

УДК 621.314.64

## Исследование параллельной работы автоматизированных электроприводов прокатного стана и дуговой сталеплавильной печи

А.А. Николаев, А.С. Денисевич, М.В. Буланов  
ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,  
г. Магнитогорск, Российская Федерация  
E-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Современные электроприводы прокатных станов выполняются на базе мощных высоковольтных синхронных (асинхронных) двигателей и преобразователей частоты с активными выпрямителями. Существующие системы преобразователей частоты с активными выпрямителями не адаптированы к несимметричным провалам напряжения, возникающим во внешней питающей сети, в результате чего могут происходить частые отключения преобразователей. В выполненных ранее исследованиях предложены мероприятия по компенсации провалов напряжения за счет использования статических тиристорных компенсаторов, функционирующих в системах электроснабжения дуговых сталеплавильных печей, при условии параллельной работы электросталеплавильного комплекса и преобразователей частоты с активными выпрямителями прокатного стана. Однако в данных работах не проводились исследования процессов в преобразователях частоты с активными выпрямителями при несимметрии и колебаниях напряжения, вызванных работой дуговых сталеплавильных печей. В связи с этим исследование режимов работы преобразователей частоты с активными выпрямителями, подключенных на параллельную работу с комплексом «ДСП-СТК», является важной задачей.

**Материалы и методы:** При проведении исследований использованы экспериментальные массивы электрических параметров, записанные на действующих комплексах «ДСП-СТК», а также известные методы математического моделирования силовых преобразователей и их систем управления. При моделировании активного выпрямителя использованы существующие методы широтно-импульсной модуляции, реализованные в серийных преобразователях частоты с активными выпрямителями.

**Результаты:** Проведен анализ параллельной работы электросталеплавильного и прокатного комплексов при наличии и отсутствии статических тиристорных компенсаторов. На основании выполненных исследований впервые доказана возможность параллельной работы комплекса «ДСП-СТК» и преобразователей частоты с активными выпрямителями.

**Выводы:** Результаты исследований имеют теоретическую значимость для теории электропривода и электроснабжения промышленных предприятий и могут найти практическое применение при проектировании систем электроснабжения главных электроприводов прокатных станов, а также при выборе параметров силовых схем и систем управления преобразователей частоты с активными выпрямителями в случае необходимости обеспечения дополнительной защиты преобразователей частоты с активными выпрямителями от внешних провалов напряжения.

**Ключевые слова:** преобразователь частоты, активный выпрямитель, дуговая сталеплавильная печь, статический тиристорный компенсатор, несимметрия напряжения, провал напряжения, качество электрической энергии.

## Investigation into parallel operation of rolling mill automated electric drives and an electric arc furnace

A.A. Nikolayev, A.S. Denisevich, M.V. Bulanov  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation  
E-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

### Abstract

**Background:** Electric drives of modern rolling mills have high-power synchronous (asynchronous) motors and frequency converters with active rectifiers (FC with AR). Automated electric drives based on FC with AR are not adapted to asymmetrical voltage sags occurring in the external power supply system, which may result in frequent converter tripping. The studies conducted earlier considered ways of voltage sag compensation by means of static var compensators (SVC) in arc furnace electric supply systems working in parallel with rolling mill FC with AR. But these works did not study the possibility of parallel work of the electric steelmaking complex and FC with AR under voltage asymmetry and voltage deviation produced by electric arc furnace (EAF) operation. All this makes it important to study the operating modes of frequency converters connected in parallel to an EAF-SVC complex.

**Materials and methods:** Experimental arrays of electrical parameters recorded at working complexes «EAF-SVC» and known methods of mathematical modeling of AR control systems are used in the investigation. The known methods of pulse width modulation (PWM) realized in series FC with AR were used to model control systems of AR.

**Results:** Parallel work of electric steelmaking and rolling mill complexes has been analysed for the cases of present and absent static var compensators. Based on these studies it has been proved for the first time that EAF and FC with AR can work in parallel.

**Conclusions:** The investigation results have theoretical importance for the theory of electric drive and power supply systems of industrial enterprises and can be used to design power supply systems of the main rolling mill electric drives, to choose the parameters of electrical circuits and control systems of FCs with AR if additional protection from external frequency sags is required for FCs with AR.

**Key words:** frequency converter, active rectifier, electric arc furnace, static var compensator, voltage asymmetry, voltage sag, power quality.

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2017.3.059-069

**Введение.** В настоящее время современные мощные электроприводы прокатных станов выполняются на базе высоковольтных двигателей переменного тока (синхронных и асинхронных) и преобразователей частоты с активными выпрямителями (ПЧ с АВ), выполненных по многоуровневой схеме. Силовая схема АВ полностью идентична схеме автономного инвертора напряжения (АИН), построенного на полностью управляемых вентилях (IGCT-тиристоры, IGBT, IEGT- транзисторы) [1, 2]. Применение преобразователей частоты с трехуровневым АВ способствует улучшению гармонического состава токов и напряжений, потребляемых из сети, обеспечивает работу с заданным коэффициентом мощности, а также рекуперацию энергии в сеть.

Опыт эксплуатации ПЧ с АВ показывает, что их системы управления и системы защиты не адаптированы к несимметричным провалам напряжения питающей сети [1, 2]. Кратковременные провалы напряжения, которые характеризуются длительностью 100–300 мс и глубиной 15–50 % приводят к аварийным отключениям электроприводов и нарушению технологического процесса [3, 4]. В [4, 5] были предложены мероприятия по компенсации в сети провалов напряжения с помощью резервов реактивной мощности статического тиристорного компенсатора (СТК) дуговой сталеплавильной печи (ДСП). Для этого было предложено объединить на параллельную работу секции шин, питающие электросталеплавильный комплекс и главные электроприводы прокатного стана. При этом не проводилась проверка возможности устойчивой параллельной работы электросталеплавильного комплекса и преобразователя частоты с АВ при наличии несимметрии напряжения, возникающей при работе ДСП. В данных исследованиях проведена оценка негативного воздействия комплекса «ДСП-СТК» на работу системы управления и силовой схемы АВ [5] при вынужденном параллельном подключении данных комплексов. В качестве примера была рассмотрена система внутривозовского электроснабжения металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji» со сверхмощным комплексом «ДСП-УКП-СТК» и листопркатным комплексом (рис. 1). Как было отмечено в [4], на данном заводе имеет место проблема частых отключений ПЧ с АВ при возник-

новении провалов напряжения во внешней питающей сети 380 кВ.

Для решения этой проблемы было предложено объединить секции шин двух комплексов на параллельную работу. Для этого была разработана имитационная модель активного выпрямителя и модель сети 34,5 кВ с учетом реальных искажений мгновенных значений линейных напряжений, вызванных работой ДСП и установки ковш-печь (УКП). Также было учтено влияние СТК на форму напряжения. В данной модели на основании массивов экспериментальных данных, полученных на действующих электротехнических комплексах «ДСП-СТК», были воспроизведены реальные колебания, искажения и несимметрия напряжения на секции 34,5 кВ для начального периода плавки в ДСП, что позволило проанализировать работу АВ с различными алгоритмами широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в данных условиях.

