УДК 621.314.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В.С. Климаш, Йе Мин Тху

Приводятся обобщенные уравнения, описывающие физические процессы в квазистационарных и динамических режимах работы целого класса вентиленых преобразователей (выпрямители, инверторы ведомые сетью, конверторы и циклоконверторы). Расчётами в среде MatLab показаны процессы для мостовой схемы с назгузками в цепях переменного и постоянного тока. Приводится также динамика процессов пуска промышленной RL–нагрузки через выпрямитель с дросселем в цепи постоянного тока. Эти процессы сравнивались с включением RL–нагрузки электрическим аппаратами. Показана полезность применения выпрямителя для включения промышленных нагрузок переменного тока.

Ключевые слова: регулятор переменного напряжения, трехфазная RL–нагрузка, пусковые режимы, электрические и электронные аппараты.

Обобщенное математическое описание преобразователей ведомых сетью. При исследовании вентиленых преобразователей ведомых сетью будем учитывать параметры нагрузок в цепях переменного и постоянного тока. Трёхфазным мостовым схемам свойственны двуфазная и трёхфазная проводимость, когда в работе находятся соответственно два и три вентиля.

Дифференциальное уравнение, описывающее электромагнитные процессы в трёхфазных тиристорных схемах при двухфазной проводимости (в межкоммутационный интервал), имеет вид

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

где U_1, U_2 – входное и выходное фазные напряжения; I_1 - входной ток; R_a, L_a- сопротивление и индуктивность рассеяния трансформатора; $R_{d,}$ L_d- сопротивление и индуктивность нагрузки постоянного тока; R_n, L_n- сопротивление индуктивность нагрузки переменного тока; R_{vs}- сопротивление открытого тиристора;K_d, K_n- коммутационные функции преобразователей.

$$\frac{dI_2}{dt} = \frac{\begin{array}{c} U_1 - U_2 - 2\,.\,(2R_{VS} + R_a + 2K_nR_n + K_dR_d) + \\ + (R_{VS} + R_a + K_nR_n)\frac{L_a + K_nL_n + K_dL_d}{L_a + K_nL_n} \end{array}}{3(L_a + K_nL_n) + 2K_dL_d} -$$

$$- \frac{\begin{array}{c} I_3(2R_{VS} + R_a + 2K_nR_n + K_dR_d) - \\ -((R_{VS} + R_a + K_nR_n)\frac{L_a + K_nL_n + K_dL_d}{L_a + K_nL_n} \end{array}}{3(L_a + K_nL_n) + 2K_dL_d} -$$

$$- \frac{(U_2 - U_3)\frac{L_a + K_nL_n + K_dL_d}{L_a + K_nL_n}}{3\,(L_a + K_nL_n) + 2K_dL_d} \qquad (2)$$

$$\frac{dI_3}{dt} = \frac{\begin{array}{c} U_2 - U_3 - I_3(R_{VS} + R_a + K_nR_n) + \\ +I_2(R_{VS} + R_a + K_nR_n) + \frac{dI_2}{dt}(L_a + K_nL_n) \end{array}}{L_a + K_nL_n},$$

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

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

Уравнения (1) и (2) описывают физические процессы трех устройств:

а) тиристорного выпрямителя, если K_n= 0 и K_d =1, т.е. нагрузка включена только в цепь постоянного тока;

б) регулятора переменного напряжения, если $K_n = 1$ и K_d = 0, т.е. нагрузка включена в цепь переменного тока;

в) пускорегулирующего устройства, если = 1 и = 1, т.е. нагрузка включена в цепь переменного тока, а пусковой реостат или дроссель насыщения - в цепь постоянного тока.

*Обобщенная математическая модель.*Математическая модель для исследуемых трех устройств [1 - 3] представлена на рис.1. Здесь нагрузка переменного тока включена между сетью и тиристорным блоком, а нагрузка постоянного тока - на выходе тиристорного блока. Наличие двух нагрузок на стороне постоянного и переменного тока находит практическое применение, например, в пускорегулирующих устройствах промышленных нагрузок, в частности, 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.

