

Управление матричным непосредственным преобразователем частоты вторичных источников электропитания автономных объектов

КИСЛЯКОВ М.А., КРУТИКОВ К.К., РОЖКОВ В.В.
филиал НИУ «МЭИ», Смоленск, Россия

Предложен вариант применения «скользящих режимов» разрывного управления динамическими объектами для матричных преобразователей частоты (МПЧ) в составе бортовой самолетной сети. В отличие от используемых в существующих алгоритмах управления МПЧ имеющиеся синусоидальные напряжения первичной сети обрабатываются по предлагаемой модернизируемой технологии «скользящих режимов». Уровень разрывных напряжений выбирается из условия минимальных отклонений от цели, что благоприятно сказывается на спектре выходных напряжений. На выбранном временном интервале проводится дискретизация входных фазных напряжений первичной сети и заданных фазных напряжений выходной сети. Формируется положительная минимальная разность между ближайшим к желаемому фазным напряжением первичной сети и заданием фазного напряжения вторичной сети. Она выступает как положительное разрывное управление. Отрицательная разность – как отрицательное разрывное управление. В среднем на расчетном интервале отклонение от заданного фазного напряжения равно нулю. Это обеспечивает наименьшие искажения в спектре выходного напряжения МПЧ при произвольных нагрузках и эволюциях частоты и амплитуды напряжения первичной сети. Рассматриваются варианты трехфазного и шестифазного первичных источников. Средствами имитационного моделирования подтверждена эффективность предложенного варианта применения «скользящих режимов».

К л ю ч е в ы е с л о в а: бортовая электрическая сеть, матричный преобразователь частоты, высокочастотная коммутация, управление в скользящем режиме, коэффициент гармоник, компьютерное моделирование

Непосредственные преобразователи частоты (НПЧ) как вторичные источники бортовой сети автономных объектов рассматриваются и в теоретическом плане, и в практических разработках как альтернатива автономным инверторам напряжения (АИН) с промежуточным звеном постоянного тока [1–8].

Идея одноступенчатого преобразования переменного трех- или многофазного напряжения первичного электромашинного источника переменной частоты в стабильную трехфазную сеть с возможными различными одно- и трехфазными потребителями – основной аргумент в пользу применения НПЧ [9]. К этому добавляется и исключение из схемы ненадежных силовых электролитических конденсаторов, принципиально необходимых для АИН.

Выбор практической схемы НПЧ проводится на основе анализа устойчивости работы на переменную нагрузку в установившихся и переходных режимах, качества выходной сети при условии ее стабилизации и энергетических показателей для первичной сети.

Кроме принимаемой топологии работа НПЧ зависит от принятых законов управления силовыми ключами преобразователя. В тиристорных схемах силовые ключи переключаются один раз за период входной сети

с текущим переменным углом управления. Спектр выходной сети содержит кроме полезной основной гармоники еще и высшие, порядок которых ненамного больше. Односторонняя проводимость тиристоров создает дополнительные проблемы с формированием вторичного синусоидального тока для произвольной нагрузки, желаемой формы первичного тока, коэффициента мощности первичной сети.

Переход от тиристоров к транзисторам позволяет организовать высокочастотные переключения. Образуется класс так называемых матричных НПЧ (МПЧ) для применения в регулируемом электроприводе и электроэнергетике [9–11]. При использовании МПЧ в качестве вторичного источника электропитания автономных объектов нейтрали первичной и вторичной сетей должны быть объединены для возможного подключения однофазной нагрузки, как показано на схеме рис. 1.

Управление транзисторными ключами двусторонней проводимости МПЧ выступает как самостоятельная математическая задача с привлечением таких классических разделов, как разрывное управление динамическими объектами. Здесь в качестве сигналов управления выступают n мгновенных напряжений

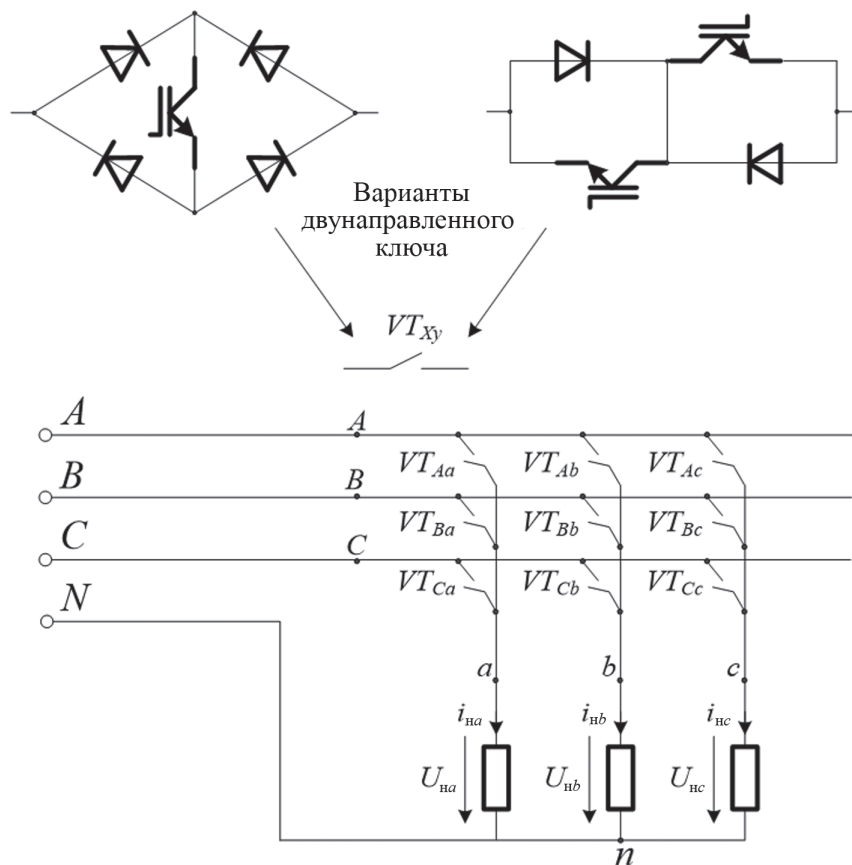


Рис.1. Силовая схема матричного преобразователя частоты (МПЧ)

Fig.1. Power circuit of the matrix frequency converter (MFC)

соответствующего первичного источника. На малых интервалах времени (постоянных заданных или переменных, получаемых опосредованно) осуществляется выбор такой комбинации включения транзисторами, чтобы достигнуть поставленной векторной цели (не нарушая при этом устойчивой работы схемы). Эта цель имеет основную и дополнительную составляющие.