**Материалы и методы.** Дуговая сталеплавильная печь является потребителем электрической энергии с нелинейной характеристикой и резкопеременным режимом работы, поэтому при работе печи наблюдаются нарушения показателей качества электрической энергии, несимметрия питающего напряжения и повышение коэффициента реактивной мощности. Для оценки возможности параллельной работы электросталеплавильного комплекса и ПЧ с АВ были использованы экспериментальные массивы мгновенных значений линейных напряжений в точке подключения печного трансформатора на секции 34,5 кВ в системе электроснабжения комплекса «ДСП-250-СТК» ЗАО «ММК Metalurji» (г. Искендерун, Турция). Для исследования был выбран начальный режим плавки, где имеют место частые обрывы дуг и короткие замыкания, которые являются причиной колебаний и несимметрии напряжений в точке подключения печного трансформатора.

Применение СТК способствует стабилизации напряжения и улучшению показателей качества электрической энергии в точке подключения ДСП, однако возмущения не устраняются полностью и в случае подключения ПЧ с АВ на параллельную работу могут оказать определенное негативное воздействие.

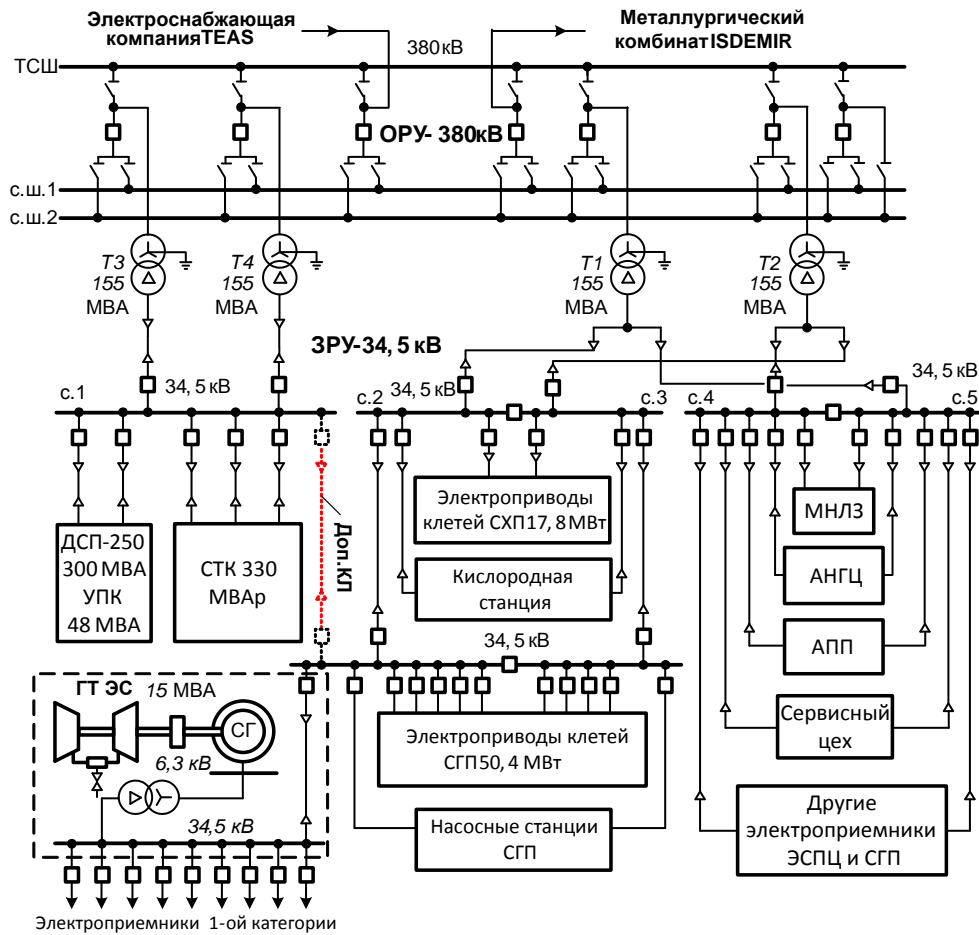


Рис. 1. Упрощенная схема электроснабжения металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji»: СХП – стан холодной прокатки; СГП – стан горячей прокатки; МНЛЗ – машина непрерывного литья заготовки; АНГЦ – агрегат непрерывного горячего цинкования; АПП – агрегат полимерных покрытий; ГТЭС – газотурбинная электростанция; УПК – установка печь-ковш; ДСП – дуговая сталеплавильная печь; СТК – статический тиристорный компенсатор

На рис. 2, а,б представлены кривые мгновенных значений напряжений на секции 34,5 кВ и токов, потребляемых ДСП-250 в начальный период плавки.

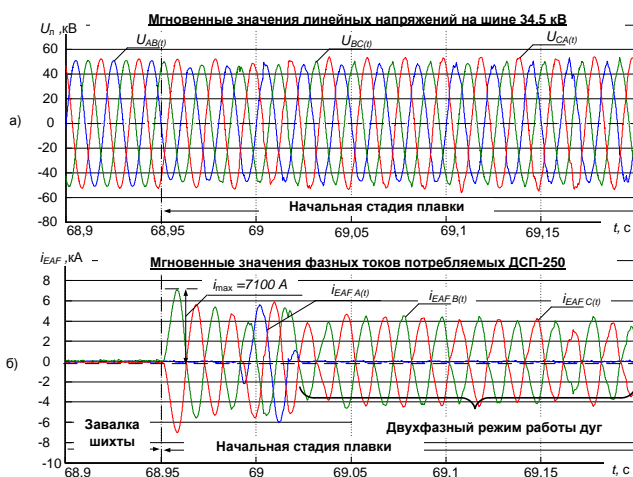


Рис. 2. Кривые мгновенных значений: а – линейных напряжений на шине 34,5 кВ; б – фазных токов, потребляемых ДСП-250

При проведении исследований использовалась разработанная ранее математическая модель ПЧ с АВ [5]. Автономный инвертор напряжения и синхронный двигатель (СД) представлены упрощенно источником тока. Данное упрощение является допустимым и обеспечивает адекватное воспроизведение режимов работы АВ [1]. Система управления (СУ) АВ осуществляет поддержание напряжения в звене постоянного тока на заданном уровне и обеспечивает коэффициент мощности на входе преобразователя, равным единице [7–16]. Система управления АВ выполнена двухконтурной с внутренним двухканальным контуром регулирования  $dq$  составляющих токов и внешним контуром регулирования выпрямленного напряжения АВ. Блок-схема модели представлена на рис. 3.

