Научная статья
Original article
УДК 621.314.5

КОММУТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В АВТОНОМНОМ ИНВЕРТОРЕ НАПРЯЖЕНИЯ С МЕЖДУФАЗОВОЙ КОММУТАЦИЕЙ

SWITCHING PROCESSES IN AN AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTER WITH INTER-PHASE SWITCHING

Ладенко Николай Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехники и электрических машин» института «Нефти, газа и энергетики», ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Россия, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2. E-mail: lad.kolya@yandex.ru

Церковный Анатолий Евгеньевич, кандидат технических наук, профессор кафедры «Электротехники и электрических машин» института «Нефти, газа и энергетики», ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Россия, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2

Креминский Богдан Олегович, аспирант, старший преподаватель кафедры «Электротехники и электрических машин» института "Нефти, газа и энергетики", ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Россия, 350072, г. Краснодар, улица московская, 2. E-mail: bogdankreminskii@mail.ru

Сурков Александр Сергеевич, студент кафедры «Электротехники и электрических машин», институт «Нефти, газа и энергетики», ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Россия, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2. E-mail: kolipo333@yandex.ru

Жилин Ярослав Игоревич, *с*тудент кафедры «Электротехники и электрических машин», институт «Нефти, газа и энергетики», ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Россия, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2.
E-mail: aroslavl1905@mail.ru

Ladenko Nikolay Vasilyevich, PhD, Associate Professor of the Department of "Electrical Engineering and Electrical Machines" of the institute «Oil, gas and energy», Kuban State Technological University, Russia, 350072, Krasnodar, Moskovskaya street, 2.
E-mail: lad.kolya@yandex.ru
Tserkovny Anatoly Evgenyevich, PhD, Professor of the Department of "Electrical Engineering and Electrical Machines" of the institute «Oil, gas and energy», Kuban State Technological University, Russia, 350072, Krasnodar, Moskovskaya street, 2.
Kreminsky Bogdan Olegovich, postgraduate, Senior Lecturer, Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, institute «Oil, gas and energy», Kuban State Technological University, Russia, 350072, Krasnodar, Moskovskaya street, 2. E-mail: bogdankreminskii@mail.ru
Surkov Alexander Sergeyevich, student of "Electrical engineering and electrical machines" chair, institute «Oil, gas and energy», Kuban State Technological University, Russia, 350072, Krasnodar, Moskovskaya street, 2.
E-mail: kolipo333@yandex.ru
Zhilin Yaroslav Igorevich, student of "Electrical Engineering and Electrical Machines" department, institute «Oil, gas and energy», Kuban State Technological University, Russia, 350072, Krasnodar, Moskovskaya street, 2.
E-mail: aroslavl1905@mail.ru

Аннотация

В настоящее время сохраняется большое количество оборудования построенного на тиристорах. Это вызвано причинами экономического

характера. С другой стороны технологическое оборудование притерпевает относительно медленную модернизацию. Основными элементами подлежащим скорой замене являются двигатели. Это обусловлено быстрым износом и низкими энергетическими и эксплуатационными характеристиками машин старых серий.

Основные схемы, применяемые в частотном приводе, это автономные инверторы напряжения. Это продиктовано возможностью регулирования частоты напряжения, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения. Существует целый ряд схемных решений построения данных устройств. Наиболее удачными представляются мостовые схемы с коммутирующими элементами.

Annotation

Currently there is a large amount of equipment built on thyristors. This is caused by economic reasons. On the other hand technological equipment is undergoing relatively slow modernization. The main elements to be replaced soon are motors. This is due to the rapid wear and tear and the low power and performance characteristics of the machines of the old series.

The main circuits used in frequency drives are autonomous voltage inverters. This is dictated by the possibility of voltage frequency control, both in the direction of decreasing and increasing. There is a number of schematic solutions for the construction of these devices. Bridge circuits with switching elements seem to be the most successful.

Ключевые слова: инверторы, тиристоры, коммутация, дозаряд, относительный угол.

Key words: inverters, thyristors, commutation, overcharge, relative angle.

