

Климаш В.С., Йе Мин Тху

ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

ОБОБЩЕННОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ВЕДОМЫХ СЕТЬЮ

Дано обоснование единства математической структуры трехфазных тиристорных регуляторов переменного напряжения и мостовых выпрямителей. На этой основе предложена обобщенная математическая модель в среде MatLab для исследования этих преобразователей. По результатам исследований на математической модели разработаны принципы построения и создана экспериментальная установка, которая может работать и как выпрямитель, и как регулятор переменного напряжения.

Ключевые слова: постоянный ток, переменный ток, выпрямитель, регулятор переменного напряжения, обобщенная математическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

При математическом описании и моделировании устройств силовой электроники AC/DC и DC/AC целесообразно учитывать параметры в цепях постоянного и переменного тока. Введение параметров источников питания и электроперехода позволяет создать возможность варьирования параметрами в цепях AC и DC и обеспечить универсальность математической структуры для применения в исследованиях широкого класса преобразователей. Используя этот подход, покажем на примере тиристорных выпрямителей и регуляторов переменного напряжения единство их математической структуры, на основе которой предложена обобщенная математическая модель этих преобразователей.

ТРЕХФАЗНЫЕ ТИРИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Схема мостового тиристорного выпрямителя [1, 4] приведена на **рис. 1, а**. Она содержит шесть тиристоров, обозначенных по перекрестному принципу. Если в этой схеме выходные зажимы закоротить, а между сетью и тиристорным мостом включить трёхфазную нагрузку переменного тока, то получим схему трёхфазного регулятора переменного напряжения [2, 3], приведенную на **рис. 1, г**. Обычно регулятор переменного напряжения изображается так, как показано на **рис. 1, б**. В этой схеме напряжение сети U_C , распределяясь между тиристорами U_T и нагрузкой U_H , равно сумме $U_C = U_T + U_H$. Поменяем местами слагаемые в этой сумме и, переходя к схеме на **рис. 1, в**, переставим соответственно местами тиристоры и нагрузку. От этой перестановки и перераспределения напряжения на элементах суммарный результат и физические процессы в схеме не изменятся.

Если сравнить схемы, приведенные на **рис. 1, в** и **рис. 1, г**, то они идентичны. У них тиристоры соединены попарно встречно параллельно и включены в цепь нагрузки. Нумерация тиристоров на всех схемах также совпадает. К фазе A относятся тиристоры VS1 и VS4, к фазе B - VS3 и VS6 и к фазе C - VS5 и VS2.

По этим признакам видно, что выпрямитель может применяться как регулятор переменного напряжения и наоборот. Отличие лишь в том, что у выпрямителя от-

счёта угла управления тиристорами α производится от точки естественной коммутации, сдвинутой в сторону отставания на 30° относительно фазного напряжения сети, а у регулятора переменного напряжения от 0° этого напряжения (перехода фазного напряжения сети через нуль). Это отличие показано на диаграммах управляющих импульсов, приведенных на **рис. 2**.

У регулятора переменного напряжения при работе на чисто индуктивную нагрузку импульсы должны быть широкими, длительностью (см. **рис. 2**) не меньше угла $\varphi = 90^\circ$, в то время как у выпрямителя с любым соотношением между R и L нагрузки они могут быть как короткими и сдвоенными, следя через 60° , так и широкими, длительностью не меньше 60° . Управление широкими импульсами повышает стабильность работы преобразователей, но при этом исключается возможность применения импульсных трансформаторов в выходном каскаде системы управления, требуется только оптическая связь.

С учетом вышеприведенных диаграмм возможно переключение с укорачиванием по фронту 90° -градусных импульсов на 60° -градусные и одновременным смещением начала отсчета угла управления тиристорами α на 30° . Таким образом, при выполнении необходимых переключений в силовой схеме и системе управления регулятор переменного напряжения становится выпрямителем. Те же переключения в блочно-модульной схеме обобщенной математической модели позволяют исследовать физические процессы в выпрямителе и регуляторе переменного напряжения при различных видах нагрузки.

ОБОБЩЕННОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ВЕДОМЫХ СЕТЬЮ

В отдельный класс выделены преобразователи с синхронизированными с сетью системами управления или преобразователи, ведомые сетью. К ним относятся выпрямители и ведомые сетью инверторы, регуляторы переменного напряжения и циклопонтеры, реверсивные и рекуперативные преобразователи для электроприводов постоянного и переменного тока [6]. Обобщенная принципиальная схема и соответствующая ей эквивалентная схема замещения вышеперечисленных мостовых тиристорных преобразователей приведены на **рис. 3**.

