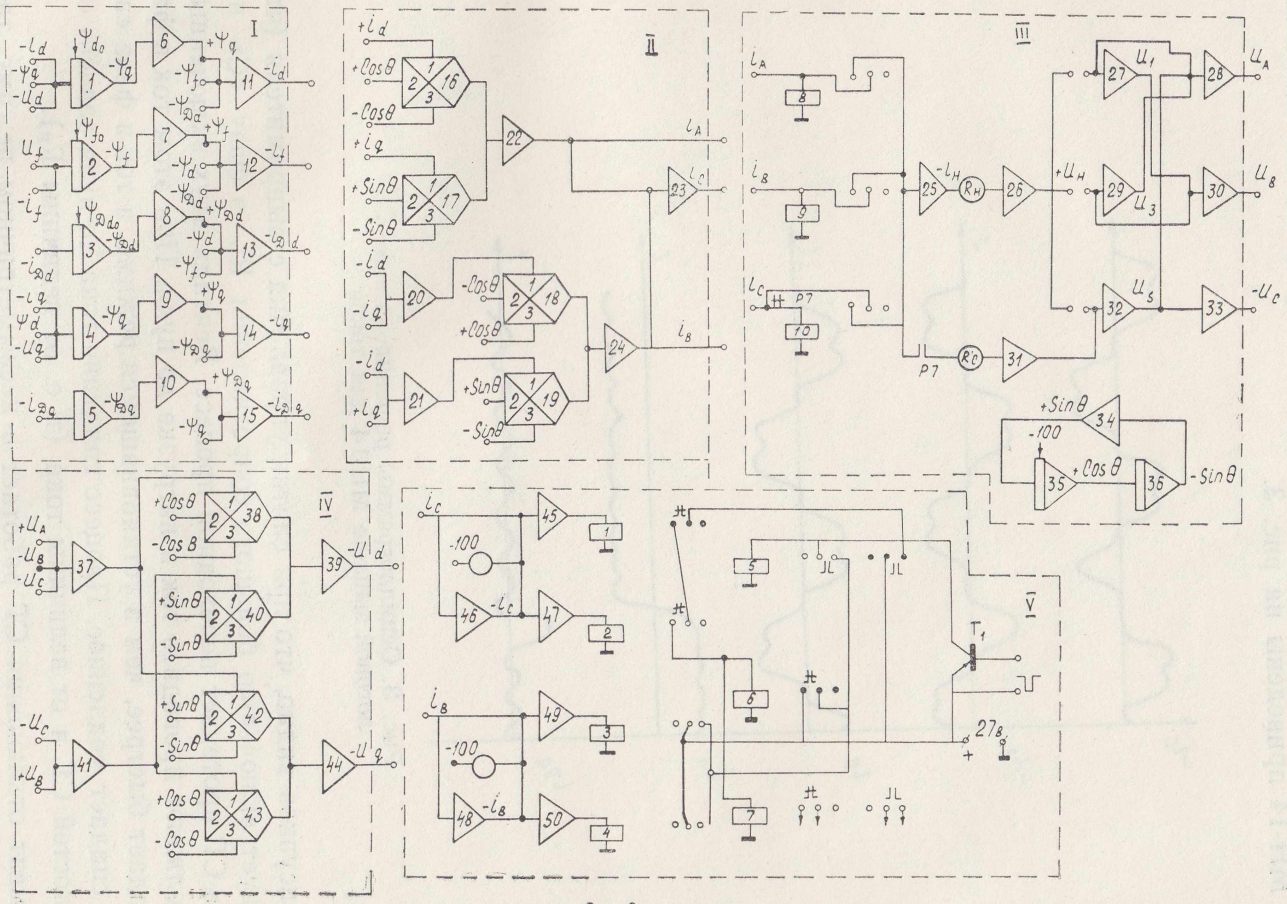


Рис.2

Рис. 2. Математическая модель СГ-ЦК

поведения СГ при включении и отклонении выпрямителей, аварийные режимы всей системы, влияние переменной скорости вращения генератора, влияние явнополюсности и ряд других.

В качестве примера возможности решения перечисленных задач на предлагаемой модели рассмотрим поведение фазных токов i_A, i_B, i_C, тока в нагрузке и тока в демпферной обмотке по оси при отключении выпрямителя и повторном включении. Результаты решения на аналоговой машине МН-14 приведены на рис. 3.