Проведены исследования возможности параллельной работы ПЧ с АВ и мощного электросталеплавильного комплекса «ДСП-СТК» для трех алгоритмов ШИМ:

- 1) ШИМ с фиксированными значениями углов переключения (Fixed Pulse Pattern Control);
- 2) векторный алгоритм ШИМ (Space Vector Pulse Width Modulation);

3) ШИМ с удалением выделенных гармоник (Selective Harmonic Elimination Pulse Width Modulation).

**Описание ШИМ с фиксированными значениями углов переключения.** Как было сказано выше, в большинстве случаев главные электроприводы прокатных станов выполняются на базе высоковольтных ПЧ с АВ, в которых реализуются модифицированные алгоритмы ШИМ с низкой частотой [5]. Одним из таких алгоритмов является ШИМ с фиксированными значениями углов переключения<sup>1</sup>.

Метод ШИМ с фиксированными значениями углов переключения отличается от традиционных алгоритмов тем, что углы переключения транзисторов рассчитываются заранее, а не в режиме реального времени, как в традиционных алгоритмах. Критерием, на основании которого рассчитываются углы переключения, является минимальная величина активных потерь в транзисторах и ограничение высших гармоник тока, генерируемых в сеть (минимальное значение суммарного коэффициента искажения тока). Принцип действия используемого алгоритма ШИМ заключается в фиксации амплитуды напряжения и изменения фазы напряжения на входе АВ по отношению к фазе напряжения питания. Другими словами, регулирование активной составляющей тока происходит за счет изменения величины реактивной составляющей.

Упрощенная структурная схема алгоритма ШИМ с фиксированными значениями углов переключения приведена на рис. 4. Принцип работы алгоритма состоит в следующем. Во внешнем контуре регулирования уровня напряжения в звене постоянного тока формируется ток задания по активной составляющей  $I_{d,зад}$ , вследствие сравнения фактического  $U_{DC,факт}$  и заданного  $U_{DC,зад}$  значения напряжений в звене постоянного тока. Ошибка регулирования напряжения устраняется пропорционально-интегральным регулятором  $PI$ .

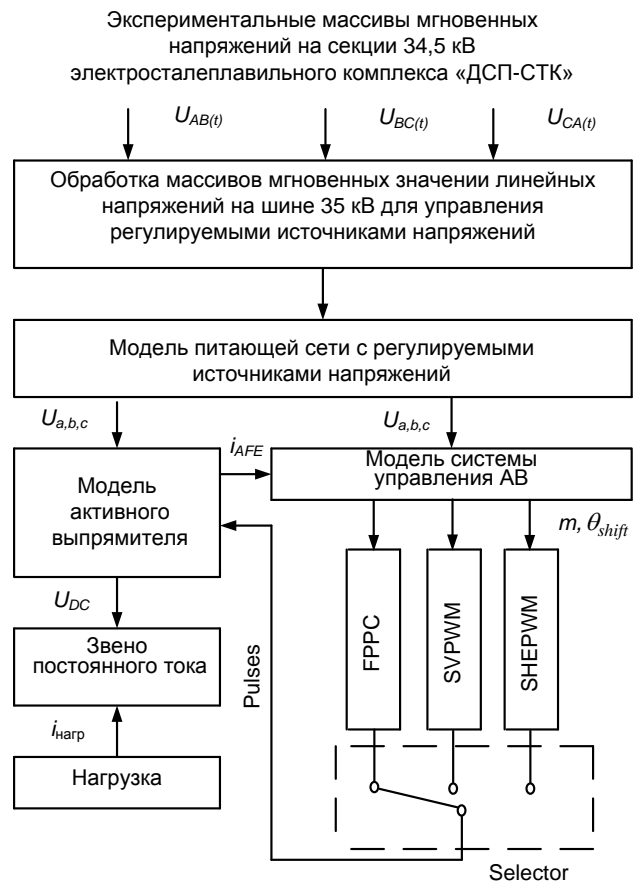


Рис. 3. Блок-схема имитационной модели ПЧ с АВ и питающей сети 34,5 кВ с учетом реальных искажений напряжения:  $U_{a,b,c}$  – фазные напряжения в сети 34,5 кВ;  $U_{DC}$  – напряжение в звене постоянного тока; В;  $i_{нагр}$  – ток нагрузки; А;  $i_{AFE}$  – ток на входе АВ; А;  $m$  – коэффициент модуляции;  $\theta_{shift}$  – угол сдвига;  $Pulses$  – импульсы управления тиристорами АВ

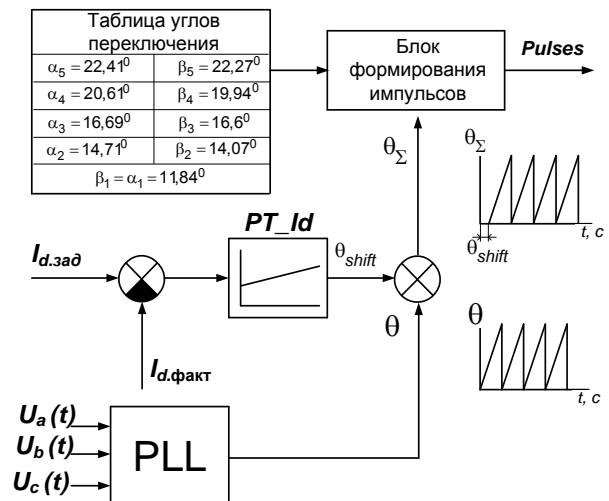


Рис. 4. Структурная схема ШИМ с фиксированными значениями углов переключения:  $U_a(t), U_b(t), U_c(t)$  – фазные напряжения сети; В;  $I_{d,зад}, I_{d,факт}$  – заданный и фактический токи по активной составляющей;  $PI\_Id$  – Пи-регулятор тока по активной составляющей; PLL – блок фазовой автоподстройки частоты

<sup>1</sup> Instruction manual: IEGT inverter, IEGT convertor TMdrive-70.

Затем сформированное значение активной составляющей тока  $i_{d,зад}$  сравнивается с фактическим значением тока  $i_d$ . Ошибка регулирования тока обрабатывается пропорционально-интегральным регулятором тока  $PT\_Id$ , на выходе которого формируется необходимый угол сдвига фазы напряжения на входе АВ  $\theta_{shift}$ . Вычисленный угол  $\theta_{shift}$  суммируется с опорным сигналом  $\theta$ , который формируется в блоке фазовой автоподстройки частоты (PLL). Сдвинутый на угол  $\theta_{shift}$  опорный сигнал поступает в блок формирования импульсов, где происходит сравнение с рассчитанными ранее углами переключений. При равенстве опорного сигнала  $\theta_{\Sigma}$  и углов переключений формируются импульсы управления ключами активного выпрямителя.