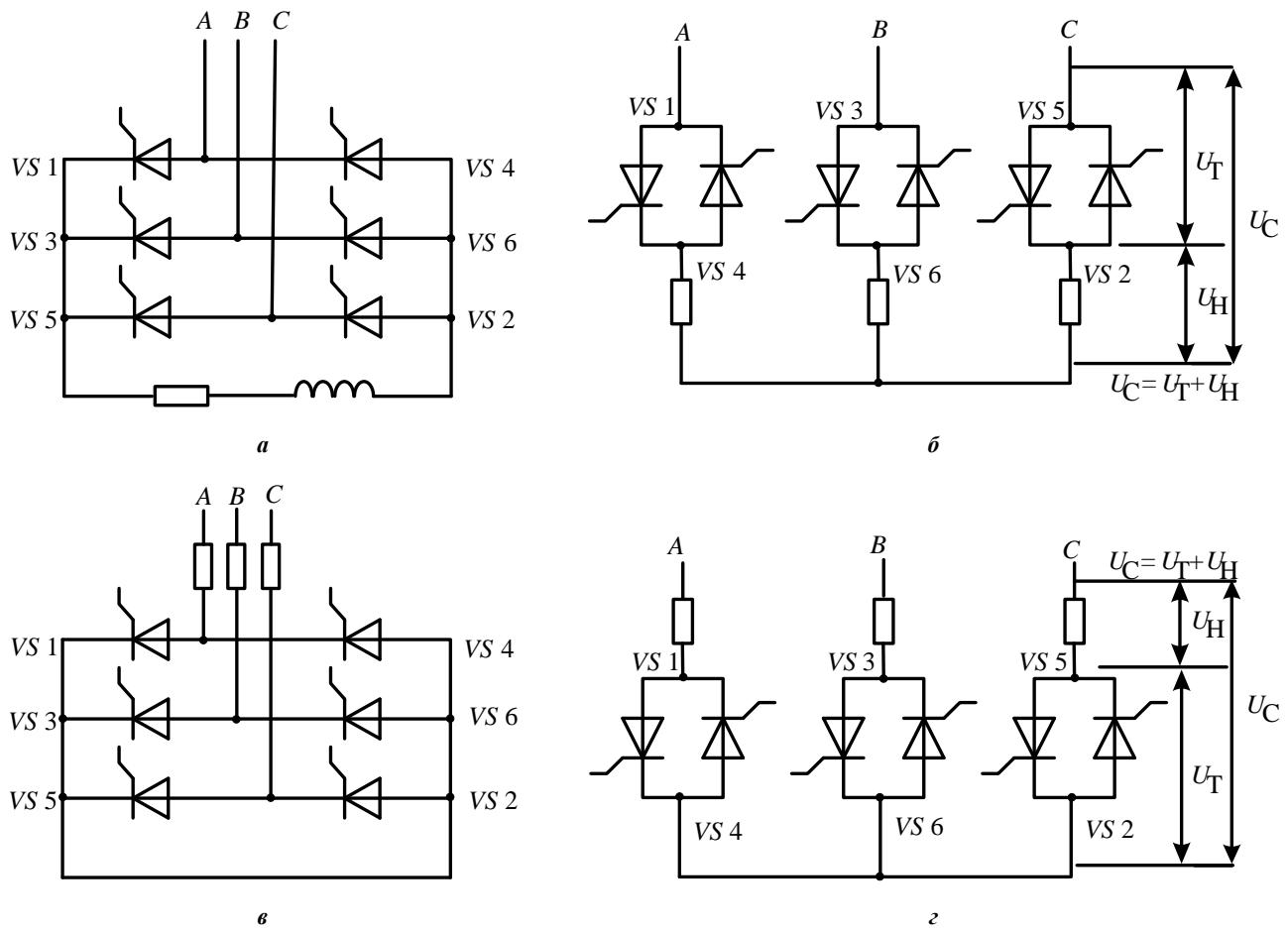


Рис. 1. Схемы трехфазных мостовых преобразователей:
а – выпрямителя; б, в, г –регуляторов переменного напряжения

Из принципиальной схемы (рис. 3, а) и схемы замещения (рис. 3, б) видно, что трехфазный мостовой выпрямитель и трехфазный регулятор переменного напряжения имеют много общего. Регулятор можно получить из выпрямителя путем вкотачивания нагрузки выпрямителя (ключ К4 замкнут) и увеличения сопротивления во входной цепи (ключи К1, К2, К3 разомкнуты). Эта особенность позволила составить одну обобщенную систему уравнений, описывающую электромагнитные процессы в преобразователях рассматриваемого класса.

Проведем апробацию предложенного подхода к исследованию преобразователей на примере трех схем – мостового трёхфазного тиристорного выпрямителя (МТВ), трёхфазного тиристорного регулятора переменного напряжения (ТРН) и преобразователя с нагрузками в цепях постоянного и переменного тока – пускорегулирующий преобразователь [5].

Различают два режима (интервала) работы тиристоров в мостовой схеме.

1) В работе находятся два тиристора:

а) у ТРН называют интервалы двухфазной проводимости;

б) у МТВ называют межкоммутационный интервал.

2) В работе находятся три тиристора:

а) у ТРН называют интервалы трехфазной проводимости;

б) у МТВ называют интервал коммутации.

Используют также для обоих преобразователей

термины: «режим прерывистого тока», «бестоковая пауза».

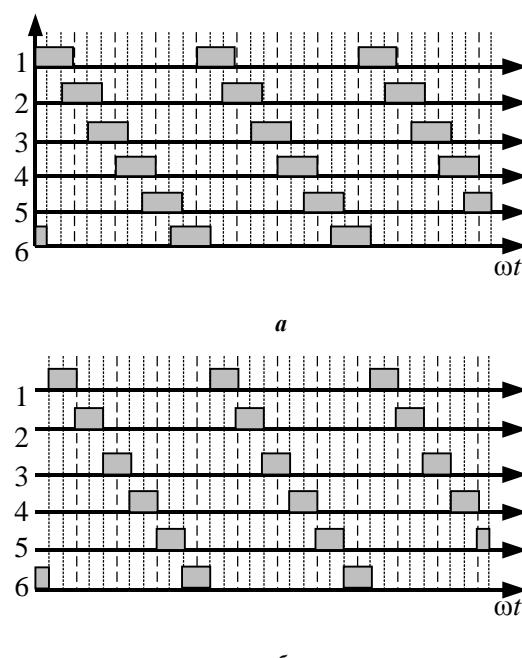


Рис. 2. Диаграммы управляющих импульсов для регулятора переменного напряжения (а) и выпрямителя (б)