Основная служит для получения первой гармоники выходной симметричной трехфазной сети, стабилизированной на фоне ряда помех как со стороны первичной сети, так и нагрузки. Сюда же входят требования к энергетическим показателям первичной сети (максимума коэффициента мощности, отсутствия постоянной составляющей входного тока фаз). Дополнительная составляющая формирует характер спектра выходного напряжения нагрузки.

Даже основная цель может быть получена разными законами переключения силовых ключей. Например, в [10] на текущем расчетном периоде несущей выбираются самые большие по модулю фазные напряжения первичного источника. На периоде несущей фаза нагрузки подключается к той фазе генератора, напряжение которой из трех сравниваемых – максимальное и больше заданного фазного напряжения нагрузки, иначе фаза нагрузки отключается от сети. При такой методике на каждом периоде несущей существуют паузы

в питании, а спектр выходной сети при этом содержит гармоники большой амплитуды на частоте несущей.

В ряде работ используется применяемое для анализа динамики трехфазных динамических систем электропривода с изолированной нейтралью понятие «трехкомпонентный управляющий вектор» и векторное управление на его базе. Так в [11] на имитационной модели выполнено сравнение спектра выходного трехфазного напряжения нагрузки с изолированной нейтралью при использовании двух методик управления МПЧ. Общая идея – использование первичной сети в качестве «виртуального выпрямителя» с максимальным двуполярным «выпрямленным» напряжением, выбранным из имеющихся линейных напряжений на интервалах их наибольших значений. Различие – в способах выбора этих состояний (скалярная или пространственно-векторная). Описываемая в [11] методика управления с привлечением максимальных входных напряжений в качестве сигналов управления предопределяет наличие больших помех с высокой частотой в спектре выходного напряжения. В рамках обсуждаемой задачи можно положительно оценить применяемую программную реализацию алгоритмов управления и принять ее как наиболее перспективную. Однако применить МПЧ для схем с изолированной нейтралью в качестве источника бортовой сети с заземленной

нейтралью можно только введением дополнительных элементов, например выходного трансформатора с первичной обмоткой, соединенной в Δ , и вторичной заземленной, соединенной по схеме Y .

Представляется оправданным при обсуждении проблемы бортовой сети вообще и с заземленной нейтралью в частности сравнивать различные варианты по степени приближения к идеальной синусоидальной форме выходного напряжения собственно МПЧ без последующих фильтров. Понятно, что все предлагаемые реальные варианты топологии и законов управления не в состоянии обеспечить требуемый суммарный коэффициент гармонических составляющих (*THD* в англоязычной транскрипции) на уровне менее 5%. Во всех случаях приходится на выходе МПЧ использовать пассивные *LC*-фильтры. Вопрос заключается в том, насколько существенно они должны улучшить исходное напряжение? Чем хуже форма напряжения на выходе МПЧ, тем сложнее, дороже, габаритнее и ненадежнее добавляемое оборудование.

«Скользкие режимы» в управлении МПЧ. Для управления МПЧ с объединенными нейтралью нагрузки и сети предлагается обратиться к идеям так называемых «скользящих режимов» управления динамическими объектами [12].

Согласно [12] многомерная (n -мерная) цель достигается введением n двуполярных знакопеременных постоянных источников такого уровня, чтобы обеспечить устойчивое движение вдоль линии каждой из компонент векторной цели, в отличие от [13, 14] с «классической» технологией управления МПЧ и более сложных нейротехнологий управления им [15–16]. Уровень этих источников выбирается, таким образом, только по соображениям устойчивости. Чем он больше, тем точнее цель достигается при больших возмущениях, в том числе и при изменении параметров объекта. Это свойство «инвариантности» является главным достоинством скользящих режимов управления. Подчеркнем, что уровень n источников хотя изначально и выбирается, но в процессе работы остается постоянным.

Предлагаемая идея состоит в том, чтобы использовать в качестве таких источников для управления МПЧ уже готовые переменные напряжения входной сети. Остается модернизировать метод разрывного многомерного управления с применением двух имеющихся из n сигналов кусочно-постоянных и знакопеременных, не обязательно одинакового уровня, для достижения каждой из n компонент векторной цели. При слежении за заданным законом синусоидального выходного напряжения каждой из трех фаз выбираются те два сигнала фазных напряжений входной сети, для которых цель находится внутри «трубки» с минимальным отклонением от цели. Тогда обеспечивается условие минимальности побочных паразитных помех в спектре выходных напряжений.

Функция цели находится в поле трех переменных сигналов управления, а не двух задаваемых постоянных по модулю, как в классических скользящих режимах. Соотношение сигналов управления в рассматриваемый текущий момент может быть таким:

один больше и два меньше функции цели (выходного напряжения) или наоборот, два больше и один меньше. В этом случае функция цели в «трубке» из двух разных по знаку отклонений от нее;

все три сигнала больше функции цели;

все три сигнала меньше функции цели.

Своеобразие условий для применения скользящих режимов в МПЧ в том, что можно выбирать сигналы управления, имеющие наименьшие отклонения от функции цели (в первом из приведенных выше случаев, тогда применяется высокочастотная коммутация). Минимальные отклонения от цели положительно влияют на спектр выходной функции (возмущения минимальные). Во втором и третьем случаях высокочастотные переключения не применяются и используется тот сигнал управления, который ближе к функции цели с постоянным и нужным знаком разности, монотонно убывающей.

Построение модели МПЧ, реализующей «скользящие режимы». Для проверки эффективности предлагаемых методов управления используется имитационное моделирование в пакете Matlab.

Реализация описанной методики проводится программно. В начале каждого из текущих интервалов вычислительного периода измеряются и записываются в буфер хранения текущие мгновенные значения фазных первичных напряжений с извлечением выборок через половину периода. Эти выборки сравниваются с мгновенными значениями задания выходного напряжения. Они могут быть положительными и отрицательными. Определяется минимальная по модулю разность между напряжениями фаз A , B , C и заданным выходным напряжением. Управляющий импульс подается на тот активный транзисторный ключ, для которого разность текущего мгновенного напряжения первичной сети и вторичного заданного напряжения положительна и минимальна, а затем на тот, для которого разность – отрицательна и минимальна. При этом в среднем разность равна нулю, а отклонения от цели – минимальны. Во втором и третьем случаях высокочастотные переключения не проводятся и задействуется сигнал управления, который имеет меньшее рассогласование с целью, монотонно уменьшая рассогласование. Пауза в питании нагрузки отсутствует.