Инверторы такого типа содержат минимальное число тиристоров — шесть, которые одновременно выполняют функции и рабочих, и коммутирующих. На рисунке 1,а показана схема АИН с LC-коммутирующими

контурами. Порядок включения тиристоров, соответствует их номерам на схеме, длительность проводящего состояния $\theta_к = 2\pi/3$.

Для включения инвертора необходимо включить один тиристор в анодной и один в катодной группах, например Т1 и Т2. Начальные условия в схеме нулевые: $U_{C0} = 0$, $I_{C0} = 0$, $I_{s0} = 0$ (эквивалентная схема приведена на рисунке 1,б). Значения рабочего тока $i_{s,0} = -i_{s,c}$в любой момент времени легко получить, зная параметры нагрузки АИН.

Изменение напряжения на коммутирующих конденсаторах при включении:

$$\Delta u_{C,i*} = \Delta u_{C1*} = \Delta u_{C3*} = -0.5\Delta u_{C5*} = 0.5\Delta u_{C2*} = -\Delta u_{C4*} = -\Delta u_{C6*}$$

где $\Delta u_{C,i*} = 1 - e^{-k_\delta t_*}(k_\delta sint_* + cos\, t_*)$; $k_\delta = \frac{r\sqrt{C}}{2\sqrt{L}}$; $t_* = \frac{t}{\sqrt{LC}}$.

Здесь и далее полярность напряжения на коммутирующем конденсаторе принята положительной, если возможна коммутация тиристора, имеющего тот же номер, что и конденсатор (С1 при выключении Т1 должен иметь плюс напряжения на левой пластине, С2 при выключении Т2 — плюс на левой и т. д.). Соответственно за положительное направление тока i_c выбрано направление, при котором происходит увеличение положительного напряжения на конденсаторе.

После окончания процесса заряда конденсаторов ток на коммутирующих конденсаторах $i_{C,i*} = 0$ и напряжение на конденсаторах не изменится до начала очередной, в данном случае первой коммутации.

Для выключения тиристора, например Т1 в момент $t = {}^{T_s}/_{3}$, открывается очередной тиристор этой же группы (Т3 для выключения Т1, Т4 для выключения Т2 и т.д.).