**Описание векторного алгоритма ШИМ.**

Векторный алгоритм ШИМ отличается от предыдущего алгоритма тем, что углы переключения тиристоров рассчитываются в режиме реального времени. Система управления АВ при векторном алгоритме ШИМ выполняется двухконтурной: с внутренним контуром регулирования  $dq$  составляющих токов и внешним контуром регулирования уровня напряжения в звене постоянного тока. Аналогично описанному выше алгоритму ШИМ происходит формирование тока задания по активной составляющей  $i_{d,зад}$ . Ток задания по реактивной составляющей  $i_{q,зад}$  напрямую определяет потребление реактивной мощности ПЧ из питающей сети. В нормальном режиме работы значение  $i_{q,зад}$  устанавливается равным 0. Затем активная и реактивная составляющие тока сравниваются с заданными значениями. Сигналы ошибок регулирования обрабатываются пропорционально интегральными регуляторами, на выходе которых формируются напряжения задания по активной и реактивной составляющим. После прибавления компенсирующих связей напряжения задания  $U_{dз}$  и  $U_{qз}$  поступают на вход блока расчета коэффициента модуляции  $m$  и фазового угла  $\theta$  [4]. На основании этих параметров в блоке формирования напряжения задания происходит вычисление обобщенного вектора напряжения, который поступает на вход блока SVPWM. В блоке SVPWM определяются углы переключения ключей и формируются импульсы управления. Электроприводы прокатного стана выполнены на базе трехуровневых ПЧ с АВ. Для данного типа АВ возможны 27 различных комбинаций положения ИГСТ-тиристоров [6–8]. В каждый момент времени из них выбираются только три, которые геометрически являются ближайшими задающему вектору напряжения. Структурная схема векторного алгоритма ШИМ представлена на рис. 5.

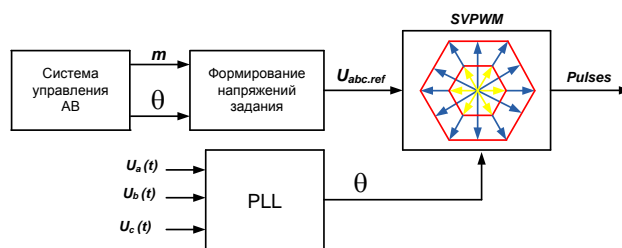


Рис. 5. Структурная схема векторного алгоритма ШИМ

**Описание алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник.**

В преобразователях частоты производства фирмы АВВ (серии ACS 6000) для управления тиристорами АВ используется ШИМ с удалением выделенных гармоник. Данный алгоритм ШИМ обеспечивает удовлетворительный гармонический состав тока на входе АВ при низкой частоте переключения тиристоров (450–600 Гц).

Как известно, напряжение на входе АВ формируется в виде прямоугольных импульсов, содержит нечетный спектр гармоник, амплитуды которых зависят от количества импульсов за четверть периода и значений углов переключений. Углы переключений подбираются таким образом, чтобы в кривой напряжения не было наиболее значимых гармоник. Основная гармоника при этом остается на уровне, задаваемом коэффициентом модуляции. Связь между углами переключений определяется следующей системой уравнений [1]:

$$F(\alpha) = \begin{cases} \mu - \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cdot \cos(\alpha_i), \\ 0 - \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cdot \cos(n_1 \alpha_i), \\ 0 - \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cdot \cos(n_2 \alpha_i), \\ \dots \\ 0 - \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cdot \cos(n_N \alpha_i). \end{cases} \quad (1)$$

Для решения системы уравнений (1) используется метод перебора начальных приближений. Полученные результаты решений системы уравнений должны удовлетворять условию

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_N < \pi/2. \quad (2)$$

Зависимость углов переключений от коэффициента модуляции представлена на рис. 6.

Система управления АВ, как и в предыдущем методе ШИМ, формирует коэффициент модуляции  $m$  и угол  $\theta$ . Коэффициент модуляции поступает в блок с заранее рассчитанными значениями углов переключений, на выходе которого формируются углы переключения, которые сравниваются с несущим пилообразным сигналам

лом. Сравнение происходит с помощью логических выражений:

$$(g > \alpha_1) \& (g < \alpha_2); \tag{3}$$

$$(g > \alpha_3) \& (g < 180 - \alpha_3); \tag{4}$$

$$(g > 180 - \alpha_2) \& (g < 180 - \alpha_1). \tag{5}$$

Логические выражения (3)–(5) являются условием формирования на выходе СУ коэффициента модуляции 1. Если ни одно из условий не выполняется, то на выходе – 0. Выражения (3)–(5) справедливы для положительной полуволны, для отрицательной полуволны кривой напряжения симметрично отражаем ее относительно оси  $wt$ . Структурная схема алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник представлена на рис. 7.

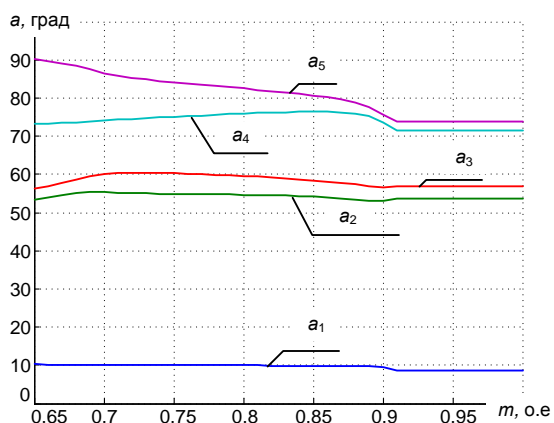


Рис. 6. Зависимость углов переключений от коэффициента модуляции

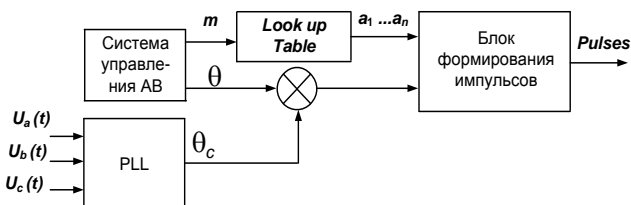


Рис. 7. Структурная схема ШИМ с удалением выделенных гармоник

**Результаты исследований.** На основании разработанной математической модели были проведены исследования возможности параллельной работы электросталеплавильного комплекса и ПЧ с активным выпрямителем. Для проведения исследований на шинах 34,5 кВ, от которых получает питание ДСП-250, были записаны массивы мгновенных значений линейных напряжений. После обработки полученных массивов на математической модели были восстановлены три синусоиды линейных напряжений (рис. 2,а), которые использовались в качестве исходных сигналов для трех управляемых ис-

точников напряжения, моделирующих сеть 34,5 кВ с комплексом «ДСП-СТК».

При проведении исследований анализировались режимы работы АВ при отключенном и включенном СТК. В первом случае в точке подключения печного трансформатора имели место наибольшие отклонения и несимметрия напряжения.

