АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.314.64

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ С АКТИВНЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ ПРИ КОММУТАЦИЯХ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА[1]

А.А. НИКОЛАЕВ, А.С. ДЕНИСЕВИЧ, В.С. ИВЕКЕЕВ
ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, Российская Федерация
E-mail: aa.nikolaev@magtu.ru, denisevich993@mail.ru, vivekeev@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время в электроприводах прокатных станов применяются преобразователи частоты с активными выпрямителями. Современные системы управления активными выпрямителями не адаптированы к провалам питающего напряжения, вследствие чего возникают отключения преобразователей. Известные способы обеспечения устойчивости, такие как кинетическое буферирование, корректирующие сигналы по напряжению обратной последовательности и др., не исключают данные аварийные отключения. В качестве дополнительной меры предложен способ компенсации провалов напряжения за счет статических тиристорных компенсаторов дуговых сталеплавильных печей при параллельной работе преобразователей частоты с активными выпрямителями и дуговых сталеплавильных печей. Однако влияние возмущающих воздействий (перенапряжений при коммутации фильтрокомпенсирующих цепей статических тиристорных компенсаторов и провалов напряжений при включении печного трансформатора) на устойчивость работы преобразователей частоты с активными выпрямителями остается неисследованным. В связи с этим актуальной задачей является исследование влияния данных процессов на режимы работы преобразователей частоты с активными выпрямителями и усовершенствование системы управления активными выпрямителями.

Материалы и методы. При выполнении исследований использованы экспериментальные массивы мгновенных значений напряжений и токов действующего комплекса «ДСП-СТК». Также применены математические модели преобразователей частоты с активными выпрямителями с различными алгоритмами ШИМ, реализованные в среде Matlab-Simulink. Главным допущением используемой модели является применение эквивалентных источников тока, моделирующих работу автономных инверторов напряжения.

Результаты. Разработана усовершенствованная система управления активными выпрямителями, отличающаяся от известных тем, что для сохранения устойчивости работы при коммутациях фильтрокомпенсирующих цепей статических тиристорных компенсаторов и трансформатора дуговых сталеплавильных печей применен блок формирования сигнала задания реактивной составляющей тока активного выпрямителя в функции разности напряжений в питающей сети и на входе активного выпрямителя.

[1] Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-3230.2018.8).

Выводы. Применение усовершенствованной системы управления активными выпрямителями обеспечивает повышение устойчивости преобразователей частоты с активными выпрямителями при параллельной работе с дуговыми сталеплавильными печами за счет потребления реактивной мощности из питающей сети. В результате достигается снижение амплитуд бросков тока и отклонений напряжений в звене постоянного тока преобразователей частоты с активными выпрямителями ниже значений уставок срабатывания защиты.

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

IMPROVING OF OPERATION STABILITY OF FREQUENCY CONVERTERS WITH ACTIVE RECTIFIERS IN ELECTRIC STEEL-MAKING COMPLEX ELECTRICAL EQUIPMENT SWITCHING

A.A. NIKOLAEV, A.S. DENISEVICH, V.S. IVEKEEV
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation
E-mail: aa.nikolaev@magtu.ru, denisevich993@mail.ru, vivekeev@yandex.ru

Abstract

Background. Frequency converters with active rectifiers (FC-AR) are now used in rolling mill electric drives. Modern control systems of ARs are not adapted to voltage sags in power supply systems, which leads to converter tripping. The known methods of ensuring AR operation stability, such as kinetic buffering, correction signals based on negative sequence voltage and others, do not eliminate these emergency trips. As an additional measure the paper proposes the method of voltage sag compensation by using static var compensators (SVC) of electric arc furnaces (EAF) for parallel operation of frequency converters with active rectifiers and electric arc furnaces. However, it remains unknown how disturbances (such as overvoltages of switching of SVC harmonic filters (HF) and voltage sags during furnace transformer switching) affect operation stability of frequency converters with active rectifiers. All this makes it necessary to study the effect of these processes on the operation conditions of FC-AR and to improve the active rectifier control system.
Materials and methods. The authors used experimental arrays of instantaneous values of voltages and currents of the real-life complex «EAF-SVC» («Electric Arc Furnace – Statistic VAR Compensator») in this study. They also applied mathematical models of FC-AR with different PWM algorithms realized in Matlab-Simulink software. The main assumption of the model consists in using equivalent current sources modelling the operation of autonomous voltage invertors.
Results. An improved control system of AR has been developed. The main feature that distinguishes it from the known systems is the fact that it ensures operation stability during SVC harmonic filter and EAF transformer switching by using a signal conditioning unit for setting the active rectifier reactive current component as a function of power supply and AR input voltage difference.
Conclusions. Implementation of the improved AR control system improves FC-AR stability during parallel operation with EAFs through reactive power consumption of the supply system. As a result, it reduces the amplitude of inrush current and voltage deviations in the DC-link of the FC-AR to the values lower than the setpoints of the AR protection system.