Matlab-модель МПЧ для авиационной сети частотой 400 Гц представлена на рис. 2 (верхний уровень) и рис. 3 и 4 (подмодели осуществления выборок и хранения разности мгновенных фазных напряжений первичной сети и задания вторичного напряжения нагрузки, а также обработки команд программы для управления ключами фаз).

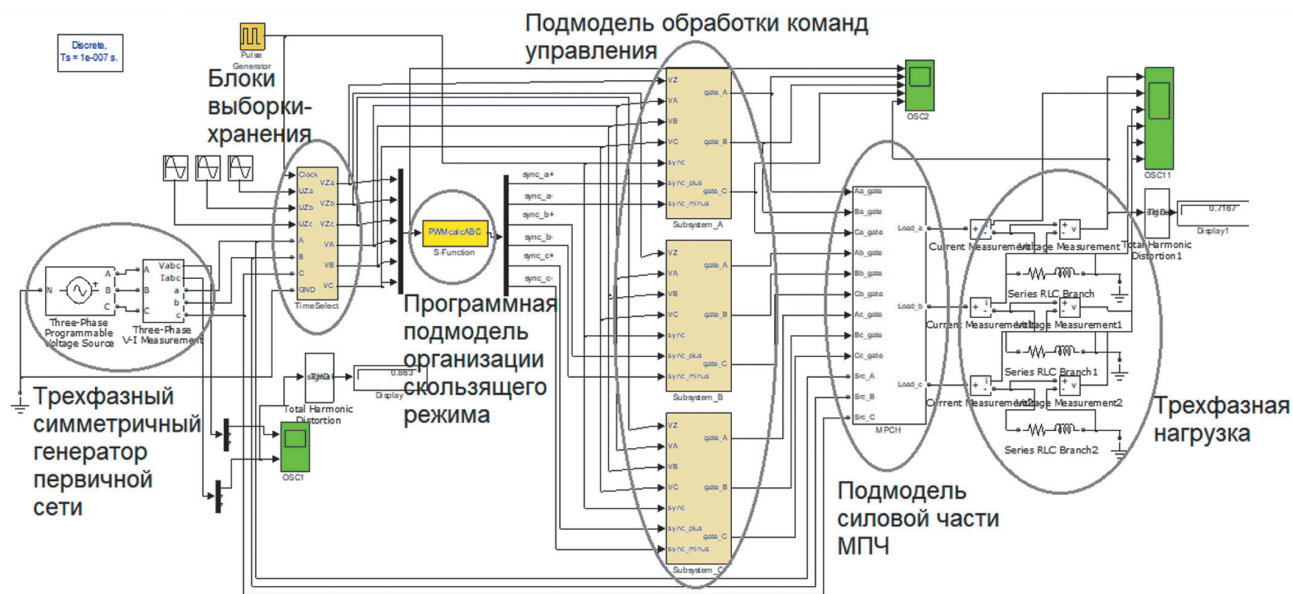


Рис. 2. Верхний уровень модели

Fig. 2. Top level of the model

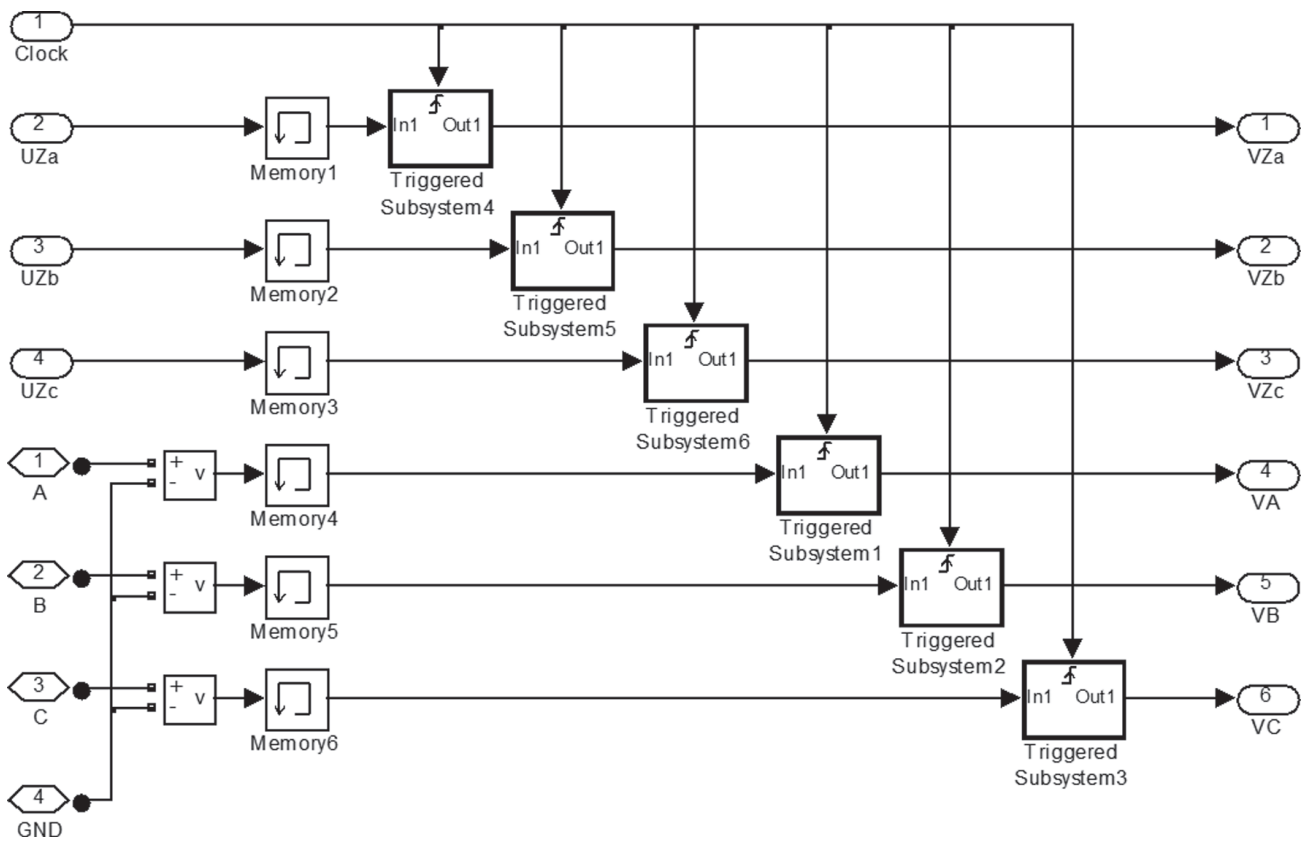


Рис. 3. Подмодель осуществления выборки и хранения разности мгновенных фазных напряжений первичной сети и задания вторичного напряжения нагрузки