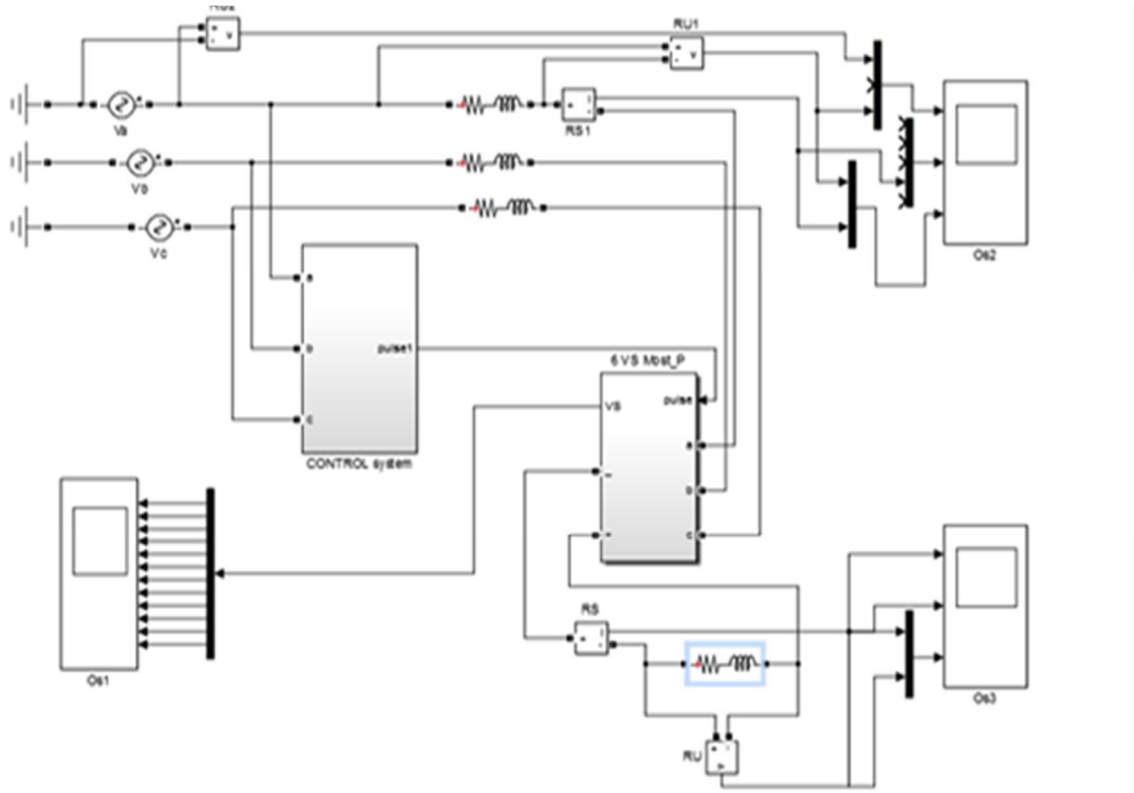

Рис. 1. Блочно-модульная математическая модель преобразователей, ведомых сетью в среде MatLab

Результаты исследований. Исследования выпрямителя и регулятора переменного напряжения на обобщенной модели приведены и описаны в рис.2 – 3[4 – 9].