В процессе исследований оценивались токи на входе активного выпрямителя, а также напряжение в звене постоянного тока. Для демонстрации характера изменения токов на входе АВ и напряжения в звене постоянного тока на рис. 8 представлены результаты моделирования параллельной работы ПЧ с АВ и комплекса «ДСП-СТК» на интервале времени 1 секунда. Моделирование проводилось для трех алгоритмов управления ключами АВ: 1) ШИМ с фиксированными значениями углов переключения (рис. 8,а,б); 2) векторный алгоритм ШИМ (рис. 8,в,г); 3) ШИМ с удалением выделенных гармоник (рис. 8,д,е).

Анализ результатов моделирования показал, что при использовании ШИМ с фиксированными значениями углов переключения наблюдается сильная несимметрия фазных токов на входе АВ (рис. 8,а), вызванная несимметрией питающего напряжения на первом периоде плавки (рис. 1,а), а также происходит увеличение токов, потребляемых АВ. Рост тока вызван увеличением сигнала задания по активной составляющей тока, необходимого для поддержания уровня напряжения в звене постоянного тока на заданном уровне (рис. 8,б). В начальный момент работы ДСП при зажигании электрических дуг в звене постоянного тока АВ происходит снижение напряжения до величины 4550 В, затем система управления восстанавливает уровень напряжения до заданного уровня 4860 В. При восстановлении наблюдается перерегулирование, максимальное значение которого 5150 В.

Заметное улучшение переходных процессов наблюдается при использовании векторного алгоритма ШИМ и ШИМ с удалением выделенных гармоник. При использовании данных алгоритмов ШИМ напряжение в звене постоянного тока поддерживается на заданном уровне с незначительными колебаниями, размах которых не превышает 200 В (рис. 9,д). В начальный момент работы печи (как и при ШИМ с фиксированными значениями углов переключения) возникает снижение уровня напряжения до значения 4650 В. Максимальное значение напряжения при восстановлении уровня напряжения составляет 5100 В. В токах, потребляемых АВ, так же как и в первом методе, наблюдается сильная несимметрия и увеличение амплитудного значения (рис. 8,в,д).

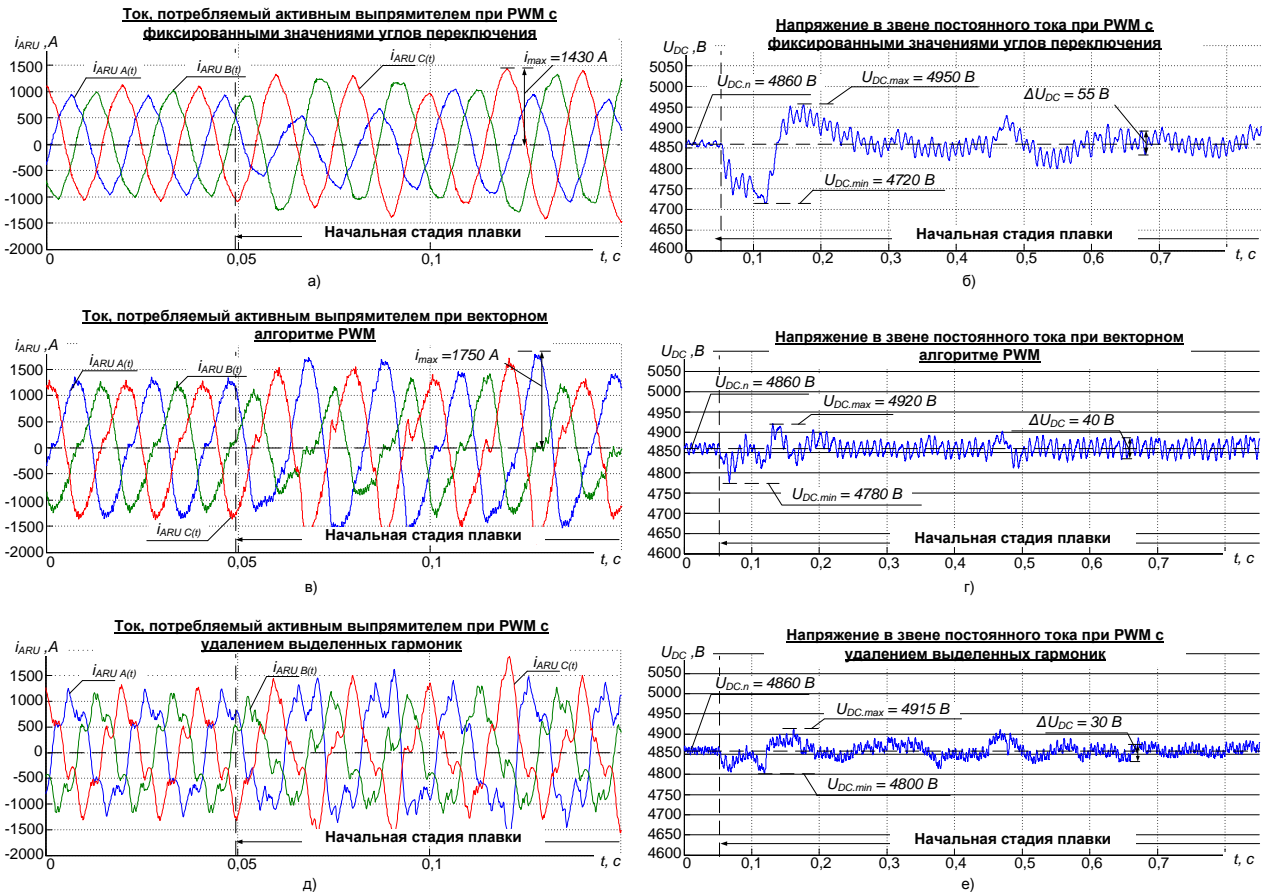


Рис. 8. Кривые мгновенных значений фазных токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока: а, б – ШИМ с фиксированными значениями углов переключений; в, г – при векторном алгоритме ШИМ; д, е – ШИМ с удалением выделенных гармоник

На рис. 9 представлены результаты исследований параллельной работы ПЧ с АВ и комплекса «ДСП-СТК» на начальной стадии расплавления твердой шихты в ДСП при наличии и отсутствии СТК на интервале времени 10 мин при использовании для управления вентилями АВ ШИМ с удалением выделенных гармоник.

Несимметрия напряжения сети, вызванная работой ДСП, приводит к увеличению токов на входе АВ и колебаниям напряжения в звене постоянного тока. Увеличение потребляемых токов АВ и колебания напряжения в звене постоянного тока могут привести к аварийному отключению ПЧ внутренней системой защиты АВ. В исследуемом ПЧ с АВ серии ACS 6000 производства фирмы АВВ предусмотрены следующие виды защит: 1) токовая отсечка, контролирующая токи на входе АВ ( $I_{AB,отс} = 2200 \text{ A}$ ); 2) в звене постоянного тока предусмотрены защиты, контролирующие максимальное ( $U_{DC,отс} = 5800 \text{ V}$ ) и минимальное ( $U_{DC,отс} = 4380 \text{ V}$ ) значения напряжения, а также величину отклонения от заданного напряжения (500 В).