Fig. 3. Submodel of sampling and storing the difference of the instantaneous phase voltages of the primary network and setting the secondary load voltage

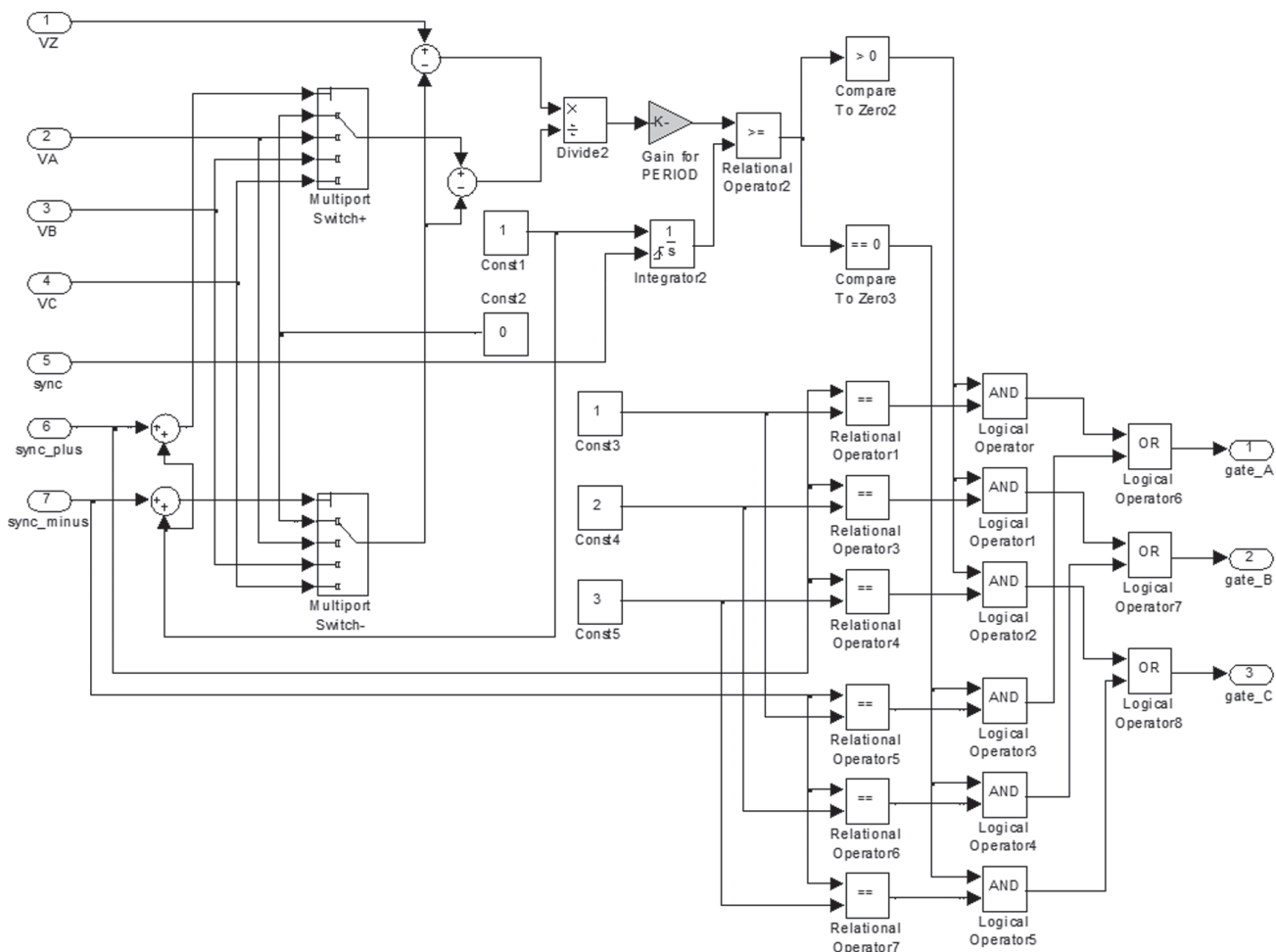


Рис. 4. Подмодель обработки команд программы для управления ключами фаз
 Fig. 4. Submodel of processing commands of the program for control transistors in phases

Модель содержит:

трехфазный симметричный генератор первичной сети с параметрами: линейные напряжения 150 В, частота 1200 Гц, начальная фаза ЭДС 0° для фазы А;

триггерные блоки выборки-хранения на расчетном периоде 100 мкс разности мгновенных фазных напряжений первичной сети и задания вторичного напряжения трехфазной нагрузки амплитудой 115 В, частотой 400 Гц, начальной фазой 300 (подмодель на рис. 3);

блоки обработки команд программы для управления ключами фаз (подмодель на рис. 4);

блок из девяти транзисторных ключей двусторонней проводимости (соответствует силовой схеме рис. 1 с вариантом организации двунаправленного ключа с одним IGBT-транзистором и 4 диодами);

цифровую модель формирования логических условий сравнения разностных сигналов управления и функции цели и определения возможности выбора управляющих команд в скользящем режиме. Она реализована программно в виде s-функции. Используется методика организации скользящего режима, описанная выше;

трехфазную симметричную *RL*-нагрузку на выходе МПЧ с заземленной нейтралью и параметрами на фазу: $R = 0,06$ Ом, $L = 18$ мкГн, $\cos\varphi = 0,8$.

Период квантования входных фазных и выходных заданных напряжений определен в 100 мкс. Амплитуда заданного выходного напряжения выбрана на уровне 105 В (0,866 в отн.ед.) для исключения перемодуляции.

Моделирование работы МПЧ. На модели проведен ряд компьютерных экспериментов.

Например, на осциллограммах рис. 5 показаны: фазные напряжения входной сети и фазные заданные напряжения нагрузки фаз;

импульсы управления тремя ключами, формирующими вторичное напряжение фазы А (Aa, Ba, Ca);

выходное напряжение фазы А.

На осциллограммах рис. 6 показаны фазные напряжения и токи нагрузки.

На рис. 7 показаны входное фазное напряжение первичной сети и одноименный фазный ток.