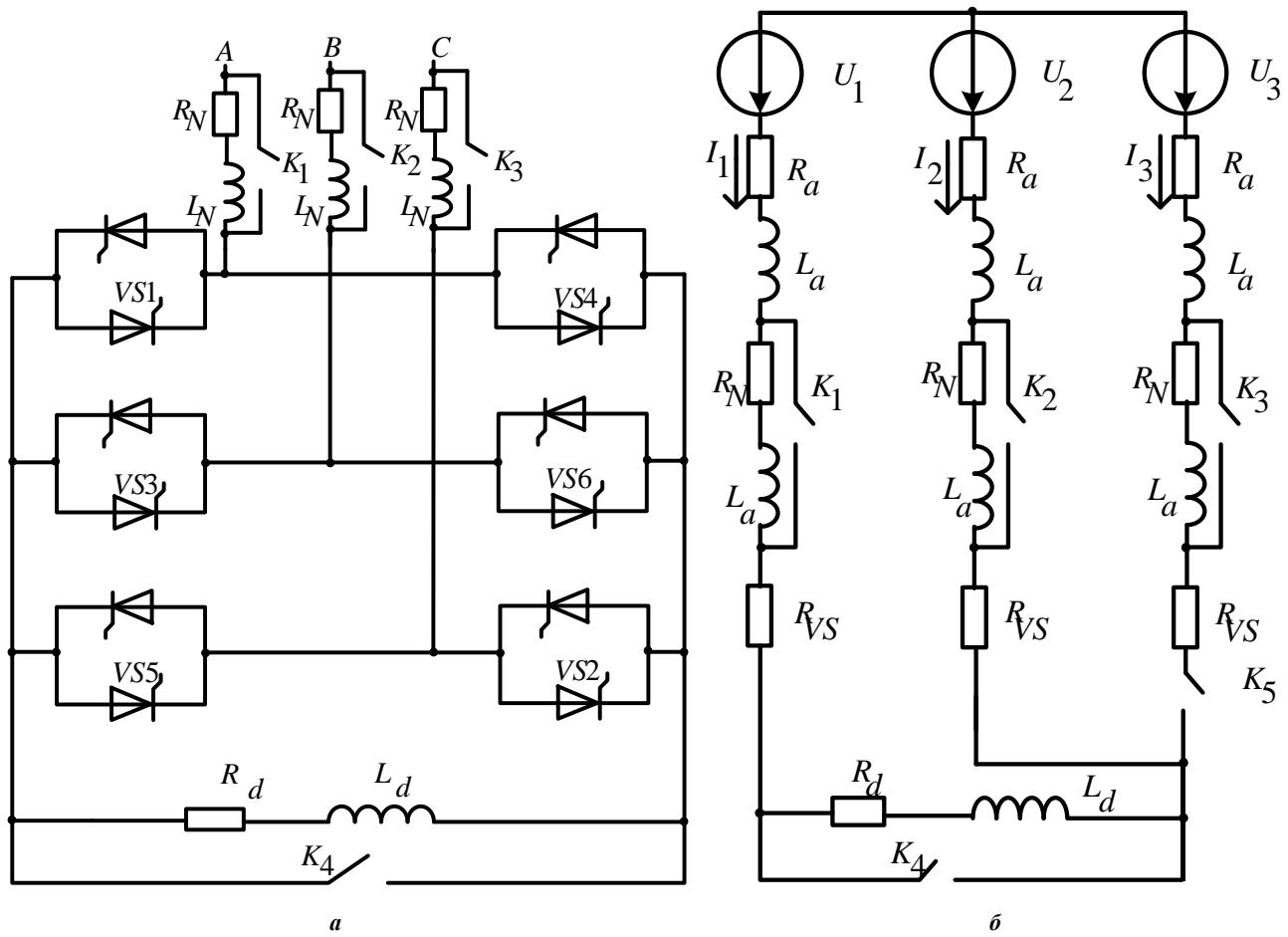


Рис. 3. Принципиальная схема (а) и эквивалентная схема замещения (б) мостовых тиристорных преобразователей

Обобщенная математическая модель учитывает индуктивности рассеяния обмоток сетевого трансформатора или индуктивность сети, которые вместе с индуктивностями нагрузок постоянного и (или) переменного тока влияют на длительность процесса коммутации. Вследствие того, что в коммутирующих фазах ток спадает не мгновенно, а в течение определенного времени, в моменты коммутации в работе одновременно находятся три тиристора.

Обобщенное дифференциальное уравнение, описывающее электромагнитные процессы в исследуемых схемах на межкоммутационных интервалах (двухфазная проводимость):

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{U_1 - U_2 - 2(R_{vs} + R_a + K_n R_n + K_d R_d) I_1}{2(L_a + K_n L_n) + K_d L_d}, \quad (1)$$

где U_1, U_2 – входное и выходное фазные напряжения; I_1 – входной ток; R_a, L_a – сопротивление и индуктивность рассеяния обмоток сетевого трансформатора; R_d, L_d – сопротивление и индуктивность нагрузки выпрямителя; R_n, L_n – сопротивление и индуктивность нагрузки регулятора; R_{vs} – сопротивление открытого тиристора; K_d, K_n – коммутационные функции выпрямителя и регулятора.

Обобщенная система дифференциальных уравнений, описывающая электромагнитные процессы в исследуемых схемах в момент коммутации (трехфазная проводимость):

$$\begin{aligned} \frac{dI_2}{dt} &= \frac{x}{3(L_a + K_n L_n) + 2K_d L_d}; \\ x &= U_1 - U_2 - 2(2R_{vs} + R_a + 2K_n R_n + K_d R_d) + \\ &+ (R_{vs} + R_a + K_n R_n) \frac{L_a + K_n L_n + K_d L_d}{L_a + K_n L_n} - \\ &- (U_2 - U_3) \frac{L_a + K_n L_n + K_d L_d}{L_a + K_n L_n}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dI_3}{dt} &= \frac{y}{L_a + K_n L_n}; \\ y &= U_2 - U_3 - I_3(R_{vs} + R_a + K_n R_n) + \\ &+ I_2(R_{vs} + R_a + K_n R_n) + \frac{dI_2}{dt}(L_a + K_n L_n), \end{aligned}$$

где I_2, I_3 – токи в двух коммутируемых фазах (спадающий и нарастающий соответственно).

Переход от уравнения (1) к системе уравнений производится в соответствии с диаграммой включения тиристоров управляющими импульсами (см. рис. 2), а обратный за счет естественного процесса переходе тока тиристора через нуль.

Обобщенные уравнения (1) и (2) описывают физические процессы трех устройств:

- тиристорного выпрямителя, если $K_n = 0$ и $K_d = 1$, т.е. нагрузка включена только в цепь постоянного тока;
- регулятора переменного напряжения, если $K_n = 1$ и $K_d = 0$, т.е. нагрузка включена в цепь переменного тока;
- пускорегулирующего устройства, если $K_n = 1$ и

$K_d = 1$, т.е. нагрузка включена в цепь переменного тока, а пусковой реостат или дроссель насыщения в цепь постоянного тока.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Обобщенная математическая модель [7] представлена на **рис. 4**. Здесь нагрузка переменного тока включена между сетью и тиристорным блоком, а нагрузка постоянного тока – на выходе мостового выпрямителя. Наличие двух нагрузок на стороне постоянного и переменного тока находит практическое применение, например, в пускорегулирующих устройствах асинхронных двигателей с фазным ротором. Частными случаями этой схемы является выпрямитель, когда в цепи переменного тока отсутствует нагрузка или регулятор переменного напряжения, когда нагрузка отсутствует в цепи постоянного тока.