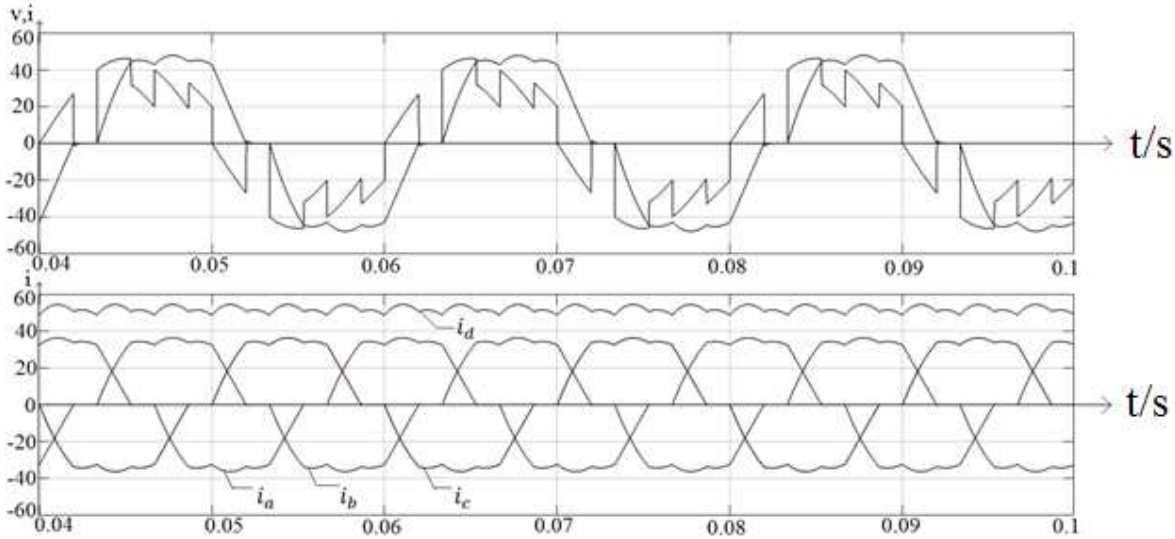

Рис. 2. Осциллограммы тиристорного регулятора переменного напряжения; напряжение U_d и ток i_d нагрузки (сверху) ; трёхфазного тока сети i_a, i_b, i_c, выпрямленного тока i_d в закороченном диагональю месте (снизу)