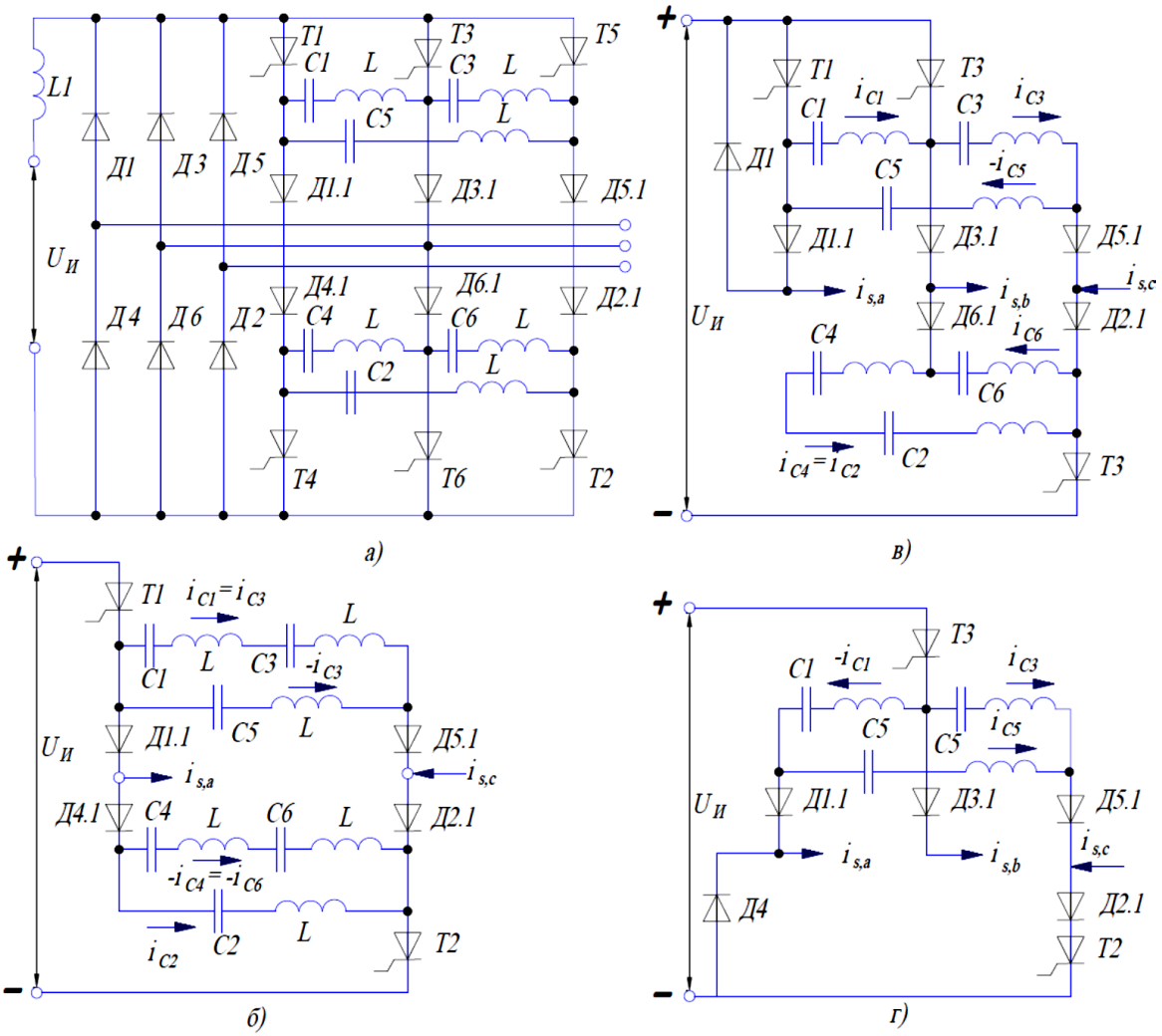

Рисунок 1 - АИН с LC - коммутирующими контурами:

а - схема;

б - эквивалентная схема при включении;

в - эквивалентная схема для первого этапа коммутации;

г - эквивалентная схема для второго этапа коммутации

Процесс коммутации состоит из двух этапов: этапа свободного перезаряда и этапа дозаряда конденсаторов от источника.

Процесс коммутации иллюстрируется диаграммой токов и напряжений, показанной на рисунке 2.

При включении тиристора Т3 ($t = 0$ на рисунке 2) образуются контур свободного перезаряда конденсатора С1, контуры перезаряда конденсаторов

С3, С5 от источника $U_и$ через диод Д5.1 и контур дозаряда конденсаторов С2, С4, С6 через диод Д3.1 (см. рисунок 1,в).

Токи в конденсаторах на первом этапе коммутации.

$$\left.\begin{aligned} -i_{C1*} &= U_{C01*}e^{-k_\delta t_*}sint_*, \\ i_{C3*} &= (1-U_{C03*})e^{-k_\delta t_*}sint_*, \\ -i_{C5*} &= (1+U_{C05*})e^{-k_\delta t_*}sint_*, \\ -i_{C6*} &= 2i_{C2*} = 2i_{C4*} = (1+U_{C06*})e^{-k_\delta t_*}sint_* \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