Развёрнутая схема трёхфазного тиристорного моста изображена на **рис. 5**, его система управления – на **рис. 6**.

В состав тиристорного моста входят шесть тиристоров, три входных зажима переменного тока (1, 2, 3) и два выходных зажима постоянного тока (4, 5). Кроме этого, блок содержит информационный выход, с которого управляющие импульсы и напряжение для каждого тиристора подаются на осциллограф **Os1**.

На управляющий вход тиристорного моста (**pulse**) подается сигнал с системы управления (**рис. 6**).

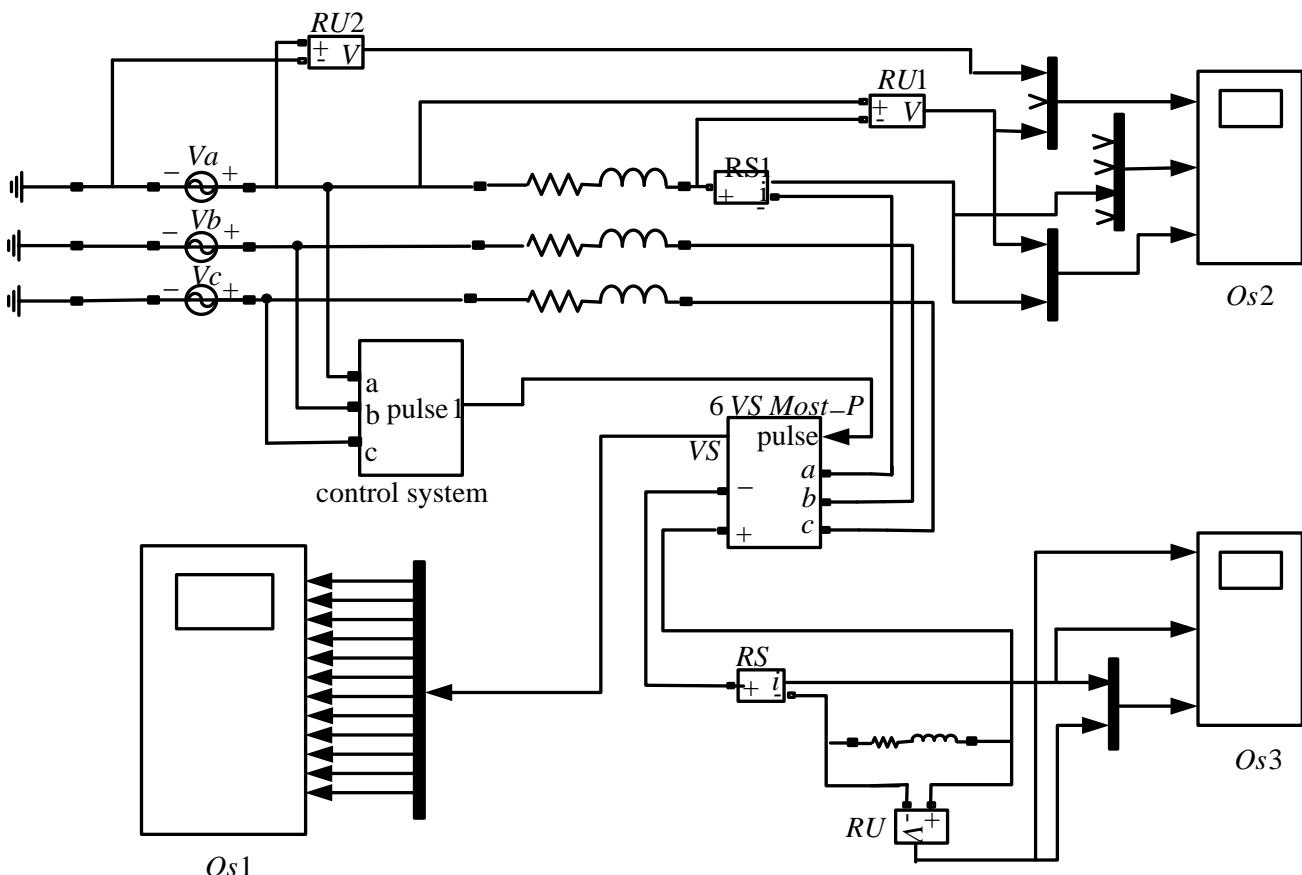


Рис. 4. Обобщённая блочно-модульная математическая модель мостового преобразователя в среде MatLab

ИССЛЕДОВАНИЕ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В СРЕДИ MATLAB ТРЕХФАЗНЫХ УСТРОЙСТВ

На **рис. 7** представлена схема модели трехфазного мостового регулятора переменного напряжения в среде MatLab. Она получена из обобщенной схемы (см. **рис. 3**) путем отключения нагрузки постоянного тока и шунтированием выходных зажимов постоянного тока 4 и 5 трехфазного моста. Это электронное устройство находит применение для промышленных симметрических нагрузок.

Результаты моделирования трехфазного регулятора переменного напряжения представлены осциллограммами на **рис. 8**.

На **рис. 8** введены следующие обозначения: U_H – мгновенное значение напряжения; i_{ca} , i_{cb} , i_{cc} – мгновенное значение трехфазного переменного тока сети; i_d – выпрямленный ток между тиристорными нагрузками.

Выполним численные эксперименты для регулятора переменного напряжения с естественной коммутацией ТРН-Е при работе на симметричную RL нагрузку с преобладающей индуктивностью ($85^\circ < \varphi < 90^\circ$) для различных углов α . Такой режим ТРН-Е наблюдается в статических компенсаторах реактивной мощности СТК с регулируемым реактором (режим регулятора индуктивной составляющей тока).

