

УДК 621.314.26

**Александр Аркадьевич Николаев**

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

**Ильдар Галиевич Гилемов**

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: gilemov.ig@outlook.com

## **Разработка и исследование усовершенствованного алгоритма ШИМ активного выпрямителя с изменяемыми таблицами углов переключения**

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Главные электроприводы современных прокатных станов выполняются на преобразователях частоты с активными выпрямителями. Во время работы АВ потребляют несинусоидальный ток, оказывая негативное влияние на питающую сеть. В целях улучшения показателей качества напряжения в АВ применяют специальные алгоритмы широтно-импульсной модуляции. Широкое распространение получил алгоритм ШИМ с удалением выделенных гармоник. Однако применение такого алгоритма не всегда позволяет оптимизировать работу АВ в условиях меняющихся параметров электротехнического комплекса при различных режимах работы. В связи с этим необходимо решение, позволяющее улучшить показатели качества электроэнергии в заводских сетях с мощными ПЧ с АВ.

**Материалы и методы.** Для выполнения исследований реализована математическая модель ПЧ с АВ с усовершенствованным алгоритмом ШИМ в среде Matlab-Simulink на основе параметров главного электропривода стана «2000» холодной прокатки ЛПЦ-11 ПАО «ММК». Основным допущением является представление в имитационной модели инвертора в виде источника тока.

**Результаты.** Разработан усовершенствованный алгоритм с возможностью выбора таблиц углов переключения на основе ШИМ с удалением выделенных гармоник. Исследована работа ПЧ с АВ с предложенным усовершенствованным алгоритмом ШИМ при изменении таблиц углов переключения ключей. Произведен сравнительный анализ мгновенных значений напряжений и токов АВ при переходах на таблицы со схожими углами переключения и значительно отличающимися. Установлено, что изменения таблиц углов переключения не оказывают существенного негативного влияния на работу ПЧ с АВ.

**Выводы.** Предложенный усовершенствованный алгоритм ШИМ может быть использован для улучшения показателей качества электроэнергии в электротехнических комплексах с ПЧ с АВ за счет применения оптимальных таблиц углов переключения в условиях различных режимов системы электроснабжения. Адекватность имитационной модели ранее была подтверждена экспериментальными данными и предыдущими исследованиями.

**Ключевые слова:** активный выпрямитель, широтно-импульсная модуляция, преобразователь частоты, качество электроэнергии

**Alexander Arkadyevich Nikolaev**

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Head of the Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

**Ildar Galievich Gilemov**

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Postgraduate student of the Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: gilemov.ig@outlook.com

## Development and research of improved PWM algorithm of an active rectifier with variable switching angle tables

### Abstract

**Background.** Modern electric drives of rolling mills are based on frequency converters with active rectifiers (AR). During operation, active rectifiers consume non-sinusoidal current, having a negative effect on the supply network. In order to improve the performance index of voltage quality, AR special algorithms of pulse-width modulation are used. Selective harmonic elimination (SHE) PWM algorithm has become widespread. However, application of SHE PWM algorithm does not always allow to optimize the operation of the AR under the conditions of changing parameters of the electro-technical complex under various operating modes. Therefore, a solution is needed to improve the electrical power quality index of plant networks with powerful frequency converter with AR.

**Materials and methods.** To carry out the research, a mathematical model of the frequency converter with active rectifiers was implemented with an improved PWM algorithm in the Matlab-Simulink environment based on the parameters of the main electric drive of the 2000 cold rolling mill “LPC-11” of PJSC “ММК”. The main assumption of the simulation model is that the inverter is represented as a current source.

**Results.** An improved algorithm with the ability to select tables of switching angles based on SHE PWM has been developed. The operation of the FC with AR with the proposed improved PWM algorithm with variable tables of switching angles has been investigated. A comparative analysis of the instantaneous values of AR voltages and currents when transferring to the tables with similar switching angles and significantly different ones has been made. It has been found that changing the tables of switching angles does not have a significant negative effect on the operation of the FC with AR.

**Conclusions.** The proposed improved PWM algorithm can be used to improve the performance index of power quality in electrotechnical complexes with FC and AR by using optimal tables of switching angles in conditions of various modes of the power supply system. The adequacy of the simulation model has previously been confirmed by experimental data and previous studies.

**Key words:** active rectifier, pulse-width modulation, frequency converter, electrical power quality

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2020.6.048-056

**Введение.** Широкое внедрение в промышленности электроприводов (ЭП) с преобразователями частоты с активными выпрямителями (ПЧ с АВ) обусловлено их преимуществами по отношению к другим преобразователям: возможностью рекуперации электрической энергии в питающую сеть и работой с регулируемым коэффициентом мощности [1]. Эти достоинства способствовали активному распространению ЭП с ПЧ с АВ в металлургии в качестве главных ЭП станов холодной и горячей прокатки [2, 3]. Технологический процесс прокатки металла требует создания на валках стана значительных моментов и связан с частыми динамическими режимами. Поэтому в таких ЭП применяются ПЧ с АВ с синхронными или асинхронными двигателями большой мощности [3–5].