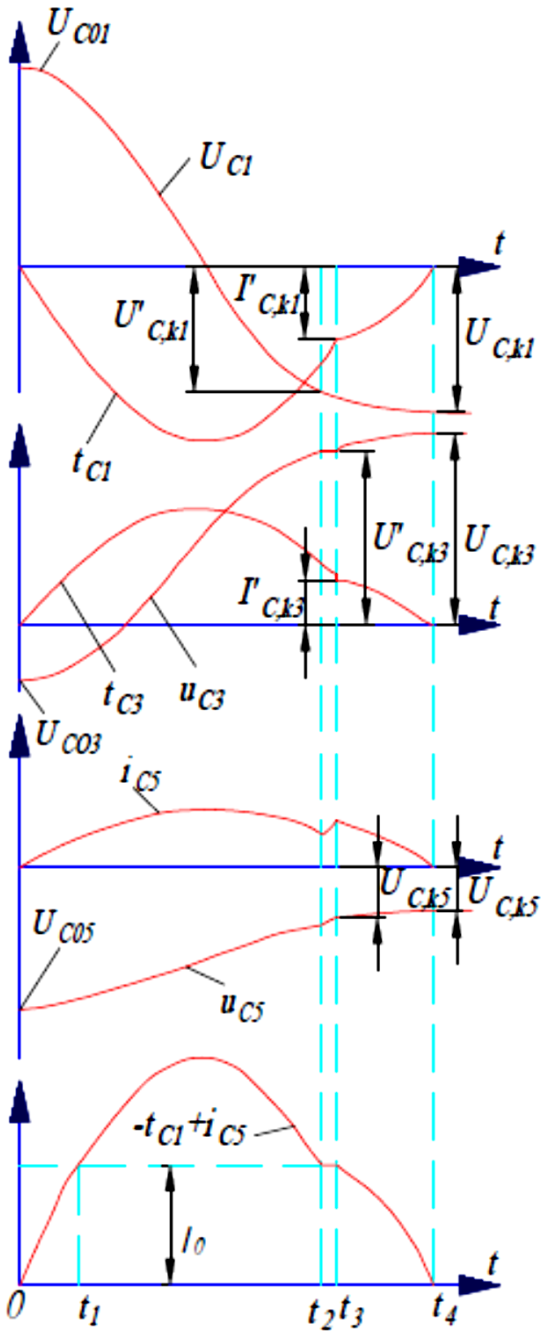

Рисунок 2 - Диаграмма токов и напряжений при коммутации в АИН с LC- коммутирующими контурами

В момент $t = t_1\ i_T = 0$, тиристор Т1 выключается и включается диод Д1, что не изменит уравнения (1), так как прямое падение напряжения на тиристорах и диодах при расчетах не учитывается. Поэтому перезаряд конденсаторов С1, С3, С5 согласно (1) будет проходить в течение $0 < t < t_2$

Изменение напряжения на конденсаторах группы, в которой происходит выключение тиристора:

$$\left.\begin{aligned} \Delta u_{C1*} &= -U_{C01*}[1 - e^{-k_\delta t_*}(k_\delta sint_* + cost_*)], \\ \Delta u_{C3*} &= (1 - U_{C03*})[1 - e^{-k_\delta t_*}(k_\delta sint_* + cost_*)], \\ \Delta u_{C5*} &= -(1 + U_{C05*})[1 - e^{-k_\delta t_*}(k_\delta sint_* + cost_*)], \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

Время, предоставляемое в схеме для выключения тиристору, $t_{B*} = t_{2*} - t_{1*}$.

Процесс дозаряда конденсаторов группы, в которой не происходит выключение тиристора, протекает только при отрицательном относительном напряжении конденсаторов $-U_{C06*} < 1$ - Это условие выполняется обычно при нескольких первых коммутациях после включения АИН. Дозаряд проходит в один этап:

$$\Delta U_{C6k*} = -(1 + U_{C06*})e^{-k_\delta \pi}: \quad (3)$$

$$\Delta U_{C2k*} = \pm\Delta U_{C4k*} = -0.5\Delta U_{C6k*} \quad (4)$$

Токи в конденсаторах в течение интервала $t_3 < t < t_4$ равны:

$$-i_{C1*} = (1 + U'_{C,k1*})e^{-k_\delta t_*}sint_* + I'_{C,k1*}e^{-k_\delta t_*}(k_\delta sint_* + cost_*) \quad (5)$$

$$i_{C3*} = i_{C5*} = 0.5\left(1 - U'_{C,k3*} - U'_{C,k5*}\right)e^{-k_\delta t_*}sint_* + \\ + I'_{C,k3*}e^{-k_\delta t_*}(k_\delta sint_* + cost_*) \quad (6)$$