На математической модели были проведены исследования параллельной работы двух комплексов: при отключенном и включенном СТК

(рис. 9). На всем интервале моделирования ( $t_{расч} = 600 \text{ c}$ ) уровень напряжения в звене постоянного тока находился на заданном уровне, с максимальным размахом колебания 275 В. Максимальное и минимальное значения напряжений в звене постоянного тока, а также размах колебаний не превышают значения уставок защиты ПЧ.

В первом случае, когда СТК не работает из-за несимметрии и отклонений напряжений в точке общего подключения, возникают сильные колебания напряжения в звене постоянного тока (рис. 9,и). Колебания напряжения в звене постоянного тока не превышают 350 В (рис. 9,и). В результате нестабильности напряжения в звене постоянного тока происходит увеличение несимметрии и действующего значения токов на входе АВ. Тем не менее увеличение токов на входе АВ и колебаний напряжения в звене постоянного тока не превышает уставок срабатывания защит АВ.

Заметное улучшение качества регулирования напряжения в звене постоянного тока АВ наблюдается при включении СТК. Применение СТК стабилизирует напряжение на шинах 34,5 кВ в точке общего подключения. В результате стабилизации напряжений сети снижаются

колебания напряжения в звене постоянного тока (рис. 9,к) до 200 В. Снижение размаха колебаний напряжения в звене постоянного тока приводит к уменьшению несимметрии и действующего

значения токов на входе АВ (рис. 9,е,з). Таким образом, применение компенсатора позволяет повысить устойчивость параллельной работы ПЧ с АВ и комплекса «ДСП-СТК».

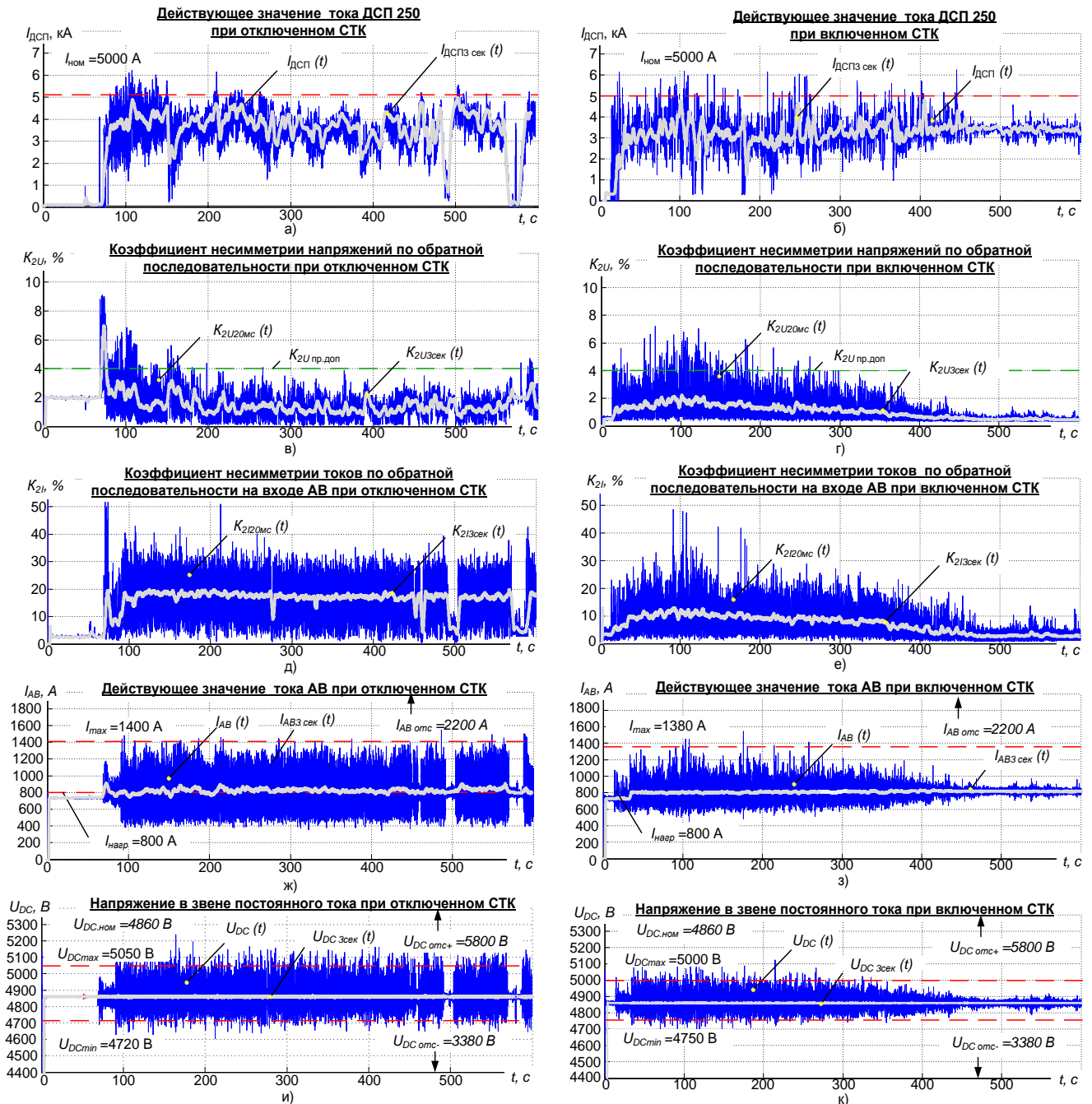


Рис. 9. Основные показатели качества электроэнергии на шинах 34,5 кВ при параллельной работе ПЧ с АВ и комплекса «ДСП-СТК»: а, б – действующее значение тока ДСП при отключенном и включенном СТК; в, г – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности при отключенном и включенном СТК; д, е – коэффициент несимметрии токов по обратной последовательности на входе АВ при отключенном и включенном СТК; ж, з – действующее значение тока АВ при отключенном и включенном СТК; и, к – напряжение в звене постоянного тока при отключенном и включенном СТК;  $I_{ДСП}(t)$  – действующее значение тока ДСП;  $I_{ДСП3сек}(t)$  – действующее значение тока ДСП с интервалом усреднения 3 с;  $K_{2U20мс}$ ,  $K_{2U3сек}$  – коэффициенты несимметрии напряжений по обратной последовательности с интервалами усреднения 20 мс и 3 с;  $K_{2I20мс}$ ,  $K_{2I3сек}$  – коэффициенты несимметрии токов по обратной последовательности с интервалами усреднения 20 мс и 3 с;  $I_{АВ}(t)$ ,  $I_{АВ3сек}(t)$  – действующее значение тока на входе АВ с интервалами усреднения 20 мс и 3 с;  $U_{DC}(t)$ ,  $U_{DC3сек}(t)$  – напряжение в звене постоянного тока с интервалами усреднения 20 мс и 3 с



Для дальнейшего улучшения качества регулирования напряжения в звене постоянного тока можно рекомендовать увеличение емкости конденсаторов в том случае, если изначально предполагается параллельная работа ПЧ с АВ с электросталеплавильным комплексом. На рис. 10,б представлены результаты моделирования работы АВ при увеличенной емкости звена постоянного тока. Увеличение емкости способствует уменьшению размаха колебаний напряжения в звене постоянного тока. Уменьшение размаха колебаний напряжения повышает устойчивость и надежность параллельной работы электросталеплавильного и прокатного комплексов.