Наибольшее распространение в настоящее время получила трехуровневая топология построения АВ с фиксированной средней точкой [4, 5]. Использование четырех полностью управляемых силовых ключей в каждой фазе позволяет получить на входе АВ три уровня напряжения: 0,  $-U_{DC}/2$ ,

$+U_{DC}/2$ , что улучшает синусоидальность потребляемого тока и снижает величину суммарного коэффициента гармонических составляющих сетевого напряжения по сравнению с двухуровневой топологией. В качестве силовых ключей, как правило, выступают IGBT-транзисторы или IGCT-тиристоры, работающие с относительно низкой частотой коммутации для снижения потерь при переключениях [6].

Для управления силовыми ключами применяются различные алгоритмы ШИМ. В целях снижения негативного влияния АВ на питающую сеть при низкой частоте коммутации силовых ключей все большее распространение получает алгоритм ШИМ с удалением выделенных гармоник, позволяющий исключить из гармонического спектра потребляемого тока заранее определенные гармоники [7–10]. Также находят применение метод ШИМ с оптимальной минимизацией суммарного коэффициента гармонических составляющих [11] и другие различные гибридные методы [12].

В [13] на основе алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник была предложена усовершенствованная система, сущность которой сводится к выбору таблиц с заранее рассчитанными углами переключения силовых ключей АВ в зависимости от предъявляемых критериев. Применение различных таблиц позволяет, например, оптимизировать работу ПЧ с АВ при изменении параметров электротехнического комплекса. Так как в [13] исследованию подверглись только статические режимы работы ПЧ с АВ, необходимо проверить работу АВ при переключениях таблиц и воздействие таких переключений на основные параметры работы ПЧ и общую устойчивость системы.

**Методы исследования.** Основные принципы предлагаемого усовершенствованного алгоритма и разработанная имитационная модель уже были описаны в [13]. На рис. 1 показаны два силовых трансформатора Т1 и Т2, реализующие 12-пульсную схему выпрямления и подключенные к сети 10 кВ через вакуумный выключатель Q1. От каждого трансформатора через реакторы Р1 и Р2 получают питание активные выпрямители АВ1 и АВ2. Выходы АВ подсоединены к общему звену

постоянного тока, состоящего из двух эквивалентных конденсаторов С1 и С2. От звена постоянного тока получают питание автономные инверторы напряжения АИН1 и АИН2, к которым подключен синхронный двигатель СД. Обмотка возбуждения ОВ СД получает питание от тиристорного возбудителя ТВ, запитанного от сети через ячейку Q2 и трансформатор Т3.

В систему управления АВ из силовой части электропривода поступают сигналы величин напряжений на входе АВ  $U_{abc}$ , потребляемых токов  $i_{abc}$  и напряжения в звене постоянного тока  $U_{DC}$ . Датчики напряжения необходимы для преобразования входных величин в требуемый системой управления вид: сетевое напряжение  $U_c$  и напряжение в звене постоянного тока  $U_{DC.факт}$ . Фильтр низких частот необходим для устойчивой работы системы управления из-за присутствия в токах значительных величин низких гармонических составляющих. Для преобразования величин в различных системах координат служат блоки  $abc/dq0$  и  $dq0/m\theta$ . Блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) применяется для синхронизации с питающей сетью векторов системы управления АВ.