Длительность второго этапа коммутации определится из условия—

$$-i_{C1*} + i_{C3*} = 0 \quad (7)$$

Изменение напряжения на конденсаторах в течение второго этапа коммутации:

$$-\Delta u'_{C1*} = \left(1 + U'_{C,k1*}\right)[1 - e^{-k_\delta t_*}(k_\delta sint_* + cost_*)] +$$

$$+I'_{C,k1*}e^{-k_\delta t_*}sint_* \quad (8)$$

$$\Delta u'_{C3*} = \Delta u'_{C5*} =$$

$$= \left(\frac{1+U'_{C,k1*}}{2}\right)[1 - e^{-k_\delta t_*}(k_\delta sint_* + cost_*)] + I'_{C,k3*}e^{-k_\delta t_*}sint_* \quad (9)$$

Уравнения (1) — (9) могут быть распространены на коммутацию любого тиристора. В этом случае первым считается тиристор, выключающийся при рассматриваемой коммутации, а вторым, третьим и т. д. — тиристоры, момент включения которых отстает от первого на $T_s/6$, $T_s/3$ и т. д.

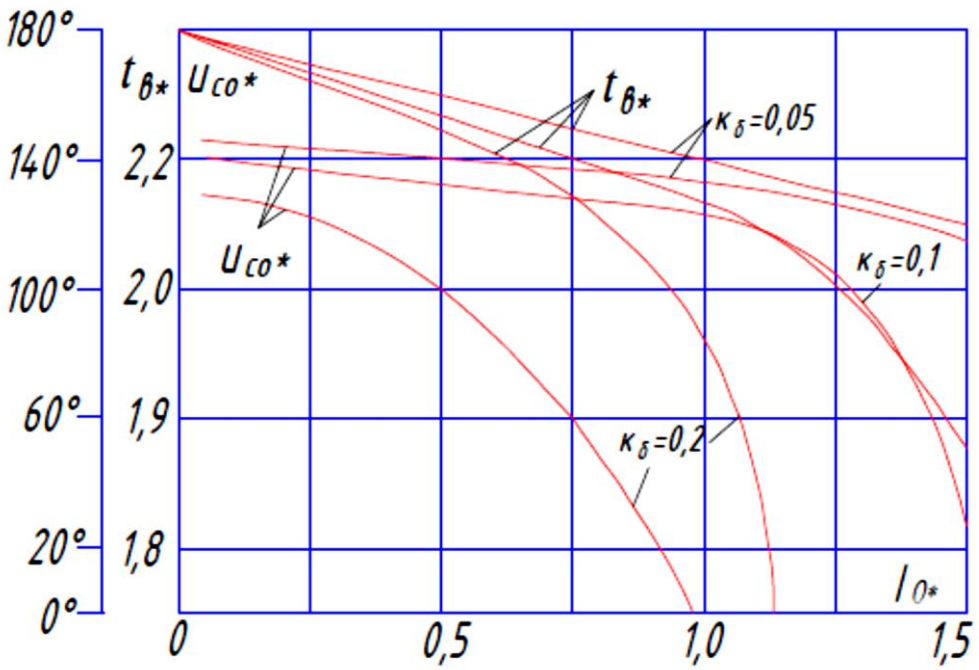

Рисунок 3 - Обобщенные установившиеся характеристики $U_{C0*}(I_{0*})$, $t_в$ (I_{0*}) АИН с LC- коммутирующим контуром при коэффициенте заполнения управляющих импульсов k_δ=0,05; 0,01 и 0,2

Последовательным решением (1) — (9) находятся начальные значения напряжений на конденсаторах при всех последующих коммутациях, вплоть до установившегося значения. При решении (1) — (9) одновременно определяется время $t_{в*}$ для каждой коммутации. Так как коммутация

тиристоров в анодной и катодной группах проходит независимо, то расчет проводится лишь для одной группы.

Полученные в результате такого решения обобщенные характеристики относительных значениях напряжения на конденсаторе от токов $U_{C0*}(I_{0*})$ и времени включения от тока $t_{B*}(I_{0*})$ для установившегося режима при коэффициенте заполнения управляющих импульсов $k_\delta = var$ приведены на рисунке 3. Их главная особенность — малая жесткость при увеличении коэффициента затухания, поэтому для устойчивой коммутации такого инвертора коммутирующие контуры должны иметь высокую добротность.