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

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.5.048-058

Введение. Современные электроприводы прокатных станов выполняются на базе мощных электродвигателей переменного тока и многоуровневых преобразователей частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ) и автономными инверторами напряжения (АИН). Силовые схемы АВ и АИН выполнены идентично на полностью управляемых ключах (IGCT тиристорах или IGBT транзисторах) [1, 2]. Применение многоуровневых ПЧ-АВ способствует улучшению гармонического состава напряжения и тока, потребляемого из сети, а также дает возможность работы с заданным коэффициентом мощности.

Опыт эксплуатации ПЧ-АВ показывает, что система управления АВ не адаптирована к несимметрии питающего напряжения. В [3] показано, что кратковременные несимметричные провалы напряжения глубиной

15–50 % и длительностью 100–400 мс приводят к отключению ПЧ-АВ. Аварийные отключения главных приводов прокатных станов приводят к нарушению технологического процесса и значительному экономическому ущербу. В связи с этим в [4, 5] были предложены мероприятия по компенсации провалов напряжения в питающей сети за счет резервов реактивной мощности статического тиристорного компенсатора (СТК) дуговой сталеплавильной печи (ДСП). Для обеспечения компенсации провалов напряжения в питающей сети необходимо объединить на параллельную работу секции шин, питающие главные электроприводы прокатных станов и электросталеплавильный комплекс. В [6] показана возможность устойчивой параллельной работы электросталеплавильного комплекса и ПЧ-АВ при наличии несимметрии напряжения, возникающей при работе ДСП. В качестве примера рассмотрена система внутризаводского электроснабжения металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji» со сверхмощным комплексом «ДСП-УКП-СТК» и листопрокатным комплексом. Как отмечено в [6], необходимо проведение дополнительных исследований устойчивости работы АВ при сильных искажениях 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 [8].

С учетом вышесказанного актуальной задачей является исследование режимов работы электроприводов на базе ПЧ-АВ, функционирующих параллельно с электротехническим комплексом «ДСП-СТК», при наличии дополнительных искажений напряжения на общих шинах, вызванных переходными процессами при включении ФКЦ СТК и печного трансформатора ДСП.

Материалы и методы. Для оценки устойчивости работы ПЧ с активным выпрямителем при сильных искажениях напряжений, вызванных коммутацией ФКЦ СТК и включением печного трансформатора ДСП, были использованы экспериментальные массивы мгновенных значений линейных напряжений на шинах 34,5 кВ электросталеплавильного комплекса ЗАО «ММК Metalurji» (г. Искендерун, Турция) (рис. 1).