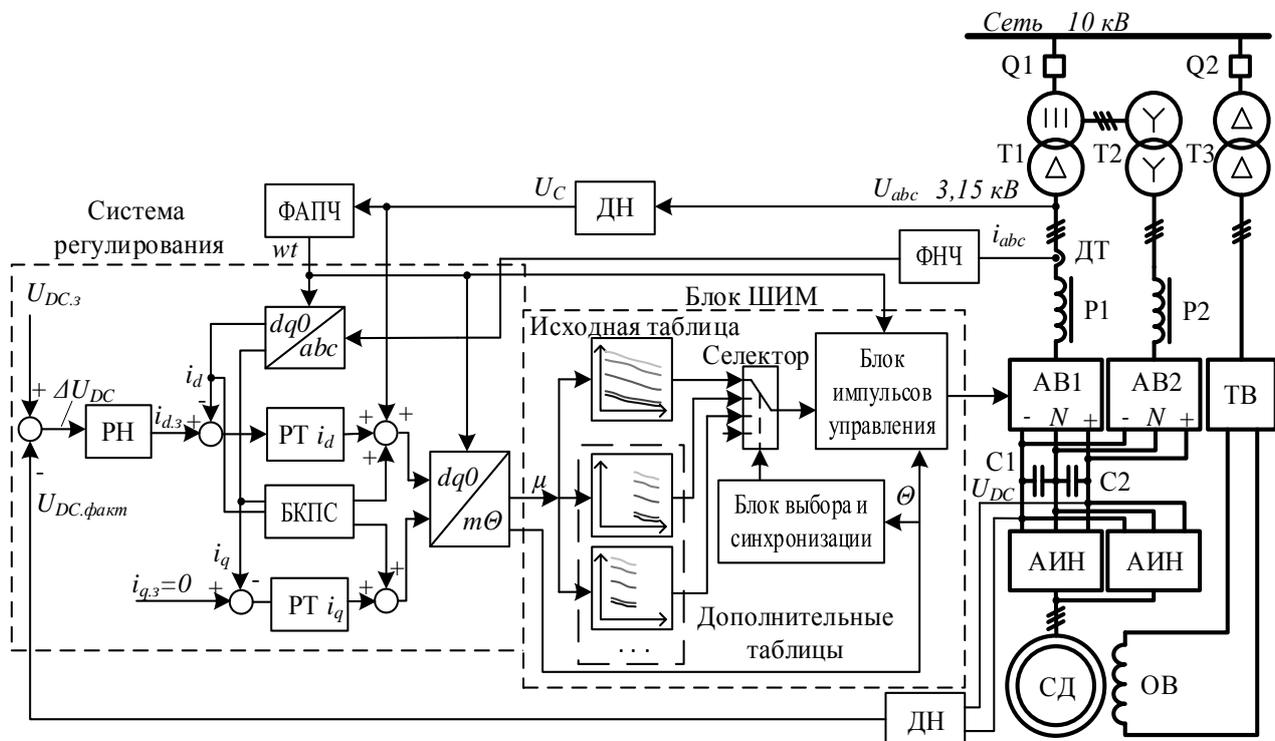


Рис. 1. Упрощенная структурная схема усовершенствованной системы управления АВ и силовой части ЭП

Система регулирования состоит из двух контуров. Внутренний контур обеспечивает регулирование величин токов во вращающейся системе координат  $dq$ , внешний – регулирование напряжения в звене постоянного тока. На вход пропорционально-интегрального регулятора напряжения РН подается разность  $\Delta U_{DC}$  между заданием напряжения  $U_{DC,z}$  и фактической величиной  $U_{DC,факт.}$ . Выход регулятора напряжения обеспечивает величину задания тока  $i_{d,z}$ , поступающую на вход регулятора тока по оси  $d$  – РТ  $i_d$ . Величина задания тока по оси  $q$ , соответствующая величине задания реактивной составляющей потребляемого тока и поступающая на регулятор РТ  $i_q$ , как правило, задается равной  $i_{q,z} = 0$ . Блок БКПС служит для компенсации перекрестных связей объекта регулирования. Сигналы с выходов регуляторов тока после преобразования поступают в блок ШИМ в виде пространственного вектора длиной  $\mu$  и углом  $\Theta$ .

В блоке ШИМ кроме исходной таблицы с величинами углов переключения также рассчитаны дополнительные. Блок выбора и синхронизации с учетом определенных условий формирует сигнал на селектор, который обеспечивает выбор необходимой таблицы и передачу сигналов в блок генерирования импульсов управления силовыми ключами.

Для проведения исследований динамических режимов работы ПЧ с АВ при переключениях с одной таблицы на другую были рассчитаны две дополнительные таблицы. Величины углов в основной таблице рассчитывались таким образом, чтобы исключить из гармонического спектра потребляемого тока низкочастотные гармоники: 11, 13, 23 и 25. При расчетах дополнительных таблиц вместо 25 гармоники исключалась 35. Углы первой дополнительной таблицы подбирались максимально близкими к углам исходной таблицы, углы второй – максимально отличающимися (рис. 2). Величина нагрузки в моменты переключений не изменялась и соответствовала работе АВ с коэффициентом модуляции системы управления  $\mu \approx 0,83$  о.е. Соответственно, в дополнительных таблицах использовались такие наборы углов переключения, обеспечивающие достаточный для переключений диапазон. Такой подход

необходим для оценки устойчивости работы АВ при переходах на различные таблицы и анализа динамических параметров.

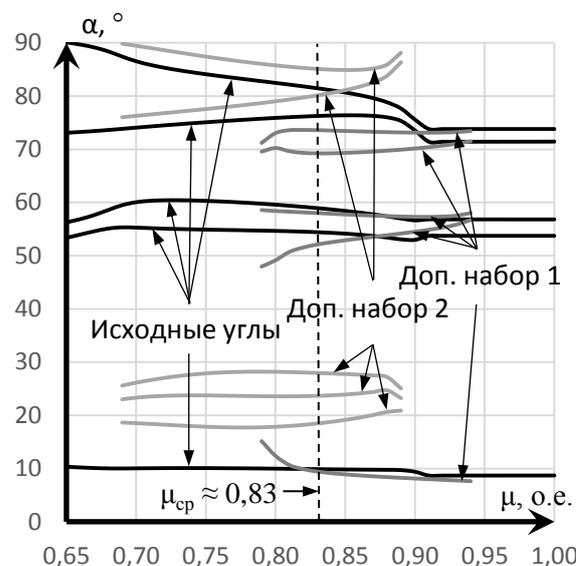


Рис. 2. Зависимости наборов углов переключения тиристоров от коэффициента модуляции  $\mu$