Анализ результатов эксперимента подтверждает выдвинутые теоретические положения по применению скользящих режимов управления МПЧ с зазем-

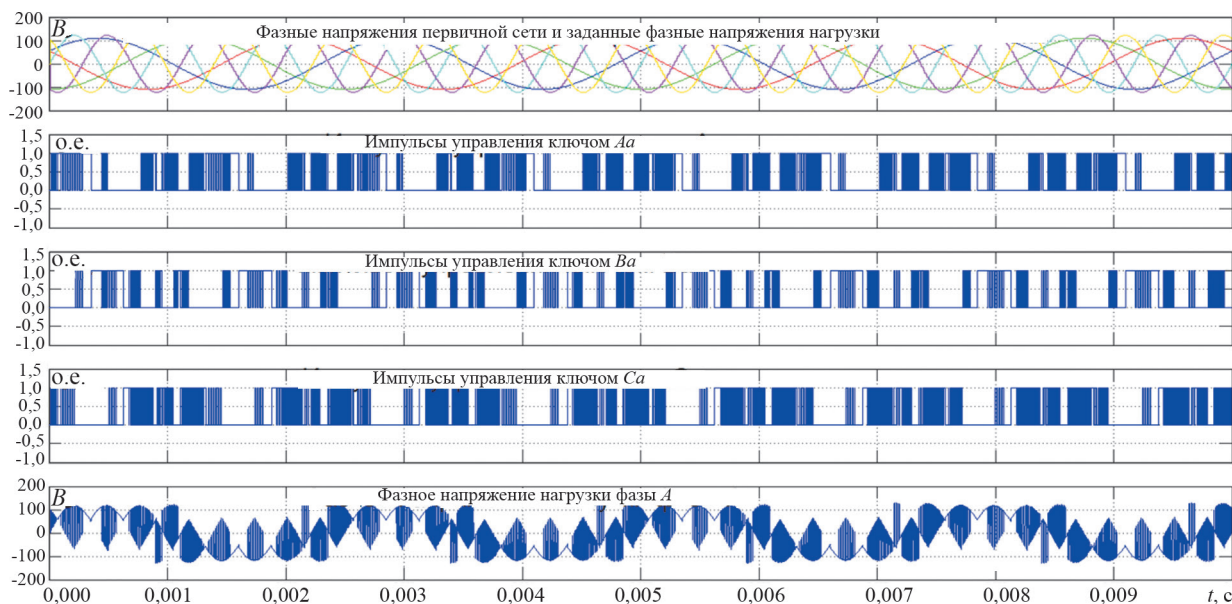


Рис. 5. Осциллограммы (сверху вниз) фазных напряжений входной сети и фазных заданных напряжений нагрузки фаз (верхний экран), импульсов управления (2–4 экраны), выходного фазного напряжения (нижний экран)

Fig. 5. Oscillograms (from top to bottom) of the phase voltages of the input network and phase specified load voltages of the phases (upper screen), control pulses (2–4 screen), output phase voltage (lower screen)

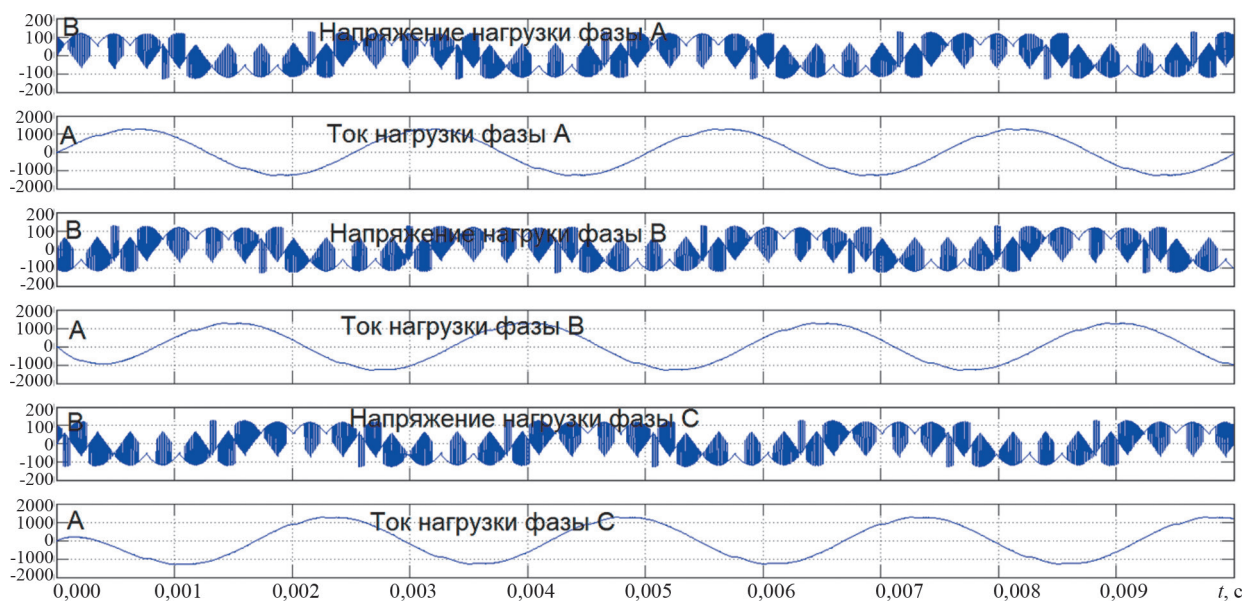


Рис. 6. Осциллограммы (сверху вниз) фазных напряжений (A, B, C – 1, 3, 5 экраны), токов нагрузки (A, B, C – 2, 4, 6 экраны)

Fig. 6. Oscillograms (from top to bottom) of phase voltages (A, B, C – 1,3,5 screens), load currents (A, B, C – 2, 4, 6 screens)

ленной нагрузкой. Выходные напряжения нагрузки с трехфазным первичным источником имеют большие высокочастотные искажения, суммарный коэффициент гармонических составляющих THD составляет 72%. Входные токи сети также имеют высокочастотные искажения, $THD = 86\%$.

Можно проанализировать работу МПЧ при таких эволюциях самолета, когда частота генератора входной сети увеличилась вдвое – до 2400 Гц. При этом уровень напряжения генератора входной сети зависит от способа его возбуждения. При отсутствии регулятора воз-

буждения (возбуждение от постоянных магнитов) амплитуда напряжения генератора также возрастет вдвое.

Результаты такого эксперимента представлены осциллограммами рис. 8.

Видно, что напряжения нагрузки по основной гармонике сохранили прежние значения, но частота и амплитуда пульсаций выросли вдвое. Суммарный коэффициент гармонических составляющих THD ухудшился и достиг 170%.