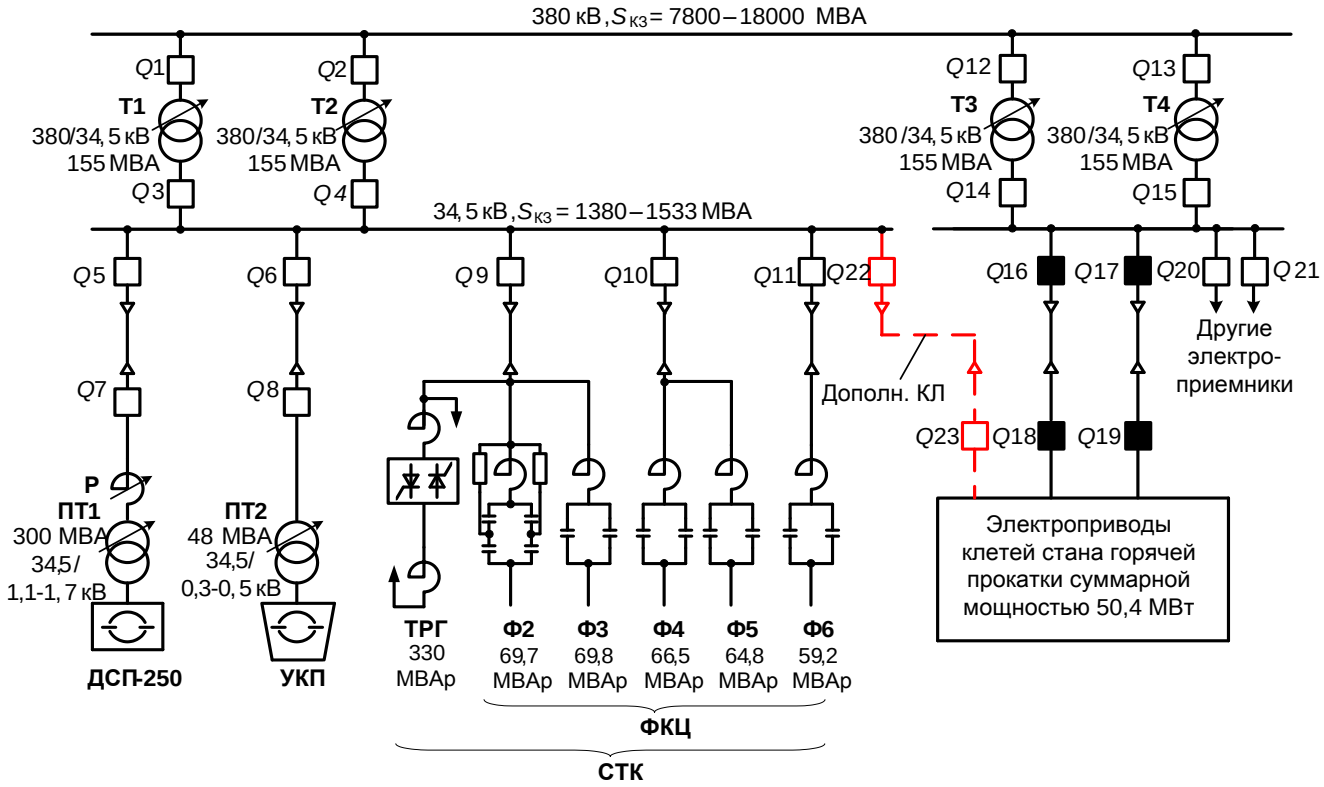

Рис. 1. Упрощенная схема электроснабжения электросталеплавильного и прокатного комплексов металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji»: ПТ1, ПТ2 – печные трансформаторы дуговой сталеплавильной печи (ДСП) и установки ковш-печь (УКП); ТРГ – тиристорно-реакторная группа; Ф2-Ф6 – фильтры высших гармоник

При проведении исследований использовалась разработанная ранее математическая модель ПЧ с активным выпрямителем [6]. Автономный инвертор напряжения и синхронный двигатель (СД) представлены упрощенно источником тока. Данное упрощение является допустимым и обеспечивает адекватное воспроизведение режимов работы АВ [2]. Система управления (СУ) АВ осуществляет поддержание напряжения в звене постоянного тока на заданном уровне [9–19]. Система управления АВ выполнена двухконтурной с внутренним двухканальным контуром регулирования *d-q* составляющих токов и внешним контуром регулирования выпрямленного напряжения АВ, адекватность модели подтверждена в [6]. Блок-схема модели представлена на рис. 2.

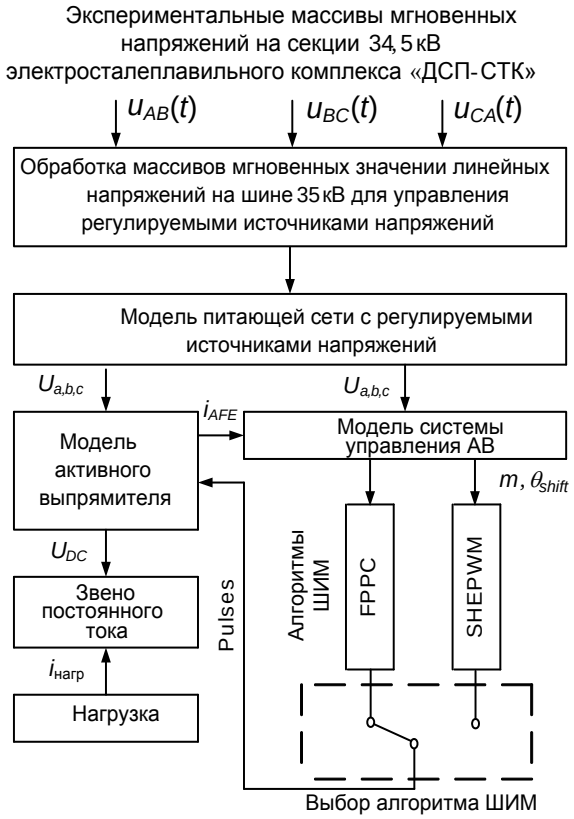

Рис. 2. Блок-схема имитационной модели ПЧ-АВ и питающей сети 34,5 кВ с учетом реальных искажений напряжения, создаваемых комплексом «ДСП-СТК»: $U_{a,b,c}$ – фазные напряжения в сети 34,5 кВ; U_{DC} – напряжение в звене постоянного тока, В; $i_{нагр}$ – ток нагрузки, А; i_{AFE} – ток на входе АВ, А; *m* – коэффициент модуляции; θ_{shift} – угол сдвига; *Pulses* – импульсы управления IGCT-тиристорами АВ)