Для разработки имитационной математической модели применялась программная среда Matlab-Simulink и использовались параметры стана холодной прокатки 2000 ЛПЦ-11 ПАО «ММК» (рис. 3). Питаящая сеть 10 кВ представлена последовательным соединением блоков идеального трехфазного источника напряжения *Three-Phase Programmable Voltage Source* и активно-индуктивно-емкостного сопротивления *Three-Phase Series RLC Branch*. Для проведения измерений величин токов и напряжений применялись блоки *Three-Phase V-I Measurement*. Трансформаторы Т1 и Т2 замещены эквивалентным трансформатором с двумя вторичными обмотками *Three-Phase Transformer (Three Windings)*. Для моделирования реакторов Р1 и Р2 на входах АВ применены блоки *Three-Phase Series RLC Branch*. Активные выпрямители АВ1 и АВ2 описаны с использованием блоков *Three-Level Bridge*. Работа АИН и СД в имитационной модели представлена в качестве эквивалентного источника тока *Controlled Current Source* [14, 15]. Эквивалентная емкость С1 и С2 в звене постоянного тока реализована с использованием блоков *Three-Phase Series RLC Branch*.

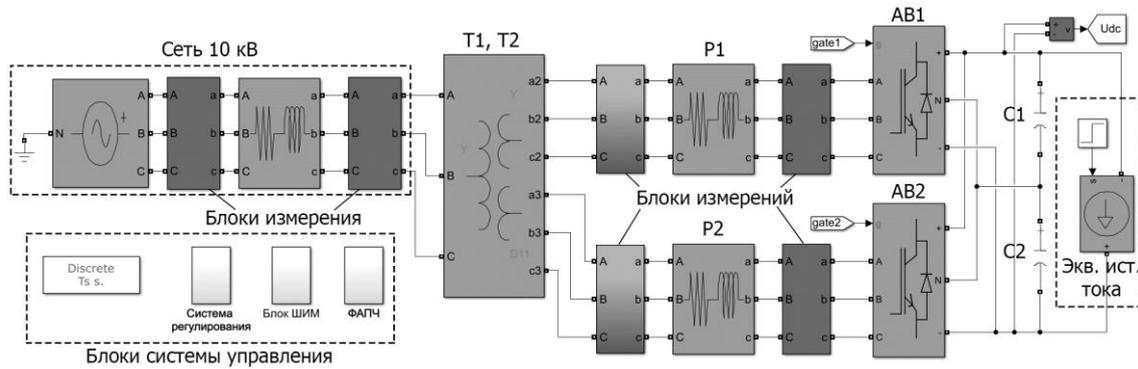


Рис. 3. Имитационная модель ПЧ с АВ, реализованная в среде Matlab-Simulink

При переключениях на дополнительные таблицы система управления должна контролировать ряд следующих важных параметров.

1. При выборе дополнительной таблицы необходимо, чтобы она описывала углы в достаточном диапазоне изменения коэффициента модуляции в зависимости от текущего его значения. В имитационной модели переключения на дополнительную таблицу разрешались с учетом 10 % запаса от общего диапазона описания таблицы для обеспечения устойчивых переключений.

2. Переключения не должны осуществляться в динамических режимах работы ПЧ, поэтому необходимо контролировать производную коэффициента модуляции. При проведении исследований переключения допускались системой управления только при величине производной коэффициента модуляции  $d\mu/dt < 0,5$  о.е./с с фильтром 50 мс.

3. Выбор таблицы должен осуществляться при наличии сигнала от АСУ ТП, анализирующей состояние электротехнического комплекса, в зависимости от необходимых критериев, среди которых могут быть одновременная работа мощных потребителей на одной линии или только одного из них, снижение напряжения питающей сети, работа преобразователя частоты с неполной нагрузкой и другие.

**Результаты исследования.** При имитационном моделировании работы АВ в статическом режиме работы производилось переключение с исходной таблицы на каждую из дополнительных. При переключениях величина нагрузки АВ не изменялась. В обоих случаях были получены осциллограммы сетевого напряжения  $U_C$ , сетевого тока  $I_C$  и напряжения на конденсаторах в звене постоянного тока  $U_{DC}$  (рис. 4 и рис. 6 при переключениях с исходной на дополни-

тельную таблицу №1 и №2 соответственно). Также на рис. 5 и рис. 7 приведены осциллограммы напряжения на входе каждого АВ  $U_{AB}$  и потребляемого каждым АВ тока  $I_{AB}$  для двух экспериментов.