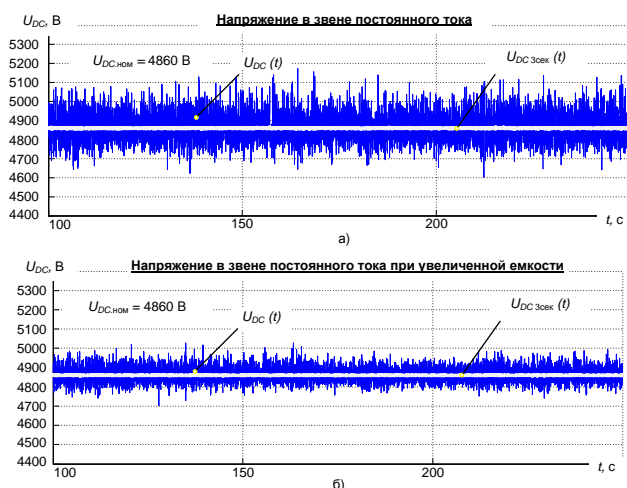


Рис. 10. Изменение напряжения в звене постоянного тока ПС с АВ при параллельной работе электросталеплавильного и прокатного комплексов: а – при стандартной емкости звена постоянного тока; б – при увеличенной емкости звена постоянного тока

**Выводы.** Проведенные исследования показали возможность параллельной работы электросталеплавильного комплекса и мощных преобразователей частоты с АВ. Данный режим работы может быть использован при наличии частых провалов напряжений во внешней питающей сети. В этом случае СТК с модифицированной системой управления позволяет компенсировать эти провалы за счет резерва реактивной мощности.

Сравнительный анализ при параллельной работе комплекса «ДСП-СТК» и ПЧ с АВ показал, что наиболее устойчивая работа АВ сохраняется при использовании векторного алгоритма ШИМ, а также ШИМ с удалением выделенных гармоник. Алгоритм ШИМ с фиксированными значениями углов переключения не является в данном случае предпочтительным, так как его использование приводит к более значительным колебаниям напряжения в звене постоянного тока и более сильной несимметрии тока на входе АВ, что снижает надежность работы ПЧ.

Включение СТК положительно влияет на работу ПЧ с АВ. Его использование способствует уменьшению размаха колебаний напряжения в звене постоянного тока на 2130 В и снижению стандартного отклонения напряжения от заданного значения на 20 В. Кроме того, улучшение качества регулирования напряжения в звене постоянного тока приводит к снижению среднего значения несимметрии токов на входе АВ с 16,3 до 7 %.

В результате исследования параллельной работы автоматизированных электроприводов прокатных станов и мощного электросталеплавильного комплекса при увеличенной емкости конденсаторов в звене постоянного тока установлено, что увеличение емкости конденсаторов в звене постоянного тока ПЧ с АВ приводит к повышению устойчивости работы ПЧ за счет уменьшения размаха колебаний напряжения в звене постоянного тока.

В случае параллельной работы электросталеплавильного и прокатного комплексов необходимо обеспечивать согласованную работу прокатного стана и ДСП для исключения работы АВ в кратковременные периоды сильных искажений напряжения. Например, при включении ненагруженного печного трансформатора в сети 34,5 кВ могут возникать провалы напряжения из-за броска тока намагничивания. Также при включении фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ) СТК в сети возникают кратковременные перенапряжения, величина которых может достигать 30% от номинального уровня [17]. Поэтому необходимо исключить работу прокатного стана в моменты включения печного трансформатора или ФКЦ СТК во избежание аварийного отключения ПЧ с АВ.

#### Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Application of Static Var Compensator of Ultra-High Power Electric Arc Furnace for Voltage Drops Compensation in Factory Power Supply Systems of Metallurgical Enterprise / A.A. Nikolaev, G.P. Kornilov, T.R. Khrumshin, I. Akcay, Y. Gok // Proceedings of IEEE 2014 Electrical Power and Energy Conference. (EPEC 2014). P. 235–241.
4. Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутривзаводского электроснабжения / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.С. Ивекеев и др. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 1. – С. 59–69.
5. Исследование влияния провалов напряжения в системе электроснабжения завода ММК «Metalurji» на работу главных электроприводов стана горячей прокатки / А.А. Николаев, А.С. Денисевич, И.А. Ложкин, М.М. Тухватуллин //

Электротехнические системы и комплексы. – 2015. – №3(28). – С. 8–14.

6. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Методы широтно-импульсной модуляции мощных активных выпрямителей при несимметрии напряжения // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – Т. 2, №4. – С. 7–13.

7. Алгоритм управления активным многоуровневым фильтром / Т.Р. Храмшин, Р.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, А.А. Мурзинов // *Известия высших учебных заведений. Электротехника*. – 2011. – № 4. – С. 102–105.

8. Маклаков А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистового стана 5000 // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – № 3. – С. 16–25.

9. Маклаков А.С., Гасияров В.Р., Белый А.В. Энергосберегающий электропривод на базе двухзвенного преобразователя частоты с активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 23–30.

10. Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р., Корнилов Г.П. Расчет электромагнитных процессов в трехфазном трехуровневом инверторе напряжения // *Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2010. – Вып. 1. – С. 221.*

11. Храмшин Т.Р., Абдулвелеев И.Р., Корнилов Г.П. Математическая модель силовой схемы мощного СТАТКОМА // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 38–46.

12. Маклаков А.С., Радионов А.А. Влияние на сеть трёхфазного мостового двухуровневого активного выпрямителя напряжения при различных видах ШИМ // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2013. – № 2. – С. 40–47.

13. 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.

14. Маклаков А.С., Радионов А.А. Исследование векторной ШИМ с различными таблицами переключения силовых ключей трехуровневого преобразователя // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 30–37.

15. Маклаков А.С. Анализ работы активного выпрямителя напряжения в режимах компенсации реактивной мощности // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2013. – № 1. – С. 43–50.

16. Разработка математической модели электропривода отводящего рольганга широкополосного стана горячей прокатки / С.И. Лукьянов, Н.В. Швидченко, Р.С. Пишнограев, Д.В. Швидченко // *Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах*. – 2011. – № 1–2. – С. 71–76.