Дальнейшие улучшения качества выходной сети можно получить применением шестифазного первич-

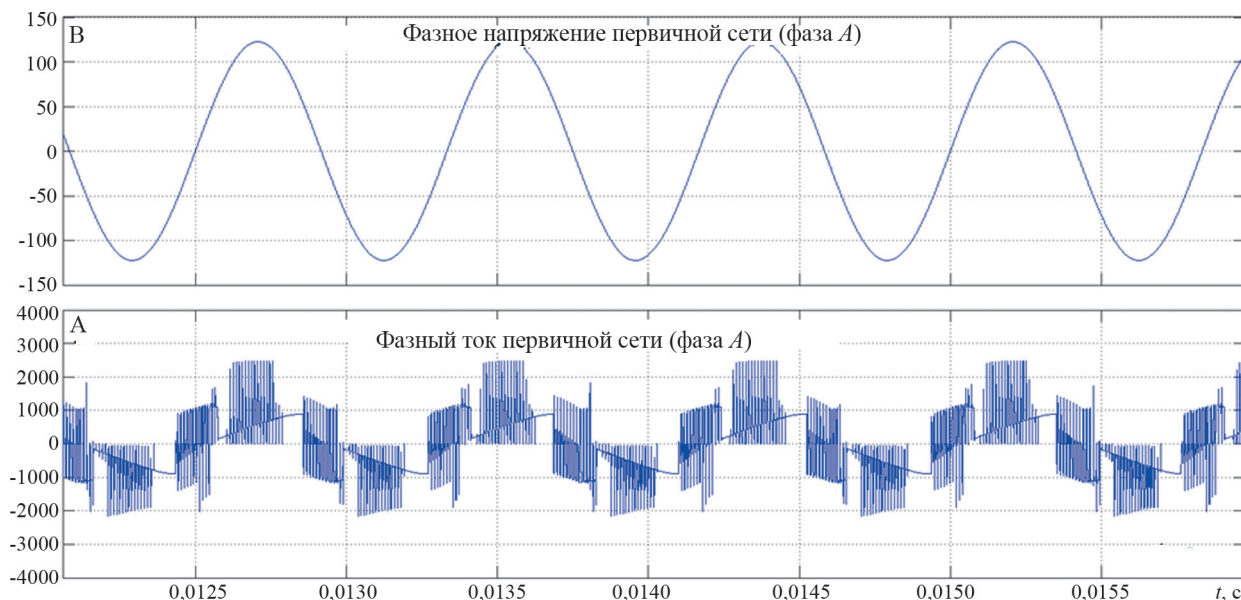


Рис. 7. Осциллограммы входного фазного напряжения (верхний экран), фазного тока первичной сети (нижний экран)

Fig. 7. Oscillograms of the input phase voltage (upper screen), phase current of the primary network (lower screen)

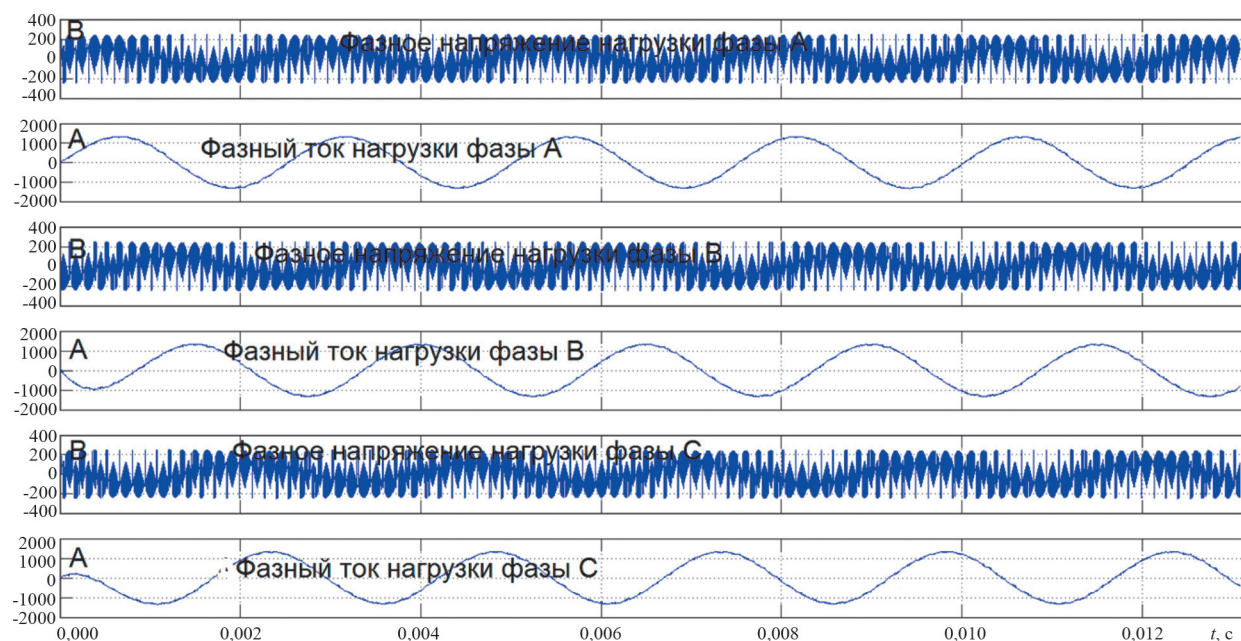


Рис. 8. Осциллограммы (сверху вниз) фазных напряжений (A, B, C – 1, 3, 5 экраны), токов нагрузки (A, B, C – 2, 4, 6 экраны) при удвоении вдвое частоты входной сети

Fig. 8. Oscillograms (from top to bottom) of phase voltages (A, B, C – 1, 3, 5 screens), load currents (A, B, C – 2, 4, 6 screens) with doubling the frequency of the input network

ного генератора. При этом на одном валу расположены два одинаковых трехфазных генератора с 60-градусным фазовым сдвигом напряжений, что наиболее целесообразно на практике для формирования первичного источника бортовой сети.

На рис. 9 показаны осциллограммы фазного напряжения нагрузки, его задания и тока нагрузки для одной из фаз при шестифазном исполнении входной сети, ее частоте 1200 Гц и напряжении 150 В.

Видно, что выходное напряжение нагрузки стало ближе к идеальному синусоидальному ($THD = 32\%$).

Выводы. Полученные в результате серии экспериментов значения THD для выходных фазных напряжений схем МПЧ с предлагаемым способом управления без использования пассивных LC -фильтров на выходе сведены в таблицу.