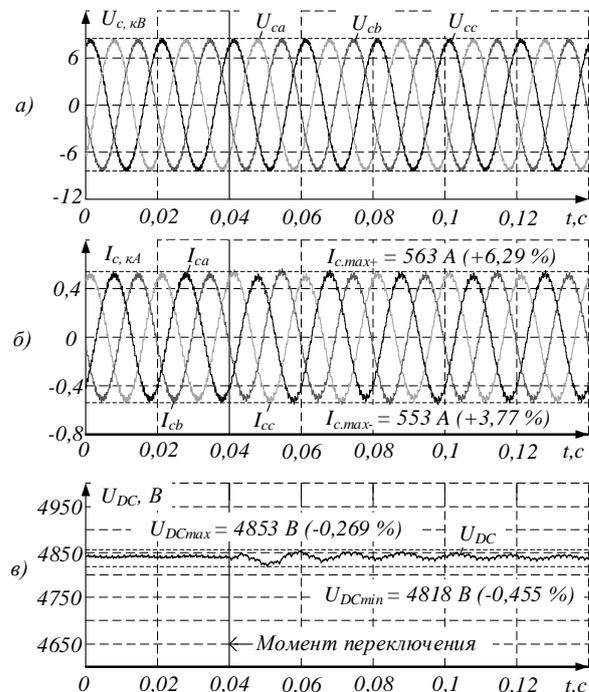


Рис. 4. Осциллограммы: а – сетевого напряжения; б – потребляемого АВ тока; в – напряжения в звене постоянного тока при переключении с исходной таблицы на первую дополнительную

В первом эксперименте при переключении с исходной таблицы на дополнительную таблицу №1 (рис. 4) возмущающее влияние на сетевое напряжение является незначительным. Наибольшее значение потребляемого ПЧ тока составило  $I_{C,maxB+} = 563$  А, что выше установившегося значения в статическом режиме работы до переключения на 33 А, или 6,29 %. В отрицательной полуволне значение сетевого тока достигло  $I_{C,maxC+} = 553$  А (+20 А, или +3,77 %). Напряжение в звене постоянного

тока достигло максимума  $U_{DCmax} = 4853$  В, что больше заданного значения  $U_{DCзад} = 4840$  В на 13 В, или 0,269 %. Минимальное значение напряжения достигло величины  $U_{DCmin} = 4818$  В, что меньше заданного значения на 22 В, или на 0,455 %.

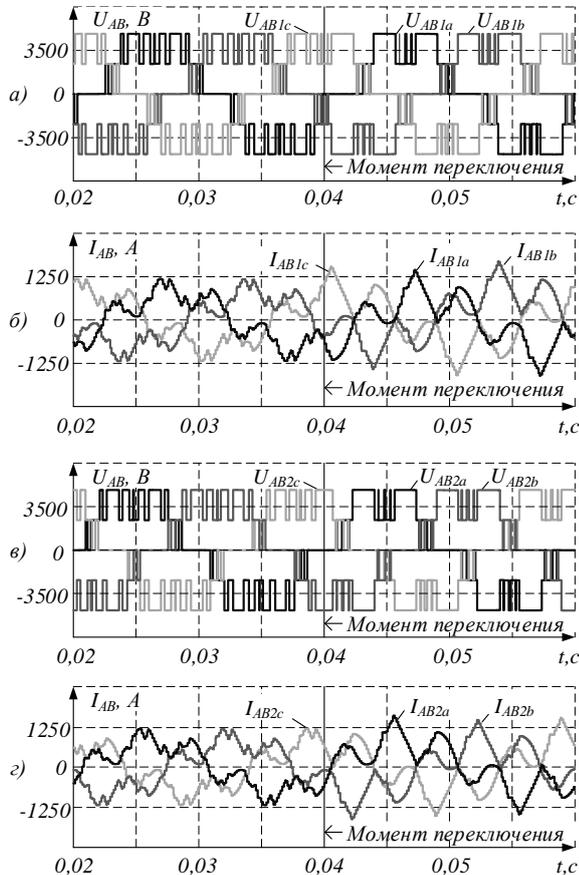


Рис. 5. Осциллограммы при переключении с исходной таблицы на первую дополнительную: а, в – фазного напряжения; б, г – потребляемого тока каждого АВ

Во втором эксперименте при переключении с исходной таблицы на дополнительную таблицу №2 (рис. 6) возмущающее влияние на сетевое напряжение также является незначительным и не анализировалось. Наибольшее значение потребляемого ПЧ тока составило  $I_{C,maxC+} = 582$  А, что выше установившегося значения в статическом режиме работы до переключения на 51 А, или 9,30 %. В отрицательной полуволне значение сетевого тока достигло  $I_{C,maxA+} = 590$  А (+56 А, или +10,8 %). Напряжение в звене постоянного тока достигло максимума  $U_{DCmax} = 4867$  В, что больше заданного значения  $U_{DCзад} = 4840$  В на 27 В, или 0,558 %. Минимальное значение напряжения достигло величины  $U_{DCmin} = 4796$  В, что меньше заданного значения на 44 В, или на 0,909 %.