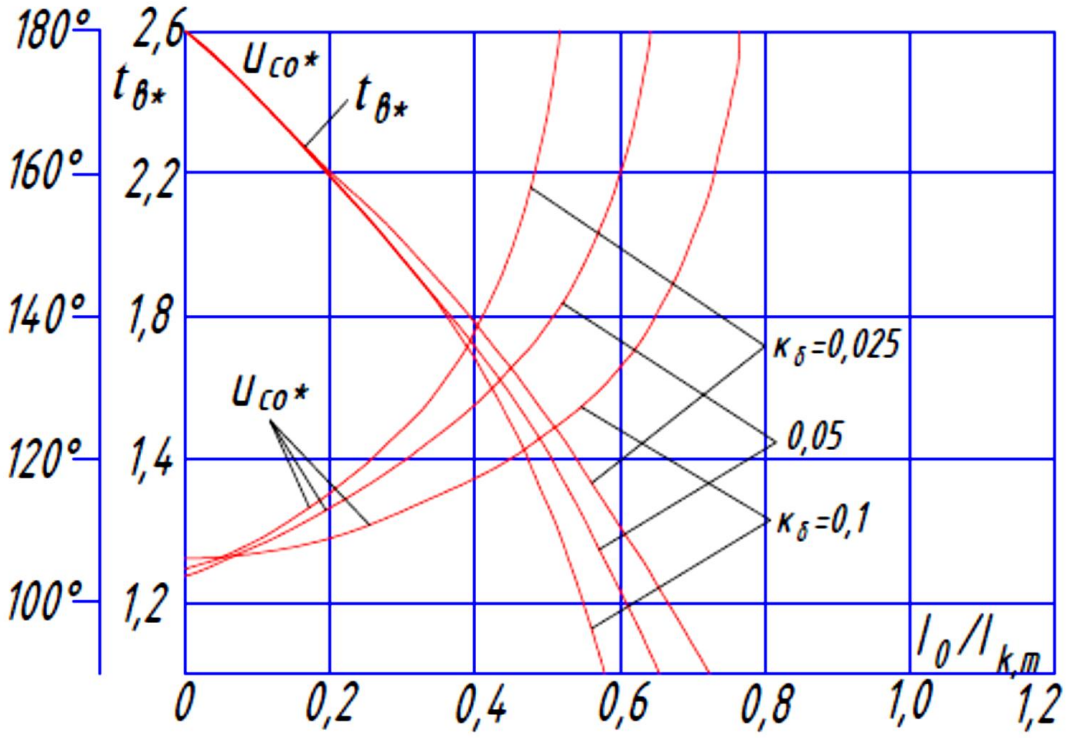

Рисунок 4 - Характеристики $U_{C0*}(I_0/I_{k,m})$, $t_в$ $(I_0/I_{k,m})$ АИН с двухступенчатой коммутацией и LC- коммутирующим контуром при $к_\delta$=0,025; 0,05 и 0,1

На этих графиках представлены относительные значения напряжений и времени в зависимости от коэффициента заполнения управляющих импульсов, выходного напряжения нагрузки и времени заряда.

Полученные соотношения проиллюстрированы графиками, из которых наглядно видно: основные условия выбора коммутирующих контуров; время и моменты коммутации тиристоров; минимальную и максимальную скорости нарастания коммутирующего тока тиристоров. Также определили зависимость относительных токов, напряжений от угла коммутации.