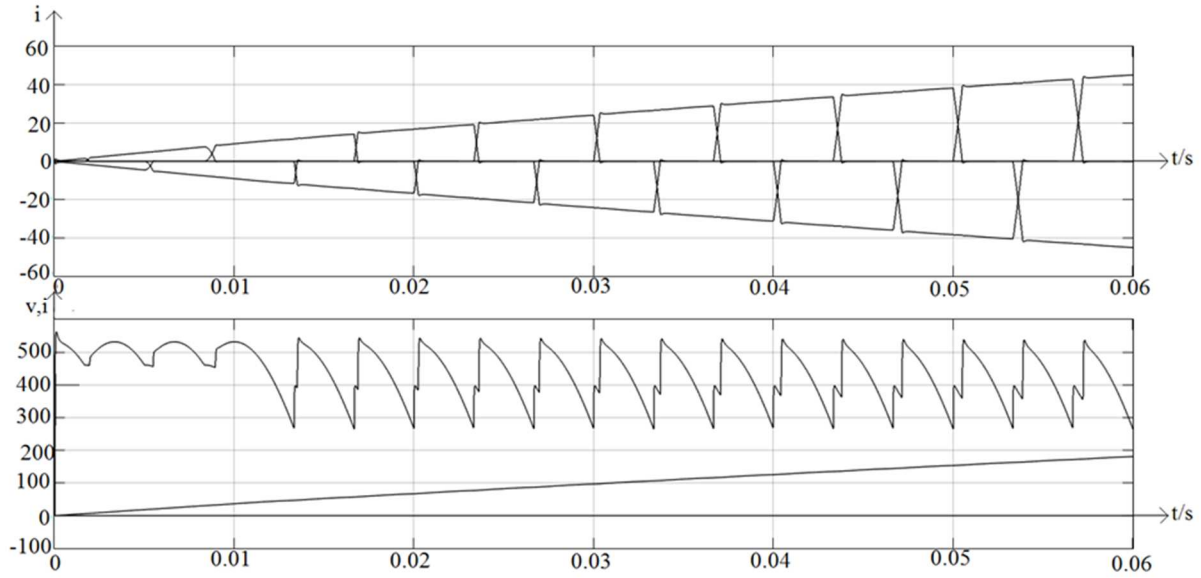

Рис. 3. Осциллограммы выпрямителя при пуске RL- нагрузки

Рассмотрим подробнее пусковые режимы промышленных RL–нагрузок. На рис. 2 приведены пусковые токи при пуске трёхфазной нагрузки электрическим аппаратом (рис. 2, сверху) и гибридным электронно-электрическим аппаратом на основе выпрямимителя и шуктирующего контактора (рис. 2, снизу). Из этого численого эксперимента видно, что трёхфазная нагрузка при включении электрических аппаратов создает большое увеличение токов и динамических ударов по электрической части оборудования, а при помещи гибридного аппарата производится безударное включение с плавным нарастанием токов (рис.4).

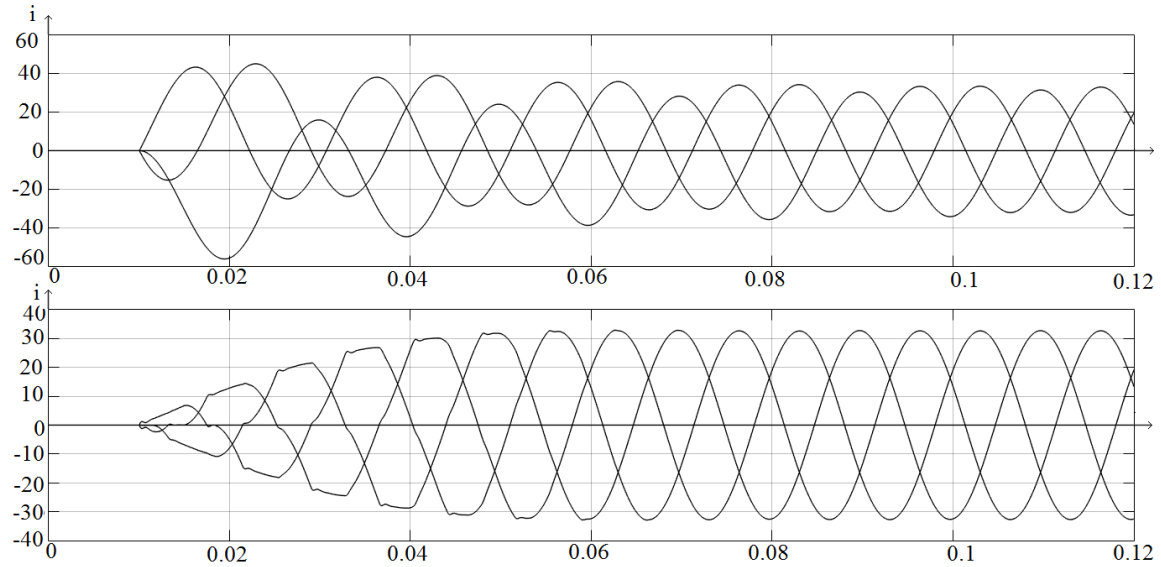

Рис. 4. Осциллограммы пусковых токов RL –нагрузки и включение электрическим аппаратом (сверху) и гибридным электронно-электрическим аппаратом (снизу)

Происходящие физические процессы электронно-электрического пускателя представлены на рис. 3. Включение электронным пускателем производится с высоким быстродействием без превышения токами их установившихся значений. После завершения пуска электронная часть пускателя шунтируется контактором и иключается из схемы электропитания промышленого оборудования [10 – 14].