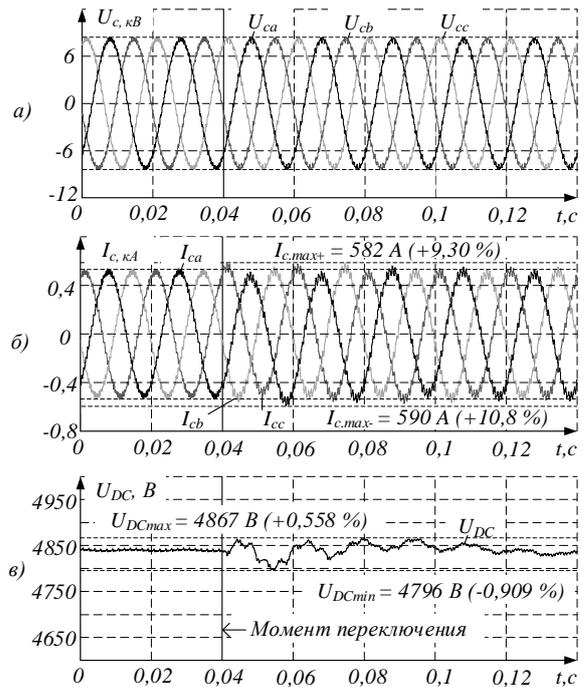


Рис. 6. Осциллограммы при переключении с исходной таблицы на вторую дополнительную: а – сетевого напряжения; б – потребляемого АВ тока; в – напряжения в звене постоянного тока

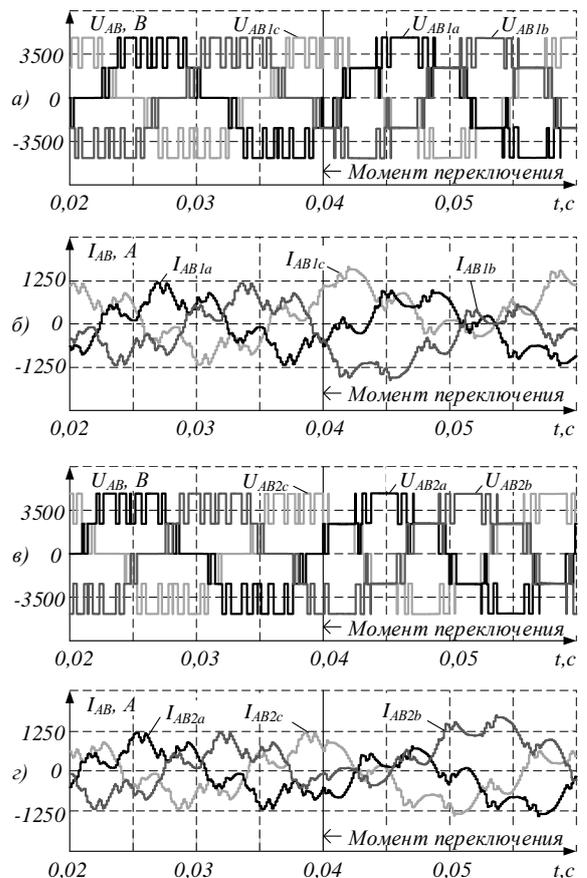


Рис. 7. Осциллограммы при переключении с исходной таблицы на вторую дополнительную: а, в – фазного напряжения; б, г – потребляемого тока каждого АВ

Для удобства сравнения результатов эксперимента все основные данные сведены в таблицу.

#### Показатели переходных процессов

Параметр	Эксперимент 1	Эксперимент 2
$I_{C.max+}$	563 А (+33 А)	582 А (+51 А)
	+6,29 %	9,30 %
$I_{C.max-}$	553 А (+20 А)	590 А (+56 А)
	+3,77 %	+10,8 %
$U_{DC.max}$	4853 В (+13 В)	4867 В (+27 В)
	+0,269 %	+0,558 %
$U_{DC.min}$	4818 В (– 22 В)	4796 В (–44 В)
	–0,455 %	–0,909 %

На основании анализа показателей качества переходных процессов, представленных в таблице, можно сделать вывод, что переход с исходной таблицы на дополнительную таблицу №1, углы переключения силовых ключей в которой имеют близкие значения с исходной, и переход на дополнительную таблицу №2 с значительно отличающимися углами переключения от исходной не вызывает сильных возмущающих воздействий на работу ПЧ, способных привести к срабатыванию аппаратных или программных защит преобразователя, а именно защиты по максимальному току или по величине напряжения в звене постоянного тока. Однако следует отметить, что переход на дополнительную таблицу №1 вызывает меньшие (примерно в 2 раза) колебания потребляемого ПЧ тока и напряжения в звене постоянного тока.