Подводя итоги проделанной работы, можно заключить, что широко представленные в печати варианты

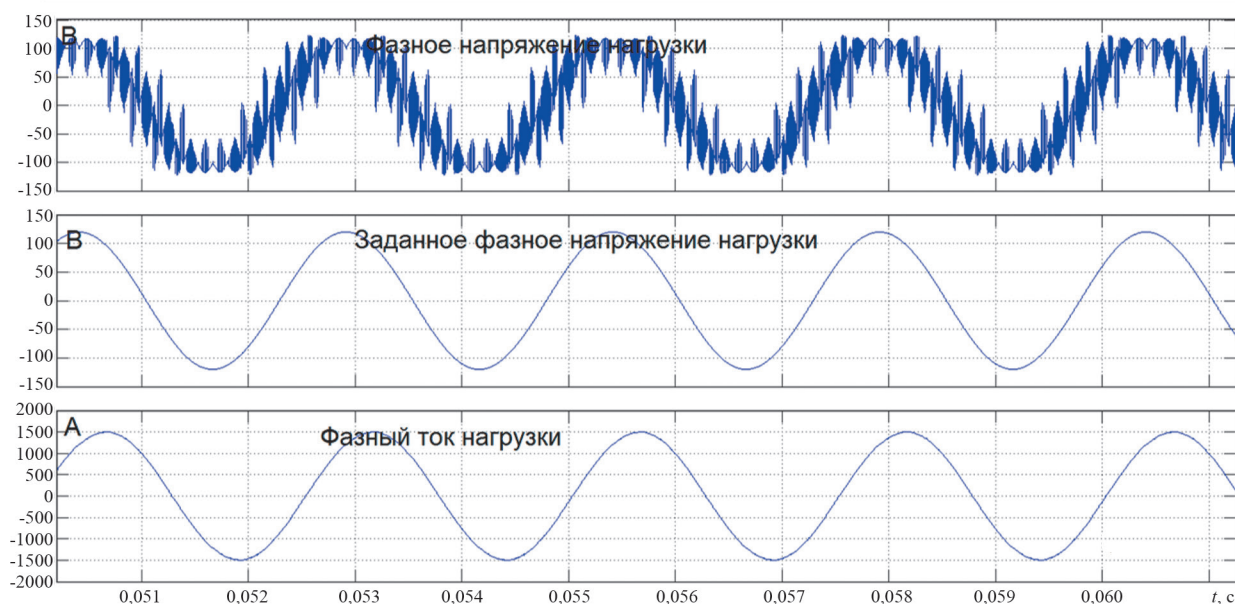


Рис. 9. Осциллограммы фазного напряжения нагрузки (верхний экран), его задания (средний экран) и тока нагрузки (нижний экран) для случая шестифазного входного напряжения

Fig. 9. Oscillograms of the phase load voltage (upper screen), its reference (middle screen) and load current (lower screen) for a six-phase input voltage

Значения THD при питании МПЧ от различных рассмотренных источников

THD values when feeding the MFC from the various sources considered

Схема первичного источника/частота первичного источника		
Трехфазная/1200 Гц	Трехфазная/2400 Гц	Шестифазная/1200 Гц
72	170	32

законов управления и топологии матричных преобразователей частоты для двигательной нагрузки с изолированной нейтралью позволяют получить сравнительно подходящий для последующего улучшения фильтрами спектр выходных линейных напряжений. Однако в качестве источников бортовой сети с требованием заземленной нагрузки они непригодны или требуют выходной трансформатор с первичной обмоткой, соединенной в треугольник.

Рассмотренный вариант МПЧ с заземленной нагрузкой и предложенным управлением с помощью модифицированного варианта скользящих режимов позволяет в случае шестифазного исполнения генератора получить напряжения лучшей формы для выходной бортовой сети.

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № FSWF-2020-0019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грузков С.А. Электрооборудование летательных аппаратов, ч.1. М.: Изд-во МЭИ, 2005, 568 с.
2. Грузков С.А. Электрооборудование летательных аппаратов, ч.2. М.: Изд-во МЭИ, 2008, 552 с.
3. Лёвин А.В., Юхнин М.М., Лившиц Э.Я., Харитонов С.А. и др. разработки системы генерирования электрической энергии

типа «переменная скорость – постоянная частота» на базе синхронных генераторов и инверторов напряжения. – Силовая интеллектуальная электроника, 2007, № 1, с. 17–21.

4. Лёвин А.В., Алексеев И.И., Харитонов С.А., Ковалев Л.К. и др. Электрический самолет: от идеи до реализации. М.: Машиностроение, 2010, 288 с.

5. Стенников А.А. Автономные системы генерирования электроэнергии переменного тока с асинхронными генераторами. – Материалы НТК: Информатика и проблемы телекоммуникации, Новосибирск, 1999, с. 51–52.

6. Харитонов С.А. Системы генерирования электроэнергии для ветроэнергетики и автономных подвижных объектов (анализ и синтез): дис. ... докт. техн. наук, Новосибирск, НГТУ, 1998, 619 с.

7. Харитонов С.А. Электромагнитные процессы в системах генерирования электроэнергии для автономных объектов. Новосибирск: Изд. НГТУ, 2011, 536 с.

8. Машинский В.В. Резервная система генерирования электрической энергии для летательных аппаратов: дис. ... канд. техн. наук, Новосибирск, НГТУ, 2014, 134 с.

9. Джюджи Л., Пелли Б. Силовые полупроводниковые преобразователи частоты: Теория, характеристики, применение. М.: Энергоатомиздат, 1983, 400 с.

10. Щелкунов Р.Г. Модель матричного преобразователя частоты. – Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 2018, с. 321–323.

11. Дарьенков А.Б., Чернов Е.А., Кочаганов Д.М., Абузяров Т.Х. Сравнительное имитационное моделирование работы матричного преобразователя частоты со скалярным и пространственно-векторным алгоритмами управления. – Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева, 2018, № 4 (23), с. 89–98.

12. Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. М.: Наука, 1981, 367 с.

13. Naveed A. et al. A single-phase buck and boost AC-to-AC converter with bipolar voltage gain: analysis, design, and implementation. – Energies, 2019, No. 12, 1376, DOI:10.3390/en12071376.

14. López-Robles E. et al. Voltage regulation of a matrix converter with balanced and unbalanced three-phase loads. – Journal of Applied Research and Technology, 2015, No. 13, pp. 510–522.

15. **Jeremy Van Gorpet et al.** Binary signals design to control the matrix converter in the context of smart grids. – IFAC Papers OnLine, 2017, vol. 50 (1), pp. 2119–2124, DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.537.

16. **Mahajanaet S. et al.** Analysis and control of induction generator supplying stand-alone AC loads employing a Matrix Converter. – Engineering Science and Technology an International Journal, 2017, 11, pp. 649–661.