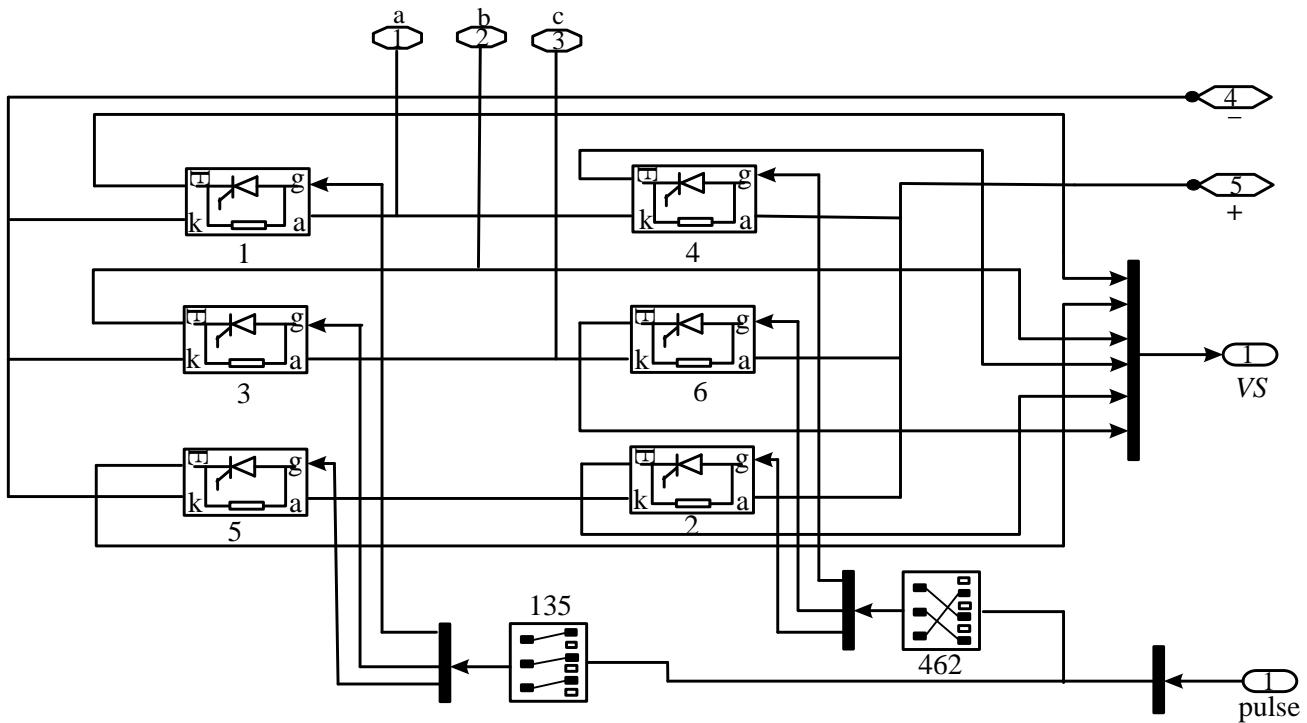


Рис. 5. Схема модуля тиристорного моста

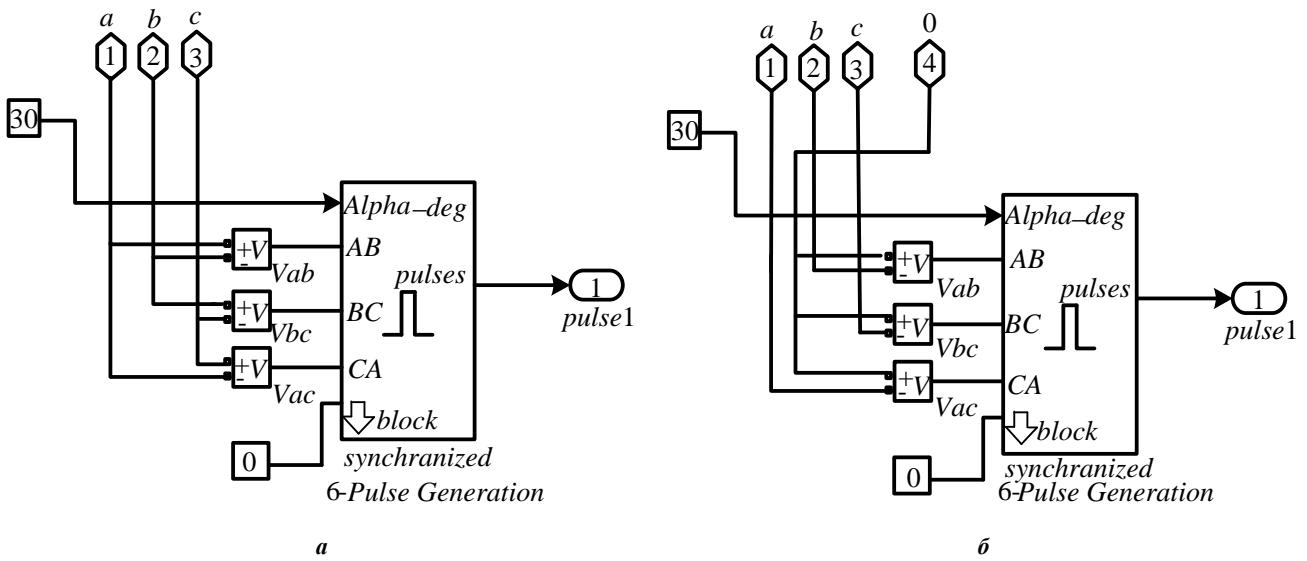


Рис. 6. Схема модуля системы управления для выпрямителя (а) и регулятора (б)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Целью экспериментальных исследований являлось следующее:

1) Проверка функционирования на одном блоке как всех элементов в отдельности, так и в целом устройств выпрямителя и регулятора переменного напряжения.

2) Оциллографирование напряжений и токов на нагрузке для этих преобразователей.

На **рис. 9** представлены осциллограммы МТВ и ТРН, снятые на общей для этих преобразователей экспериментальной установке, выполненной с возможностью перераспределения сопротивлений в цепях постоянного и переменного тока. Здесь же (см. **рис. 9**) представлены осциллограммы МТВ и ТРН, снятые на обобщенной математической модели в среде MatLab.

В результате математического моделирования и экспериментальных исследований было установлено, что одно и то же изделие может работать и как регулятор переменного напряжения, и как выпрямитель при любом характере нагрузок в цепях переменного и (или) постоянного тока.

На **рис. 10** представлен сравнительный анализ значений напряжения и тока одной фазы регулятора, полученных разными способами при работе ТРН на RL нагрузку с $\alpha = 60^\circ$. Здесь расчётные и экспериментальные кривые (**рис. 10, а-б**) приведены из сравнительного анализа в гл. 2.2 книги [6], а на **рис. 10, в** – получение на разработанной авторами модели.