**Выводы.** Предложенная усовершенствованная система управления АВ на базе алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник включает в себя две дополнительные таблицы с близкими и сильно отличающимися от исходной углами переключения силовых ключей. В среде Matlab-Simulink на основе параметров главного электропривода стана холодной прокатки 2000 ЛПЦ-11 ПАО «ММК» реализована имитационная модель ПЧ с АВ с предложенным усовершенствованным алгоритмом.

По результатам двух экспериментов на имитационной модели сделан вывод о устойчивой работоспособности ПЧ при переходе системой управления с исходной таблицы на дополнительные таблицы углов переключения силовых ключей АВ. Переход на дополнительную таблицу с угла-

ми переключения, приближенными к исходной, вызывает меньшие колебания потребляемого ПЧ тока и напряжения в звене постоянного тока. При реализации усовершенствованной системы управления желательно обеспечить расчет углов, максимально схожих с исходной таблицей.

При переходе с одной таблицы на другую на период переходных процессов в ПЧ требуется ограничить переключения на другие таблицы для обеспечения устойчивой работы ПЧ.

Наибольшую эффективность данный усовершенствованный алгоритм показывает при применении в ПЧ с АВ большой мощности в условиях частых изменений режимов внутризаводского электроснабжения и режимов работы других мощных потребителей электрической энергии в электротехническом комплексе.

#### Список литературы

1. **Исследование** воздействия активных выпрямителей большой мощности на питающую сеть / Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев и др. // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 1. – С. 80–83.
2. **Экспериментальные** исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2016. – Т. 14, № 4. – С. 96–105.
3. **Использование** статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутризаводского электроснабжения / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.С. Ивекеев и др. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 1. – С. 1–11.
4. **Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П.** Математическая модель активного выпрямителя в несимметричных режимах работы // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 1, № 2. – С. 3–9.
5. **Маклаков А.С.** Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистового стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 16–25.
6. **Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П.** Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов //

Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 2. – С. 48–52.

7. **Крубцов Д.С., Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П.** Способы управления активными выпрямителями главных электроприводов прокатных станов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2013. – № 71. – С. 3–6.

8. **Маклаков А.С., Маклакова Е.А.** Анализ электромагнитной совместимости 18-пульсной схемы соединения трехуровневых АВН при использовании метода ШИМ с удалением выделенных гармоник // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т. 4, №1. – С. 66–73.

9. **Радионон А.А., Маклаков А.С., Цзин Тао.** Применение метода роя частиц для определения углов переключения в алгоритме широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – № 1(42). – С. 38–44.

10. **Гасияров В.Р., Радионон А.А., Маклаков А.С.** Моделирование трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 1(34). – С. 4–9.

11. **Сравнение** способов оптимальной минимизации коэффициента гармоник и исключения гармоник с регулированием напряжения для инверторов с многоуровневым выходным напряжением / С.В. Аверин, Т.В. Анисимова, А.Н. Данилина и др. // Практическая силовая электроника. – 2010. – № 1(37). – С. 19–26.

12. **Маклаков А.С.** Гибридный алгоритм модуляции на основе пространственно-векторной ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 92–100. doi: 10.14529/power180112

13. **Николаев А.А., Гилемов И.Г.** Улучшение качества напряжения в электрических сетях с активными выпрямителями за счет выбора оптимальных таблиц углов переключения ШИМ // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – № 4(45). – С. 35–42. doi: 10.18503/2311-8318-2019-4(45)-35-42.

14. **Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Antropova L.I.** Features of the Mathematical Modeling of Frequency Converters with Active Rectifiers for power quality analysis in internal power supply systems // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus 2020. – 2020. – С. 774–778. doi:10.1109/eiconrus49466.2020.9038988.

15. **Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П.** Математическая модель силовой схемы главных электроприводов

прокатных станов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 3–7.

## References

1. Khrumshin, T.R., Kornilov, G.P., Nikolaev, A.A., Khrumshin, R.R., Krubtsov, D.S. Issledovanie vozdeystviya aktivnykh vypryamiteley bol'shoy moshchnosti na pitayushchuyu set' [Research of Influence of High Power Active Rectifiers on Mains Supply]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 1, pp. 80–83.

2. Nikolaev, A.A., Kornilov, G.P., Khrumshin, T.R., Nikiforov, G., Mutallapova, F.F. Eksperimental'nye issledovaniya elektromagnitnoy sovместимости sovremennykh elektroprivodov v sisteme elektrosnabzheniya metallurgicheskogo predpriyatiya [Experimental studies of electromagnetic compatibility of modern electric drives in the power supply system of iron and steel enterprise]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2016, vol. 14, no. 4, pp. 96–105.