17. Николаев А.А., Анохин В.В., Урманова Ф.Ф. Разработка способа снижения коммутационных перенапряжений при наличии фильтров высших гармоник статического тиристорного компенсатора // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2015. – Т. 2, № 4. – С. 72–76.

## References

1. Khramshin, 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* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, vol. 1, no. 2, pp. 3–9.

2. Khramshin, T.R., Krubtsov, D.S., Kornilov, G.P. Matematicheskaya model' silovoy skhemy glavnykh elektroprivodov prokatnykh stanov [A Mathematical Model of the Power Circuit of Main Electric Drives of Rolling Mills]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, vol. 1, no. 1, pp. 3–7.

3. Nikolaev, A.A., Kornilov, G.P., Khramshin, T.R., Akcaay, I., Gok, Y. Application of Static Var Compensator of Ultra-High Power Electric Arc Furnace for Voltage Drops Compensation in Factory Power Supply Systems of Metallurgical Enterprise. Proceedings of IEEE 2014 Electrical Power and Energy Conference. (EPEC 2014), pp. 235–241.

4. Nikolayev, A.A., Kornilov, G.P., Ivekeev, V.S., Lozhkin, I.A., Kotyshev, V.E., Tukhvatullin, M.M. Ispol'zovanie staticheskogo tiristorного kompensatora sverkhmoshchnoy dugovoy staleplavil'noy pechi dlya obespecheniya ustoychivosti elektroenergeticheskoy sistemy i povysheniya nadezhnosti vnutrizavodskogo elektrosnabzheniya [Using of the static var compensator of the ultra-high power electric arc furnace for maintaining electrical power system stability and increasing reliability of a factory power supply]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, no. 1, pp. 59–69.

5. Nikolayev, A.A., Denisevich, A.S., Lozhkin, I.A., Tukhvatullin, M.M. Issledovanie vliyaniya provalov napryazheniya v sisteme elektrosnabzheniya zavoda MMK «Metalurji» na rabotu glavnykh elektroprivodov stana goryachey prokatki [Investigation into voltage drops influence in the power supply system of the «MMK Metalurji» plant on the main electric drives of the hot strip mill]. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes]. Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University, 2015, no. 3 (28), pp. 8–14.

6. Khramshin, T.R., Krubtsov, D.S., Kornilov, G.P. Metody shirotno-impul'snoy modulyatsii moshchnykh aktivnykh vypryamiteley pri nesimmetrii napryazheniya [Methods of PWM of large power active rectifiers under unbalanced voltage operating conditions]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, vol. 2, no. 4, pp. 7–13.

7. Khramshin, T.R., Khramshin, R.R., Kornilov, G.P., Murzikov, A.A. Algoritm upravleniya aktivnym mnogourovnevnyim fil'trom [An algorithm of space vector modulation control of an active four-level filter]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Electromehnika*, 2011, no. 4, pp. 102–105.

8. Maklakov, A.S. Imitatsionnoe modelirovanie glavnogo elektroprivoda prokatnoy kleti tolstoлистового стана 5000 [Simulation of the main electric drive of the plate mill rolling stand 5000]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, no. 3, pp. 16–25.

9. Maklakov, A.S., Gasiyarov, V.R., Belyy, A.V. Energoberegayushchiy elektroprivod na baze dvukhzvennogo preobrazovatelya chastoty s aktivnym vypryamitelem i avtonomnym inverterom napryazheniya [Energy-saving electric drive based on two-unit frequency converter with an active rectifier and an autonomous voltage inverter]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, no. 1, pp. 23–30.

10. Khramshin, T.R., Khramshin, R.R., Kornilov, G.P. Raschet elektromagnitnykh protsessov v trekhfaznom trekhurovnevom invertere napryazheniya [Calculation of electromagnetic processes in a three-phase three-level voltage inverter]. *Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov «Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы»* [An international collection of scientific works «Electrical systems and complexes»]. Magnitogorsk, MGTU, 2010, issue 1, pp. 221.

11. Khramshin, T.R., Abdulveleyev, I.R., Kornilov, G.P. Matematicheskaya model' silovoy skhemy moshchnogo STATKOMA [Mathematical Model of the Power Circuit of the Large Capacity STATCOM]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2015, vol. 2, no. 1, pp. 38–46.

12. Maklakov, A.S., Radionov, A.A. Vliyaniye na set' trekhfaznogo mostovogo dvukhurovnevnogo aktivnogo vypryamitelya napryazheniya pri razlichnykh vidakh ShIM [Influence of the three-phase two-level bridge active voltage rectifier with different PWM types on the power system]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 2, pp. 40–47.

13. Khramshin, T.R., Krubtsov, D.S., Kornilov, G.P. Otsenka metodov shirotno-impul'snoy modulyatsii napryazheniya

aktivnykh vypryamiteley prokatnykh stanov [Evaluation of methods of voltage PWM of rolling mill active rectifiers]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 2, pp. 48–52.

14. Maklakov, A.S., Radionov, A.A. Issledovanie vektor-noy SHIM s razlichnymi tablitsami pereklyucheniya silovykh klyuchey trekhurovneвого преобразователя [Study of vector PWM with various vector selection tables of the three level converter]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2015, vol. 2, no. 1, pp. 30–37.

15. Maklakov, A.S. Analiz raboty aktivnogo vypryamitelya napryazheniya v rezhimakh kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Analysis of active PWM rectifier in modes of reactive power compensation]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 1, pp. 43–50.

*Николаев Александр Аркадьевич,*

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

*Nikolayev Aleksandr Arkadyevich,*

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

*Денисевич Александр Сергеевич,*

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,  
магистрант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники,  
e-mail: denisevich993@mail.ru

*Denisevich Aleksandr Sergeevich,*

Nosov Magnitogorsk State Technical University,  
Master Course Student of the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics,  
e-mail: denisevich993@mail.ru

*Буланов Михаил Викторович,*

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,  
магистрант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники,  
e-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

*Bulanov Mikhail Viktorovich,*

Nosov Magnitogorsk State Technical University,  
Master Course Student of the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics,  
e-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

16. Lukyanov, S.I., Shvidchenko, N.V., Pishnograev, R.S., Shvidchenko, D.V. Razrabotka matematicheskoy modeli elektroprivoda otvodyashchego rol'ganga shirokopolosnogo stana goryachey prokatki [Development of a mathematical model of the broad-strip hot mill leading out roll electric drive]. *Matematicheskoe i programnoye obespechenie sistem v promyshlennoy i sotsial'noy sferakh*, 2011, no. 1–2, pp. 71–76.

17. Nikolayev, A.A., Anokhin, V.V., Urmanova, F.F. Razrabotka sposoba snizheniya kommutatsionnykh perenapryazheniy pri nalichii fil'trov vysshikh harmonik staticheskogo tiristor-nogo kompensatora [Developing of a new method of switching over voltage reduction in harmonic filters of the static var compensator]. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2015, vol. 2, no. 4, pp. 72–76.