При сравнении видно их хорошее совпадение. Таким образом, обобщенная математическая модель позволяет достоверно производить расчёт электромаг-

нитных процессов для преобразователей в переходных и стационарных режимах при любом характере нагрузки с выявлением любой электрической величины и характеристик устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Осциллограммы, полученные при математическом и физическом моделировании, адекватно отображают физические процессы в выпрямителях и регуляторах переменного напряжения.

Экспериментальная апробация показала работоспособность трёхфазного регулятора переменного напряжения, выполненного на основе серийно выпускаемого трёхфазного мостового выпрямителя. Выпуск регуляторов и выпрямителей можно производить с общей комплектацией на одном предприятии.

Обобщенная блочно-модульная модель предназначена для исследования не только трехфазных мостовых преобразователей, но и других устройств силовой электроники. На ее основе весьма просто выполняется построение моделей нулевых трехфазных и мостовых однофазных преобразователей.

Предложенный обобщенный подход к аналитическому описанию и исследованию процессов, их математическому моделированию, предопределяет унифицированный подход к производству широкого класса

преобразователей и существенно снижает трудоемкость при выполнении НИР и ОКР, проведении испытаний, составлении и ведении КД и серийного производства в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Забродин Ю. С. Промышленная электроника. М.: Высш.шк., 1982. 496 с.
2. Шубенко В.А., Шубенко В.А., Браславский И.Я. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением. М.: Энергия, 1972. 200 с.
3. Энергетическая электроника: справ. пособие / пер. с нем.; под ред. В. А. Лабунцова. М.: Энергоатомиздат, 1978. 464 с.
4. Чиженко И.М. Руденко В.С., Сенько В.И. Основы преобразовательной техники: учебник для вузов. 2-е изд. М.: Высш. шк., 1980. 424 с.
5. Климан В.С. Основы преобразовательной техники: учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т», 2010. 100 с.
6. Такеути Т. Теория и применение вентильных цепей для регулирования двигателей: пер. с англ. Л.: Энергия, 1973. 248 с.
7. Свидетельство РФ №2016617861 о регистрации программы для ЭВМ «Программа обобщенной математической модели в среде MatLab тиристорных преобразователей, ведомых сетью, для исследования физических процессов». Климан В.С. (RU), Йе Мин Тху (RU). Бюл. №8, 20.08.2016.