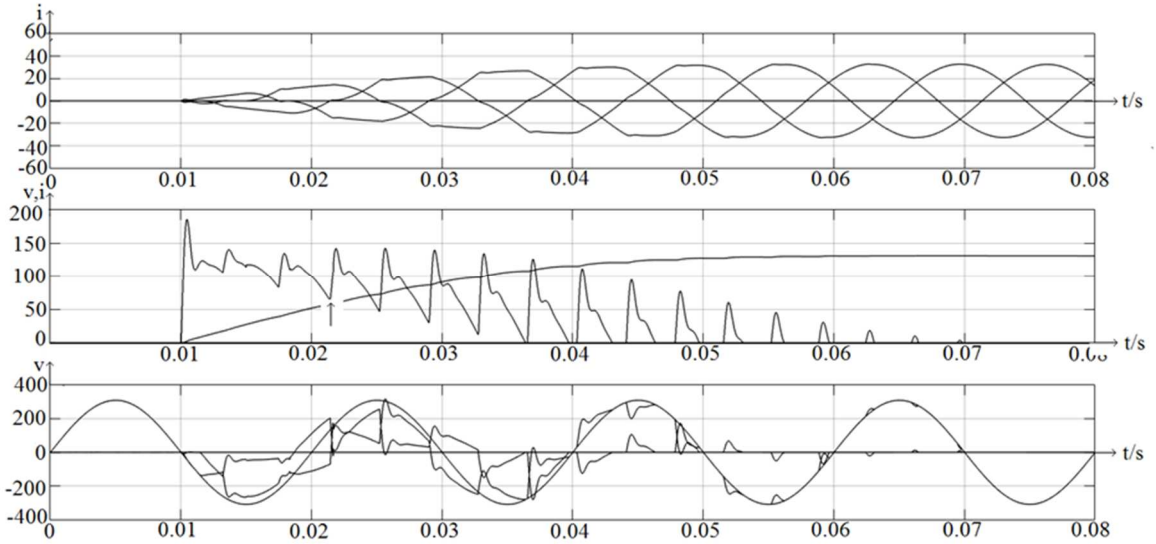

Рис. 5. Осциллограммы безударного включения трёхфазной RL- нагрузки через выпрямитель с последующим его шунтированием кантактором

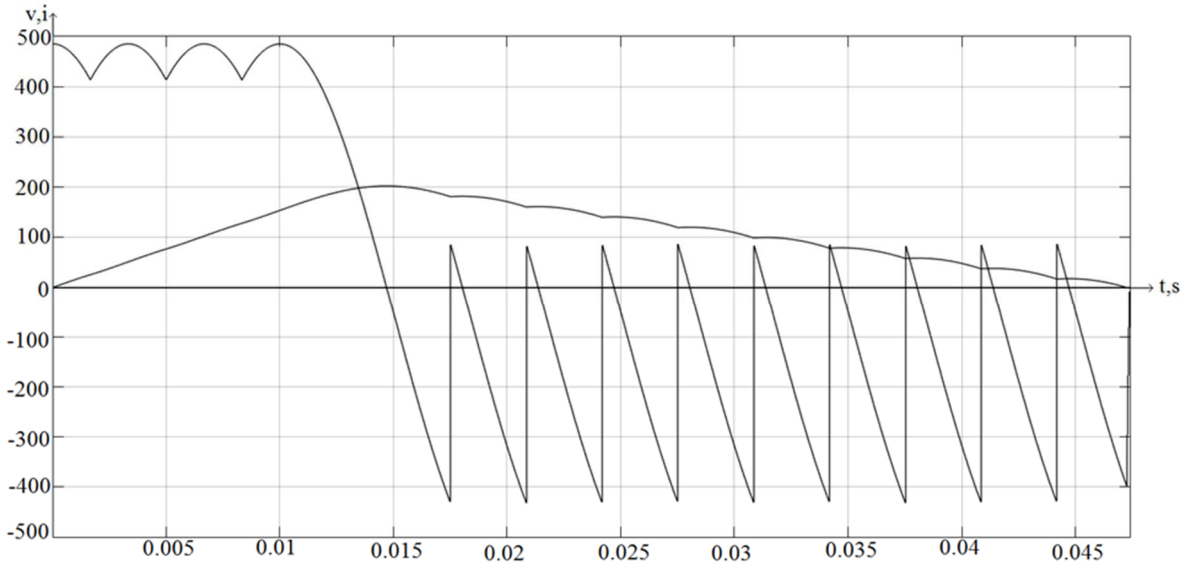

Рис. 6. Осциллограммы напряжения u_d и тока i_d при переходе выпрямителя в инверторный режим

В циклопереключателях управляющий сигнал имеет синусоидальную форму. Каждая тиристорная группа с двухсторонним управлением током работает в режимах выпрямителя и инвертора с угловой переупаковкой с α на π-α при приближении к току нагрузки до нуля [15 - 19] (рис.5, 6).