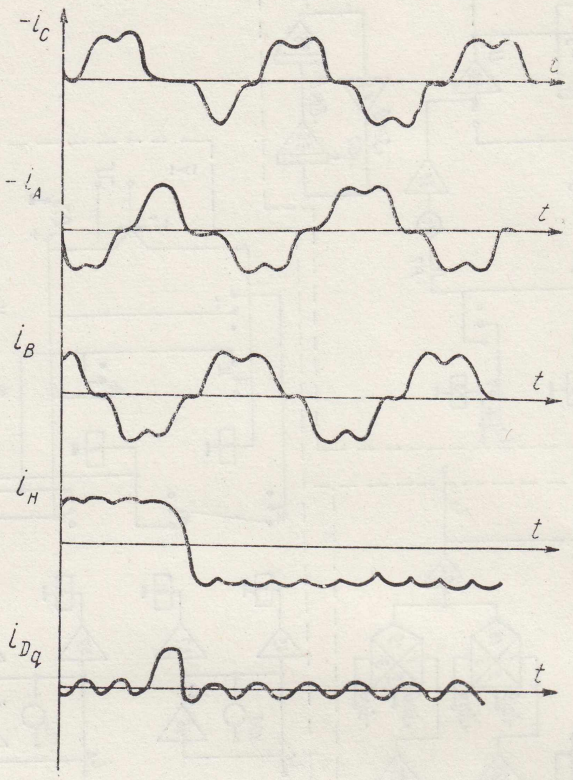
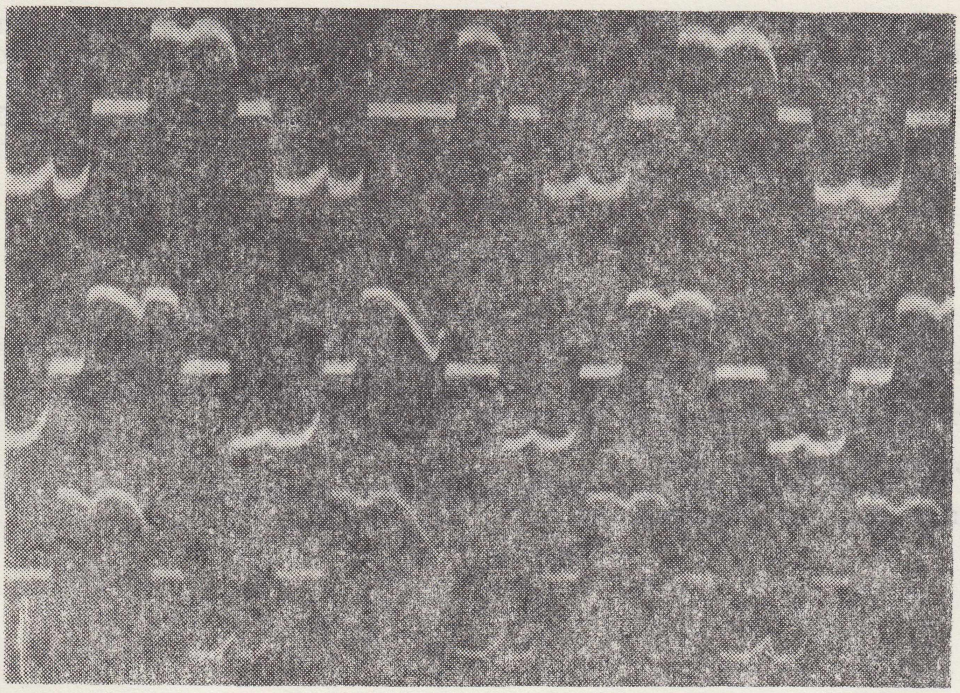