Список литературы

1. Загорский В. Т. Непосредственный преобразователь частоты с принудительной коммутацией. — В кн.: Тиристорный управляемый асинхронный электропривод // Свердловск: УПИ, 1968, с. 172—177.
2. Лабунцов В. А., Ривкин Г. А., Шевченко Г. И. Автономные тиристорные инверторы // М.: Энергия, 1967.— 160 с.
3. Преобразователи частоты на основе автономных инверторов для электроприводов переменного тока / И. А. Акиньшии, И. А. Антонов, Л. Х. Дацковский и др // М.: Информэлектро, 1974. — 39 с.
4. Сандлер А. С., Сарбатов Р . С. Преобразователи частоты Для управления асинхронными двигателями // М.: Энергия, 1966.— 144 с.
5. Чиженко И. М., Руденко В. С., Сенько В. И. Основы преобразовательной техники // М.: Высшая школа, 1974. — 430 с.
6. Ладенко Н.В., Ладенко А.А.. Ладенко А.В. Уравнение ударного аварийного тока в системе на базе ДЭМ-Г // Технические и технологические системы. Материалы III международной научной конференции "ТТС-09". Сборник материалов.- Краснодар: филиал ВУНЦ ВВС "ВВА", 2011.- 312 с.
7. Ладенко Н.В., Радченко К.А., Кожушко А.С. Моделирование звена постоянного тока двухмерной электрической машины-генератора // Энергосбережение и водоподготовка №3/71. Химические решения технологических задач: Изд-во ООО "Типография ИД "Граница", Москва, 2011.- 79 с. ISSN 1992-4568.

8. Ладенко Н.В., Нечесов В.Е. Двухфазное короткое замыкание в системах нетрадиционной энергетики // Технические и технологические системы. Материалы IV международной научной конференции "ТТС-09". Сборник материалов.- Краснодар: филиал ВУНЦ ВВС "ВВА", 2012.- 312 с.
9. Ладенко Н.В., Ладенко А.В. Трехфазное короткое замыкание в системах нетрадиционной энергетики на базе ДЭМ-Г // В сборнике: Технические и технологические системы материалы V Международной научно-практической конференции. 2013.

Reference

1. Zagorsky V. T. Direct frequency converter with forced commutation. - In book: Thyristor-controlled asynchronous electric drive // Sverdlovsk: UPI, 1968, p. 172-177.
2. V. A. Labuntsov, G. A. Rivkin, G. Shevchenko. A., Shevchenko G.I. Autonomous thyristor inverters // M.: Energy, 1967 - 160 p.
3. Frequency converters on the basis of self-contained inverters for electric drives of alternating current / I.A. Akinshi, I.A. Antonov, L.X. Datskovsky and others / / M.: Informelektro, 1974. - 39 c.
4. Sandler A.S., Sarbatov R. C. Frequency converters for controlling asynchronous motors (in Russian) // M.: Energia, 1966.- 144 p.
5. Chizhenko I.M., Rudenko V.S., Senko V.I. Fundamentals of the pre-transformation technique // M.: High School, 1974. - 430 c.
6. Ladenko N.V., Ladenko A.A.. Ladenko A.V. Equation of shock emergency current in the system based on DEM-G // Technical and Technological Systems. Proceedings of III International Scientific Conference "TTS-09". Proceedings.- Krasnodar: branch of Higher Scientific-Research Center of Air Force "VVA", 2011.- 312 p.
7. Ladenko N.V., Radchenko K.A., Kozhushko A.S. Modeling of DC link of two-dimensional electric machine-generator // Energy saving and water treatment

№3/71. Chemical solutions of technological problems: Publishing house OOO "Publishing house "Granitsa", Moscow, 2011.- 79 p. ISSN 1992-4568.

8. Ladenko N.V., Nechesov V.E. Two-phase short-circuit in non-traditional power systems // Technical and technological systems. Materials of IV International Scientific Conference "TTS-09". Proceedings.- Krasnodar: branch of the Higher Scientific-Research Center of Air Force "VVA", 2012.- 312 p.
9. Ladenko N.V., Ladenko A.V. Three-phase short-circuit in non-conventional power systems based on DEM-G // In the collection: Technical and Technological Systems Materials of the V International Scientific-Practical Conference. 2013.

© Ладенко Н.В., Церковный А.Е., Креминский Б.О., Сурков А.С., Жилин Я.И, 2022 Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №5/2022.

Для цитирования: Ладенко Н.В., Церковный А.Е., Креминский Б.О., Сурков А.С., Жилин Я.И. КОММУТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В АВТОНОМНОМ ИНВЕРТОРЕ НАПРЯЖЕНИЯ С МЕЖДУФАЗОВОЙ КОММУТАЦИЕЙ// Научно- образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №5/2022.