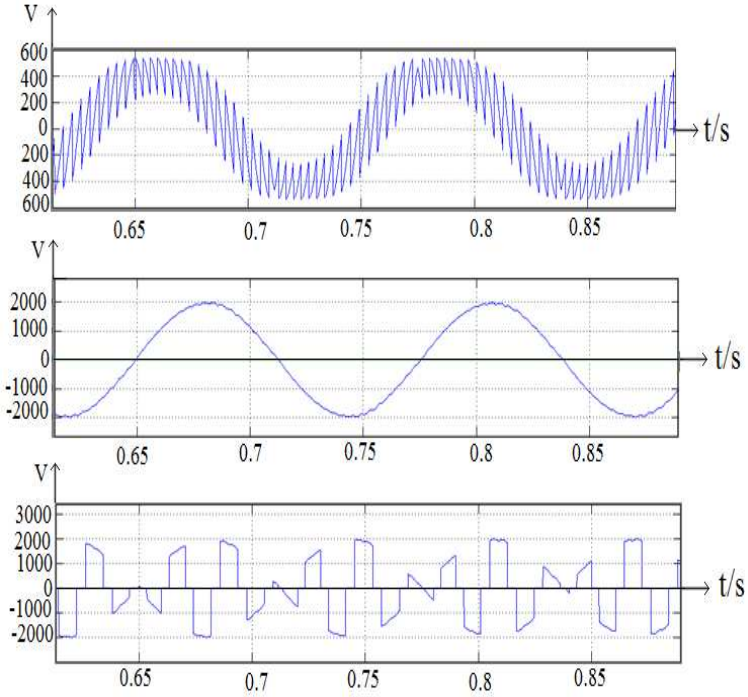

Рис. 7. Осциллограммы циклоконвертора: напряжение нагрузки (сверху); ток нагрузки (в середине); фазной ток сети (снизу)

Выводы:

1. обобщенная имитационная модель позволяет исследовать устройства, относящиеся к классу преобразователей ведомых сетью.

2. в результате численных экспериментов на обобщенной модели получены физические процессы для выпрямителя и инвертора с нагруской в цепи постоного тока, конвертора и циклоконвертора с нагруской в цепи переменного тока, пускового электронного устройстава с нагруской в цепи постоянного и переменного тока.

3. расчётные на обобщенной модели электрические величины адекватны экспериментальным.

Список литературы

1. Климаш В.С. Основы преобразовательной техники:учебное пособие. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2010. 100с.

2. Климаш В.С., Йе Мин Тху. Свидетельство РФ № 2016617861 о регистрации программы для ЭВМ "Программа обобщенной математической модели в среде MatLab. тиристорных преобразователей ведомых сетью для исследования физических процессов" // Бюл. № 8. 20.08.2016.

3. Климаш В.С., Йе Мин Тху. Обобщенное математическое описание и моделирование тиристорных преобразователей, ведомых сетью // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С. 78-86.

4. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. М.: Высш.шк, 1982. 496 с.

5. Шубенко В.А., Браславский И.Я. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением. М.: Энергия, 1972. 200 с.

6. Такеути Т. Теория и применение вентильных цепей для регулирования двигателей. Л.: Энергия, 1973. 248 с.

7. Чиженко И.М., Руденко В.С., Сенько В.И. Основы преобразовательной техники: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1980. 424 с.

8. Полуянович Н.К. Силовая электроник: учеб. пособие. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. 204с.

9. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0: учеб. пособие. СПб: КОРОНА принт,2001. 320с.

10. Иванов А.Г., Белов Г.А., Сергеев А.Г. Системы управления полупродиковыми преобразователями. Чебоксары: Изд-во Чуваш.ун-та 2010.448 с.

11. Черных И.В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем, 2003. 252с.

12. Черных И.В. SimPowerSystems: Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink. М., 2008. 10 с.

13. Климаш В.С., Йе Мин Тху.Теоретические и экспериментальные исследования тиристорных преобразователей, ведомых сетью// Электрооборудование: эксплуатация и ремонт, 2017. №7. С. 5-10.

14. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника: учеб. для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 632 с.

15. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design, Hoboken, NJ: JohnWiley&Sons, 2003. 802 p.

16. Панфилов Д.И., Иванов В.С., Чепурин И.Н. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: практикум на Electronics Workbench: Электротехника. М., Додэка, 1999. Т. 1. 304 с.

17. Панфилов Д.И., Иванов В.С., Чепурин И.Н. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: практикум на Electronics Workbench: Электроника. М., Додэка, 2000. Т. 2. 288 с.

18. Klimash V.S., Ye Min Thu. Generalized Mathematical Description and Simulation of Grid-Tied Thyristor Converters // International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol:11 No: 11, 2017.

19. Патент 2658321 РФ. Способ построения системы управления трехфазным мостовым выпрямителем и трехфазным регулятором переменного напряжения и устойство для его реализации / В.С. Климаш (RU), Йе Мин Тху (RU). Бюл. № 6. Опубл. 20.06.2018.

Климаш Владимир Степанович, д-р техн. наук, профессор, klimash@yandex.ru, Россия, Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет,

Йе Мин Тху, аспирант, mryeminthu08@gmail.com, Россия, Комсомольск-на-Амуре, Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

MATHEMATICAL MODELING OF POWER ELECTRONICS DEVICES IN POWER SUPPLY AND ELECTRIC DRIVE SYSTEMS

V.S. Klimash, Ye Min Thu

The paper describes summarized equations describing physical processes in quasi steady and dynamic operation modes of the entire class of valve inverters (rectifiers, network driven inverters, converters and cycle-converters). MatLab calculations depict processes for a bridge joint with loads in AC/DC circuits. The paper also considers the dynamics of processes related to starting industrial RL-load through a reactor equipped rectifier within the direct current circuit. Those processes have been compared with RL-load starting by electrical devices. Practicality of the rectifier utilization with regards to starting production loads of alternate current is represented.

Key words: variable voltage regulator, three-phase RL–load, start-up modes, electrical and electronic devices.

Klimash Vladimir Stepanovich, doctor of technical sciences, professor, klimash@yandex.ru, Russia, Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-on-Amur State Technical University,

Ye Min Thu, postgraduate, mryeminthu08@gmail.com, Russia, Komsomolsk-on-Amur, Komsomolsk-on-Amur State Technical University

УДК 62-523

АНАЛИТИЧЕСКОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМЫ УП-Д

Э.Н.Подборский, П.Э.Подборский

Анализируется электропривод постоянного тока двухмассовой системы «управляемый преобразователь - двигатель». Предложен критерий оптимальности и получена аналитическая формула регулятора, позволяющего учесть ограничения типа неравенств на напряжение управления и все координаты.

Ключевые слова: электропривод постоянного тока, электромеханическая система, двухмассовая система, система управления, двухточечная краевая задача, оптимальное управление, критерий оптимальности, аналитическое конструирование регуляторов, АКОР, квадратичный функционал.

В 60-х годах XX века А.М. Летовым была разработана теория об аналитическом конструировании регуляторов [1], которая в итоге сводилась к динамическому программированию и выводу уравнения Риккати. Рассматривались линейные системы и квадратичные функционалы с минимизацией энергии управления, а также с минимизацией энергии и скорости изменения энергии управления. С тех пор по линейному