Рис. 3. Осциллограммы решения на аналоговой машине МН-14 для токов

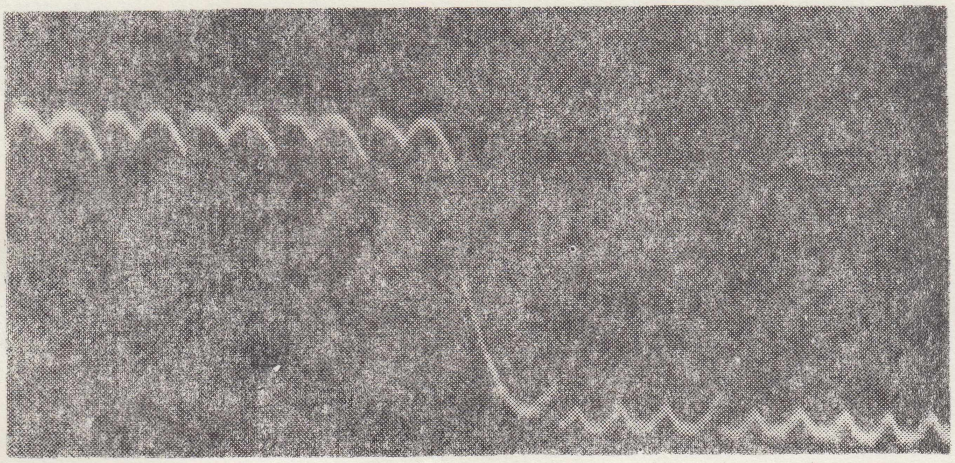
Из рисунков видно, что при снятии управления с выпрямителя (что соответствует включению большого сопротивления R^1_c в фазу «С» на модели) в СГ протекает переходной процесс. Вентили двух включенных фаз продолжают проводить ток в нагрузке до нуля. При этом ток в фазе «а» спадает быстрее, чем в установившемся режиме, а ток в фазе «в» напротив спадает медленнее. Процесс спадания тока до нуля зависит от индуктивностей СГ и от величины тока (т. е. от величины $R_н$).

В момент отключения СГ работает в несимметричном режиме, так как по двум фазам протекает ток, а третья фаза отключена. В демпферной системе при этом протекает переходный процесс, что и отражается на форме тока в демпферной обмотке.

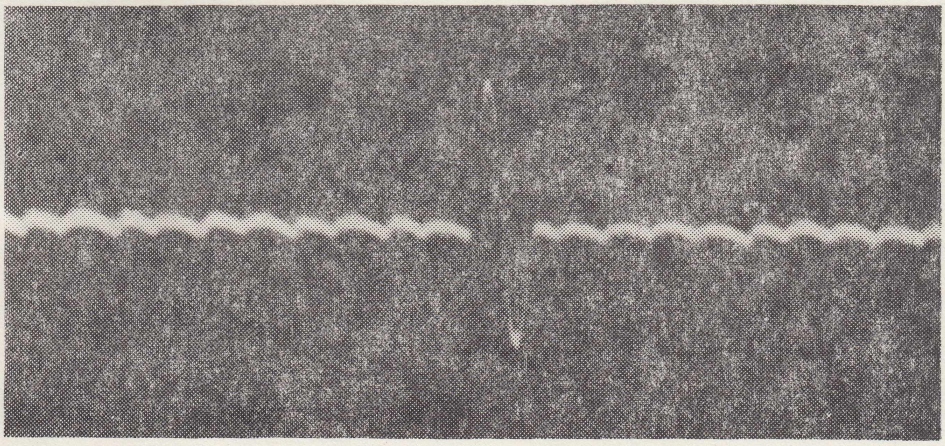
Для проверки правильности решения на аналоговой машине были проведены экспериментальные исследования на опытной установке. Опытный образец СГ выполнен в габаритах асинхронной машины АК-51-4, а ЦК на тиристорах ПТЛ-50-8.



а)



б)



в)

Рис. 4. Экспериментальные осциллограммы системы СГ-ЦК

Сравнение осциллограмм решения на АВМ и полученных на опытной установке позволяет сделать вывод о правильности методики моделирования и работоспособности модели при исследовании всех возможных режимов СГ и ЦК. Эффективность использования модели особенно возрастает при исследовании режимов, которые не могут быть проведены на экспериментальной установке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Григорьев, Ю. М. Иньков, З. С. Иоспа, В. П. Феоктистов. Проблема централизованного электроснабжения пассажирских поездов при электрической и тепловозной тяге. «Электричество», 1971, № 6.

2. И. А. Глебов. Системы возбуждения синхронных генераторов с управляемыми преобразователями. Изд-во АН СССР, 1960.

3. В. И. Емельянов. Трехфазная мостовая схема. Известия НИИ постоянного тока, № 8, 1961.

4. И. М. Постников. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. «Техника», 1966.