3. Nikolaev, A.A., Kornilov, G.P., Ivekeev, V.S., Lozhkin, I.A., Kotyishev, V.E. Ispol'zovanie staticheskogo tiristornogo kompensatora sverkhmoshchnoy dugovoy staleplavil'noy pechi dlya obespecheniya ustoychivosti elektro-energeticheskoy sistemy i povysheniya nadezhnosti vnutrizavodskogo elektrosnabzheniya [Application of the Static Var Compensator of the Ultra-High Power Electric Arc Steel Furnance to Support Electrical Power System Stability and Increase Reliability of Factory Power Supply]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, no. 1, pp. 1–11.

4. Khrumshin, T.R., Krubtsov, D.S., Kornilov, G.P. Matematicheskaya model' aktivnogo vypryamitelya v nesimmetrichnykh rezhimakh raboty [Mathematical model of the active rectifier under unbalanced voltage operating conditions]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, vol. 1, no. 2, pp. 3–9.

5. Maklakov, A.S. Imitatsionnoe modelirovanie glavnogo elektroprivoda prokatnoy kleti tololistovogo stana 5000 [Simulation of the Main Electric Drive of the 5000 plate mill]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, vol. 2, no. 3, pp. 16–25.

6. Khrumshin, T.R., Krubtsov, D.S., Kornilov, G.P. Otsenka metodov shirotno-impul'snoy modulyatsii napryazheniya aktivnykh vypryamiteley prokatnykh stanov [Evaluation of PWM methods of voltage of active rectifiers of rolling mills]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2013, no. 2, pp. 48–52.

7. Krubtsov, D.S., Khrumshin, T.R., Kornilov, G.P. Sposoby upravleniya aktivnymi vypryamitelyami glavnykh elektroprivodov prokatnykh stanov [Active rectifiers control methods of main drive of rolling mills]. *Aktual'nye problemy*

*sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya*, 2013, no. 71, pp. 3–6.

8. Maklakov, A.S., Maklakova, E.A. Analiz elektromagnitnoy sovmestimosti 18-pul'snoy skhemy soedineniya trekhurovnykh AVN pri ispol'zovanii metoda ShIM s udaleniem vydelennykh garmonik [EMC Analysis of 18-pulse connection circuit based on 3L-AFE with SHE PWM method]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 66–73.

9. Radionov, A.A., Maklakov, A.S., Tszin, Tao. Primenenie metoda roya chastits dlya opredeleniya uglov pereklyucheniya v algoritme shirotno-impul'snoy modulyatsii s udaleniem vydelennykh garmonik [Application of Particle Swarm method to determine the angle of switching using Selective Harmonic Elimination Technique PWM algorithm]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2019, no. 1(42), pp. 38–44.

10. Gasiyarov, V.R., Radionov, A.A., Maklakov, A.S. Modelirovanie trekhurovnevo preobrazovatelya chastoty s fiksirovannoy neytral'yu pri algoritme ShIM s udaleniem vydelennykh garmonik [Simulation of 3L NPC Converter with selective harmonic elimination PWM algorithm]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2017, no. 1(34), pp. 4–9.

11. Averin, S.V., Anisimova, T.V., Danilina, A.N., Kryuchkov, V.V., Sledkov, Yu.G. Sravnenie sposobov optimal'noy minimizatsii koeffitsienta garmonik i isklyucheniya garmonik s regulirovaniem napryazheniya dlya invertorov s mnogourovnevym vykhodnym napryazheniem [Comparison of methods of Optimal Output Ratio Minimization and Harmonic Elimination with Voltage

Regulation for Multilayer Harmonic Inverters]. *Prakticheskaya silovaya elektronika*, 2010, no. 1(37), pp. 19–26.

12. Maklakov, A.S. Gibridnyy algoritm modulyatsii na osnove prostranstvenno-vektornoy ShIM i ShIM s udaleniem vydelennykh garmonik [Hybrid Algorithm of Modulation Based on SHE PWM and SVP WM]. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 92–100. doi: 10.14529/power180112.

13. Nikolaev, A.A., Gilemov, I.G. Uluchshenie kachestva napryazheniya v elektricheskikh setyakh s aktivnymi vypryamitelyami za schet vybora optimal'nykh tablits uglov pereklyucheniya ShIM [Improvement of Voltage Quality in Supply Network with Active Rectifiers by Selecting Optimal Switching Angle Tables of PWM]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2019, no. 4(45), pp. 35–42. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-35-42](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-35-42)

14. Nikolaev, A.A., Gilemov, I.G., Antropova, L.I. Features of the Mathematical Modeling of Frequency Converters with Active Rectifiers for power quality analysis in internal power supply systems. Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020, 2020, pp. 774–778. doi:10.1109/eiconrus49466.2020.9038988

15. Khrumshin, T.R., Krubtsov, D.S., Kornilov, G.P. Matematicheskaya model' silovoy skhemy glavnykh elektroprivodov prokatnykh stanov [Mathematical Model of the Power Circuit of Main Electric Drives of Rolling Mills]. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 3–7.