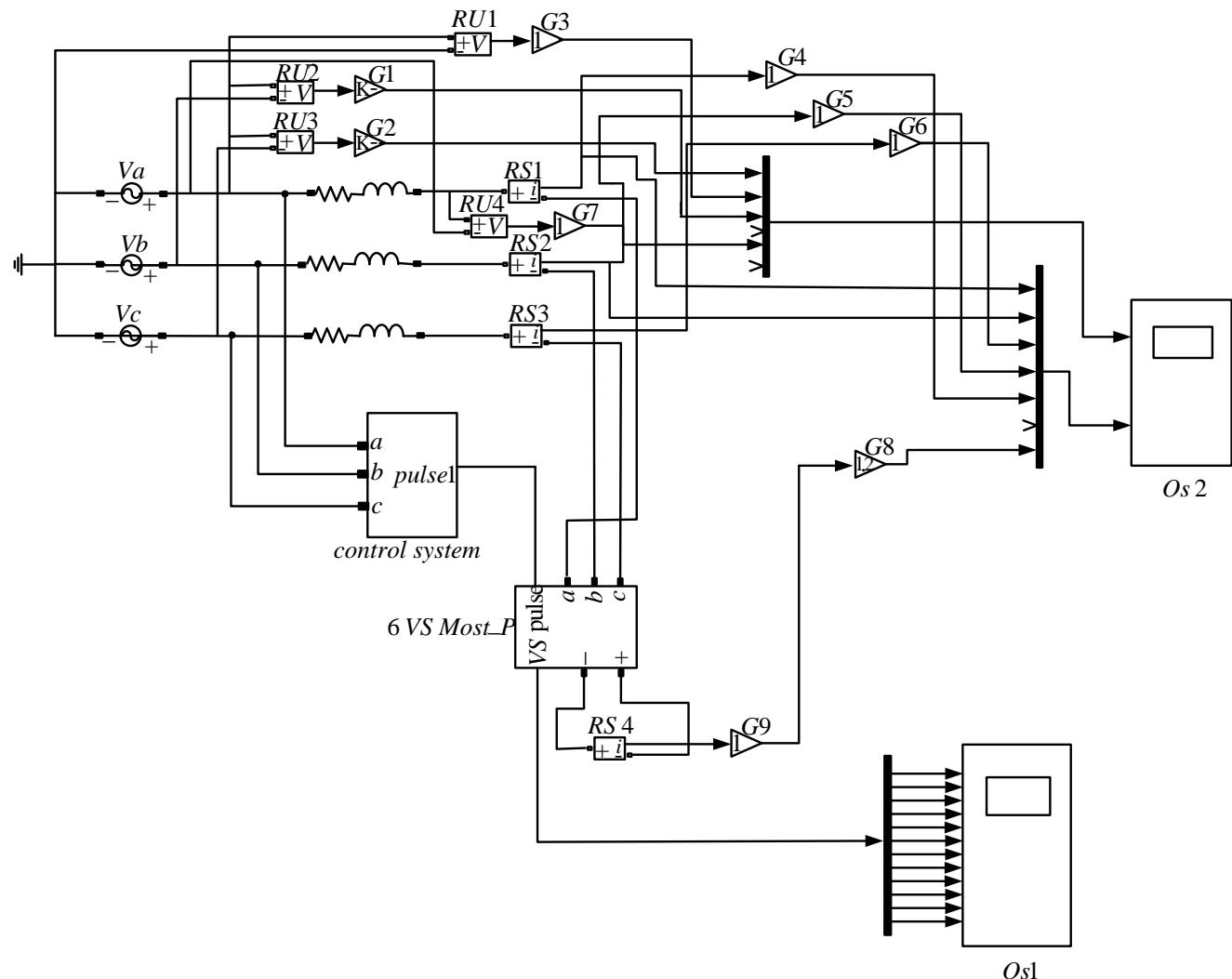


Рис. 7. Модель трехфазного регулятора переменного напряжения

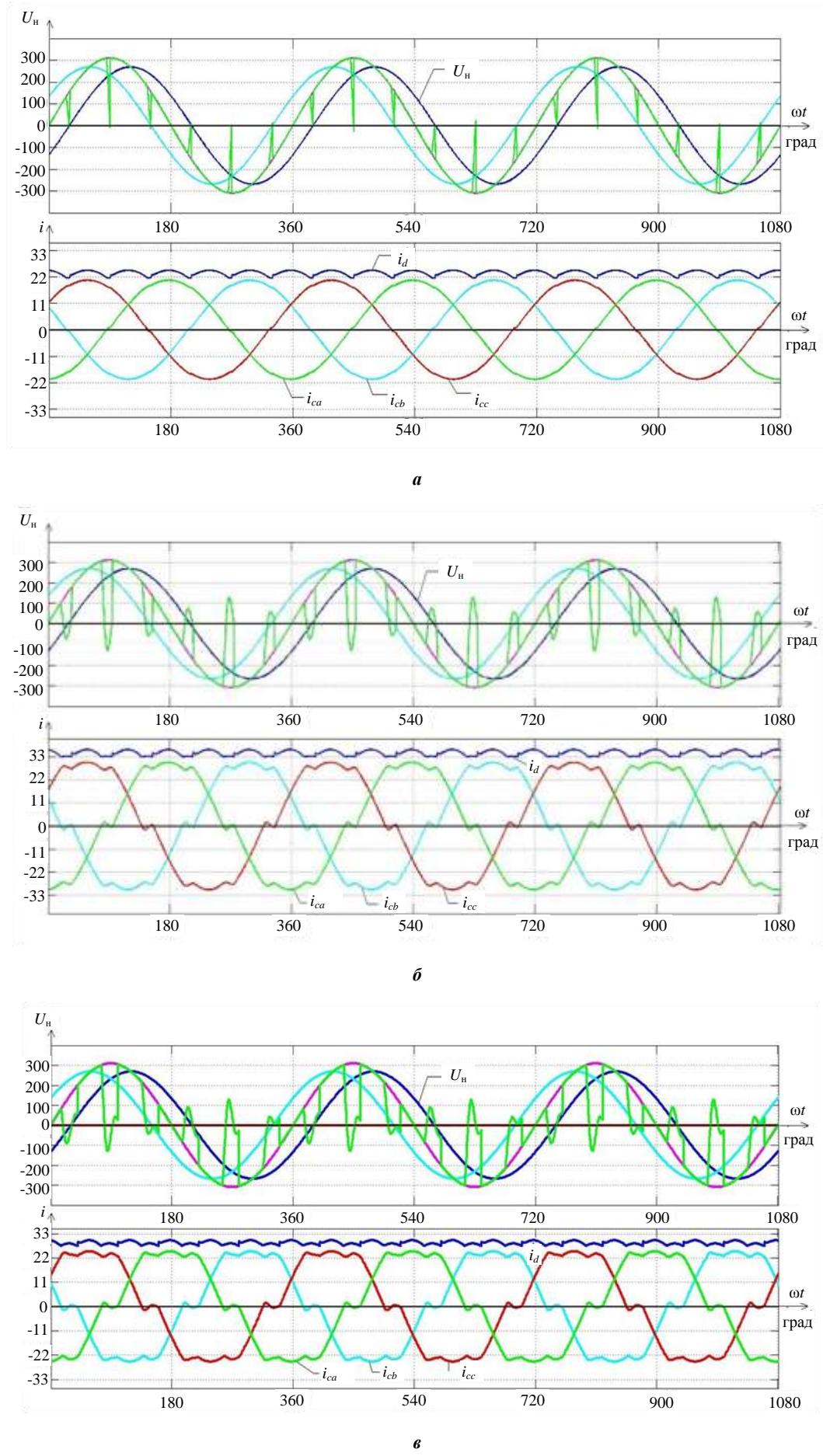


Рис. 8. Результаты численных экспериментов при $\alpha = 90^\circ$ (а), 95° (б), 100° (в) и RL нагрузке

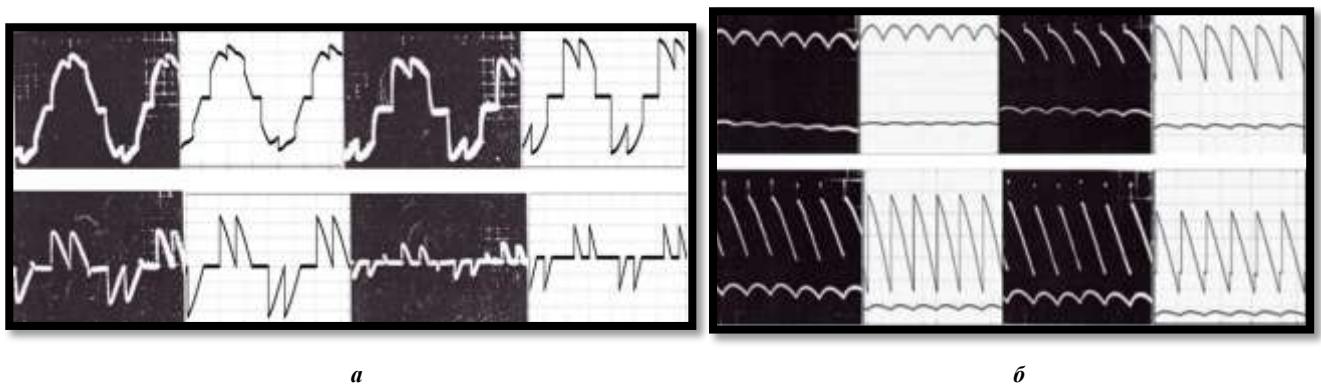


Рис. 9. Осциллографмы экспериментальной установки и обобщенной математической модели для регулятора переменного напряжения (а) и выпрямителя (б)