17. **Essamd E.M., Mahmoud A.S.** Matrix converters and three-phase inverters fed linear induction motor drives–Performance compare. – Ain Shams Engineering Journal, 2018, 9(3), pp. 329–340. Essen: Vulkan Verlag, 2008, 212 p.

[09.03.2021]



Авторы: **Кисляков Максим Анатольевич** – старший преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники» филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске.



Крутиков Кирилл Кириллович – кандидат техн. наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске.



Рожков Вячеслав Владимирович – кандидат техн. наук, зам. директора по учебно-методической работе, зав. кафедрой «Электро-механические системы» филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске.

Elektrichestvo, 2021, No. 7, pp. 41–50

DOI:10.24160/0013-5380-2021-7-41-50

Controlling a Direct Matrix Frequency Converter of Secondary Power Supply Sources for Autonomous Objects

KISLYAKOV Maxim A. (Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» in Smolensk, Smolensk, Russia) – Senior Lecturer of the Theoretical Foundations of Electrical Engineering Dept.

KRUTIKOV Kirill K. (Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» in Smolensk, Smolensk, Russia) – Docent of the Theoretical Foundations of Electrical Engineering Dept., Cand. Sci. (Eng).

ROZHKOV Vyacheslav V. (Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» in Smolensk, Smolensk, Russia) – Deputy Director for Educational and Methodological Work, Head of the Electromechanical Systems Dept., Cand. Sci. (Eng).

A version of using "sliding modes" in performing discontinuous control of dynamic objects for matrix frequency converters (MFC) as part of an on-board aircraft network is proposed. Unlike the way used in the existing MFC control algorithms, the sinusoidal voltages available in the primary network are processed according to the proposed modernized technology of "sliding modes". The level of discontinuous voltages is selected from the condition of minimum deviations from the target, which has a favorable effect on the spectrum of output voltages. On the selected time interval, the input primary network phase voltages and the specified output network phase voltages are sampled. A positive minimum difference between the primary network phase voltage closest to its desired value and the specified secondary network phase voltage is produced. This difference acts as a positive discontinuous control. A negative difference acts as a negative discontinuous control. Over the calculated interval, the average deviation from the specified phase voltage is zero. Owing to this feature, the smallest distortions in the MFC output voltage spectrum are obtained at arbitrary loads and evolutions of the primary network voltage frequency and amplitude. Versions of three-phase and six-phase primary sources are considered. The effectiveness of the proposed version of using "sliding modes" has been confirmed by simulation.

Key words: on-board electrical network, matrix frequency converter, high-frequency switching, sliding mode control, total harmonic distortion, computer simulation

REFERENCES

1. **Gruzkov S.A.** *Elektrooborudovanie letatel'nyh apparatov* (Electrical equipment of aircraft), p.1. M.: Izd-vo MEI, 2005, 568 p.
2. **Gruzkov S.A.** *Elektrooborudovanie letatel'nyh apparatov* (Electrical equipment of aircraft), p. 2. M.: Izd-vo MEI, 2008, 552 p.
3. **Lyovin A.V., Yuhnin M.M., Livshits E.Ya., Haritonov S.A. et al.** *Silovaya intellektual'naya elektronika – in Russ. (Power intelligent electronics)*, 2007, No. 1, pp.17–21.
4. **Lyovin A.V., Alekseev I.I., Haritonov S.A., Kovalev L.K. et al.** *Elektricheskiy samolet: ot idei do realizatsii* (Electric aircraft: from idea to implementation). M.: Mashinostroenie, 2010, 288 p.
5. **Stennikov A.A.** *Materialy NTK: Informatika i problemy telekommunikatsii – in Russ. (Proceedings of the STC: Informatics and Telecommunications Problems)*, Novosibirsk, 1999, pp. 51–52.
6. **Haritonov S.A.** *Sistemy generirovaniya elektroenergii dlya vetroenergetiki i avtonomnyh podvizhnyh ob'ektov (analiz i sintez)* (Electricity generation systems for wind energy and autonomous mobile objects (analysis and synthesis)): diss. ... Dr. Sci. (Eng.), Novosibirsk, NGTU, 1998, 619 p.
7. **Haritonov S.A.** *Elektromagnitnye protsessy v sistemah generirovaniya elektroenergii dlya avtonomnyh ob'ektov* (Electromagnetic processes in power generation systems for autonomous objects). Novosibirsk: Izd. NGTU, 2011, 536 p.
8. **Mashinsky V.V.** *Rezervnaya sistema generirovaniya elektricheskoy energii dlya letatel'nyh apparatov* (Back-up system for generating electrical energy for aircraft): diss. ... Cand. Sci. (Eng.), Novosibirsk, NGTU, 2014, 134 p.
9. **Dzhuji L., Pelly B.** *Silovye poluprovodnikovye preobrazovateli chastoty: Teoriya, harakteristiki, primenenie* (Power semiconductor frequency converters: Theory, characteristics, application). M.: Energoatomizdat, 1983, 400 p.
10. **Shchelkunov R.G.** *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchee tekhnologii: materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. – in Russ. (Materials, equipment and resource-saving technologies: materials of international scientific-technical. conf.)*, Gomel, 2018, pp. 321–323.
11. **Darienkov A.B., Chernov E.A., Kochaganov D.M., Abuzyarov T.Kh.** *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva – in Russ. (Proceedings of NSTU n.a. R.E. Alekseev)*, 2018, No. 4 (23), pp. 89–98.
12. **Utkin V.I.** *Skol'zyashchie rezhimy v zadachah optimizatsii i upravleniya* (Sliding modes in optimization and control problems). M.: Nauka, 1981, 367 p.
13. **Naveed A. et al.** A single-phase buck and boost AC-to-AC converter with bipolar voltage gain: analysis, design, and implementation. – *Energies*, 2019, No. 12, 1376, DOI:10.3390/en12071376.
14. **López-Robles E. et al.** Voltage regulation of a matrix converter with balanced and unbalanced three-phase loads. – *Journal of Applied Research and Technology*, 2015, No. 13, pp. 510–522.
15. **Jeremy Van Gorpet et al.** Binary signals design to control the matrix converter in the context of smart grids. – *IFAC Papers OnLine*, 2017, vol. 50 (1), pp. 2119–2124, DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.537.
16. **Mahajanaet S. et al.** Analysis and control of induction generator supplying stand-alone AC loads employing a Matrix Converter. – *Engineering Science and Technology an International Journal*, 2017, 11, pp. 649–661.
17. **Essamd E.M., Mahmoud A.S.** Matrix converters and three-phase inverters fed linear induction motor drives—Performance compare. – *Ain Shams Engineering Journal*, 2018, 9(3), pp. 329–340.

[09.03.2021]