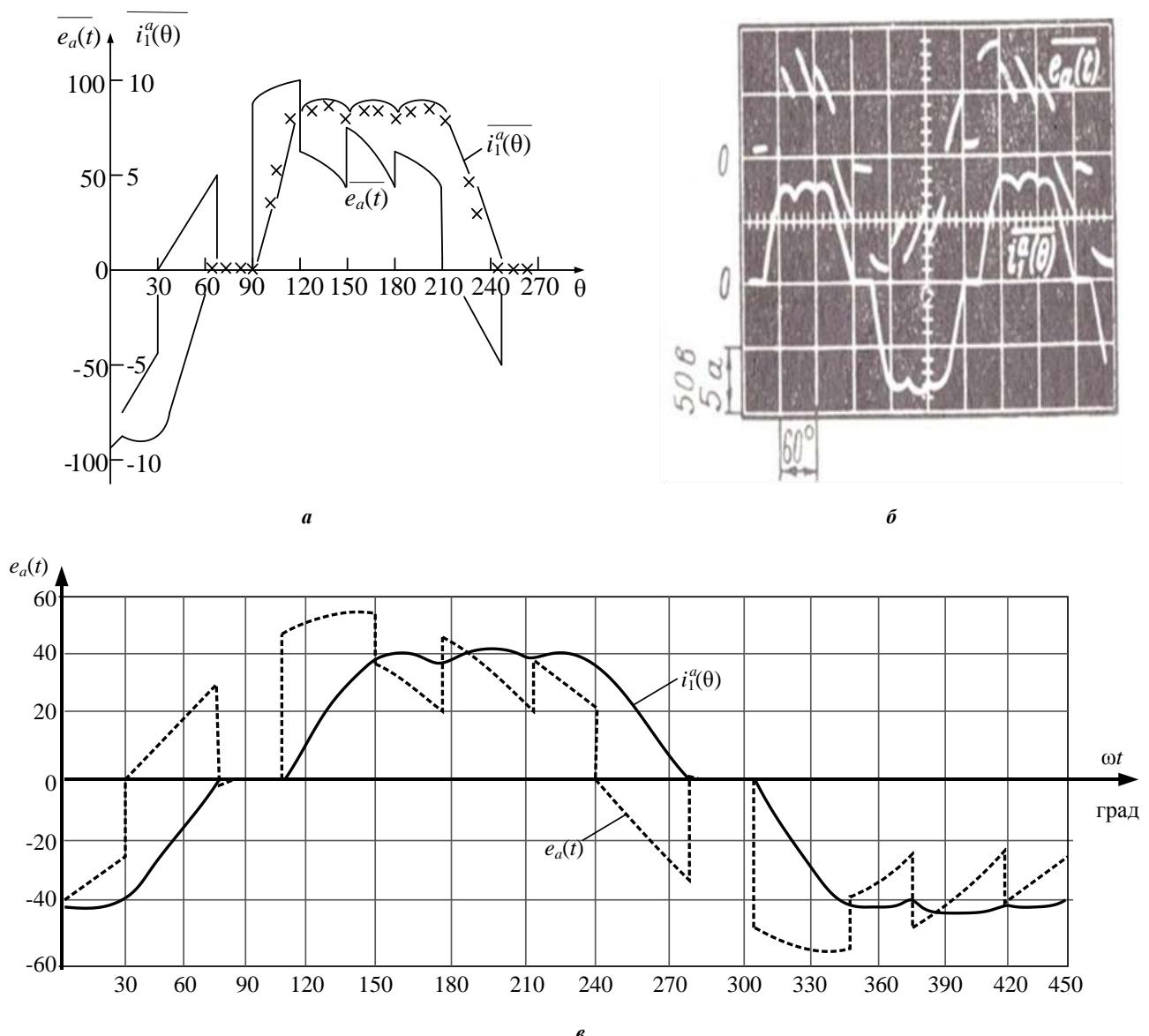


Рис. 10. Напряжения и токи, полученные по аналитическим выражениям (а), экспериментальным путем (б) и на обобщенной модели в среде MatLab (в)

INFORMATION IN ENGLISH

GENERIC MATHEMATICAL DESCRIPTION AND MODELING OF THYRISTOR CONVERTERS CONTROLLED BY POWER LINE

Vladimir S. Klimash

D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: klimash@yandex.ru

Ye Min Thu

A post-graduate student, Department of Applied Mathematics and Computer Science, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: mryeminthu08@gmail.com

The paper explains the similarity in the mathematical structure of three-phase thyristor variable voltage regulators and bridge-circuit rectifiers. Thus a generic mathematical model in Matlab environment was suggested; the model makes it possible to study these converters. As a result of this research work, a mathematical model was used to develop the design principles and an experimental installation was assembled, which can be used both as a rectifier and a variable voltage regulator.

Keywords: Direct current, alternating current, rectifier, variable voltage regulator generic mathematical model.

REFERENCES

1. Zabrodin Yu.S. *Promyshlennaya elektronika* [Industrial Electronics]. Moscow, High school Publ., 1982. 496 p.
2. Shubenko V.A., Braslavskiy I.Ya. *Tiristornyy asinkhronnyy elektroprivod s fazovym upravleniem* [Thyristor Asynchronous Drive with Phase Control]. Moscow, Energy Publ., 1972. 200 p.
3. Labuntsov V.A. *Energeticheskaya elektronika* [Power electronics]. A reference book. Translated from German. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1978. 464 p.
4. Chizhenko I.M. Rudenko V.S., Sen'ko V.I. *Osnovy preobrazovatelnoy tekhniki* [Fundamentals of Converting Equipment]. 2nd edition. Moscow, High school Publ., 1980. 424 p.
5. Klimash V.S. *Osnovy preobrazovatelnoy tekhniki* [Fundamentals of Converting Equipment]. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur State Technical University Publ., 2010. 100 p.
6. Takeuti T. *Teoriya i primenenie ventilnykh tsepey dlya regulirovaniya dvigateley* [Theory and Application of Valve Circuits to Control Motors]. Translated from English. Leningrad, «Energy», 1973. – 248 p.
7. Klimash V.S., Ye Min Thu Certificate RF NO2016617861 of software registration for computers "Software of generic mathematical model in MatLab environment for thyristor converters controlled by power line for investigation of physical processes". Bulletin no.8, 20.08.2016.

Клиш В.С., Йе Мин Тху Обобщенное математическое описание и моделирование тиристорных преобразователей, ведомых сетью // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С.78-86. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-78-86

Klimash V.S., Ye Min Tkhu Generic Mathematical Description and Modeling of Thyristor Converters Controlled by Power Line. *Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp. 78-76. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-78-86