Исследования устойчивости работы ПЧ-АВ при коммутации ФКЦ СТК и печного трансформатора проводились для двух алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [8]:

– ШИМ с фиксированными значениями углов переключения (Fixed Pulse Pattern Control);

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

Результаты исследований работы ПЧ-АВ при включении ФКЦ СТК. Статический тиристорный компенсатор, функционирующий в системе электроснабжения электросталеплавильного комплекса, предназначен для компенсации реактивной мощности и симметрирования токов ДСП. В нормальном режиме работы СТК поддерживает нулевое значение реактивной мощности на вторичной стороне сетевого трансформатора. Статический тиристорный компенсатор состоит из тиристорно-реакторной группы (ТРГ) и фильтрокомпенсирующих цепей. Параметры ФКЦ подобраны таким образом, чтобы обеспечить фильтрацию высших гармоник с n = 2,3,4,5,6. Также ФКЦ генерирует в сеть реактивную мощность, величина которой не регулируется и зависит только от уровня напряжения в точке подключения. Переизбыток реактивной мощности компенсируется путем ее потребления тиристорно-реакторной группой. Необходимо отметить, что при одновременном включении всех фильтров происходит сильное перенапряжение на шинах 34,5 кВ [9]. Поэтому на подобных объектах используется поэтапное включение фильтров высших гармоник СТК: 1) вначале осуществляется включение фильтра второй и третьей гармоник через общий выключатель с ТРГ, при этом тиристорные ключи находятся в закрытом состоянии; 2) после выдержки времени система автоматического управления ТРГ подает импульсы на отпирание тиристоров; 3) далее через определенный интервал времени происходит включение фильтров четвертой, пятой (подключенных через общий выключатель) и шестой гармоник.

Описанный алгоритм позволяет значительно снизить коммутационные перенапряжения. Однако на рассматриваемом объекте даже при включении отдельных фильтров высших гармоник наблюдаются перенапряжения на уровне 30 % (рис. 3), которые в случае подключения группы ПЧ-АВ на параллельную работу могут оказать негативное влияние на систему управления АВ.

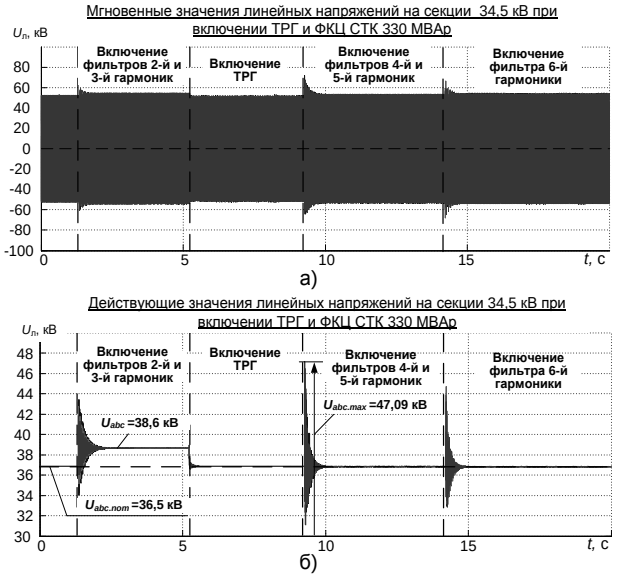

Рис. 3. Экспериментальные графики изменения мгновенных (а) и действующих (б) значений линейных напряжений на шине 34,5 кВ исследуемого комплекса «ДСП-СТК»

Для проведения исследований влияния коммутационных процессов при включении ФКЦ на устойчивость работы ПЧ-АВ были записаны массивы мгновенных значений линейных напряжений на шинах 34,5 кВ, от которых получает питание электросталеплавильный комплекс (рис. 3). После обработки полученных массивов на математической модели были восстановлены три синусоиды линейных напряжений, которые использовались в качестве исходных сигналов для трех управляемых источников напряжения, моделирующих сеть 34,5 кВ с комплексом «ДСП-СТК» (рис. 2).

В процессе исследований оценивались действующие значения токов на входе АВ, а также напряжение в звене постоянного тока. Моделирование проводилось для двух алгоритмов управления ключами АВ: 1) ШИМ с фиксированными значениями углов переключения (рис. 4,а,б); 2) ШИМ с удалением выделенных гармоник (рис. 4,в,г).

Анализ результатов математического моделирования показал, что при использовании алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник наблюдаются сильные колебания напряжения в звене постоянного тока (рис. 4,в), а также увеличение потребляемого тока АВ (рис. 4,г), вызванное увеличением тока задания по активной составляющей, необходимого для поддержания напряжения U_{DC} на заданном уровне. Как было сказано выше, данные коммутационные перенапряжения могут привести к аварийным отключениям главных электроприводов прокатного стана.

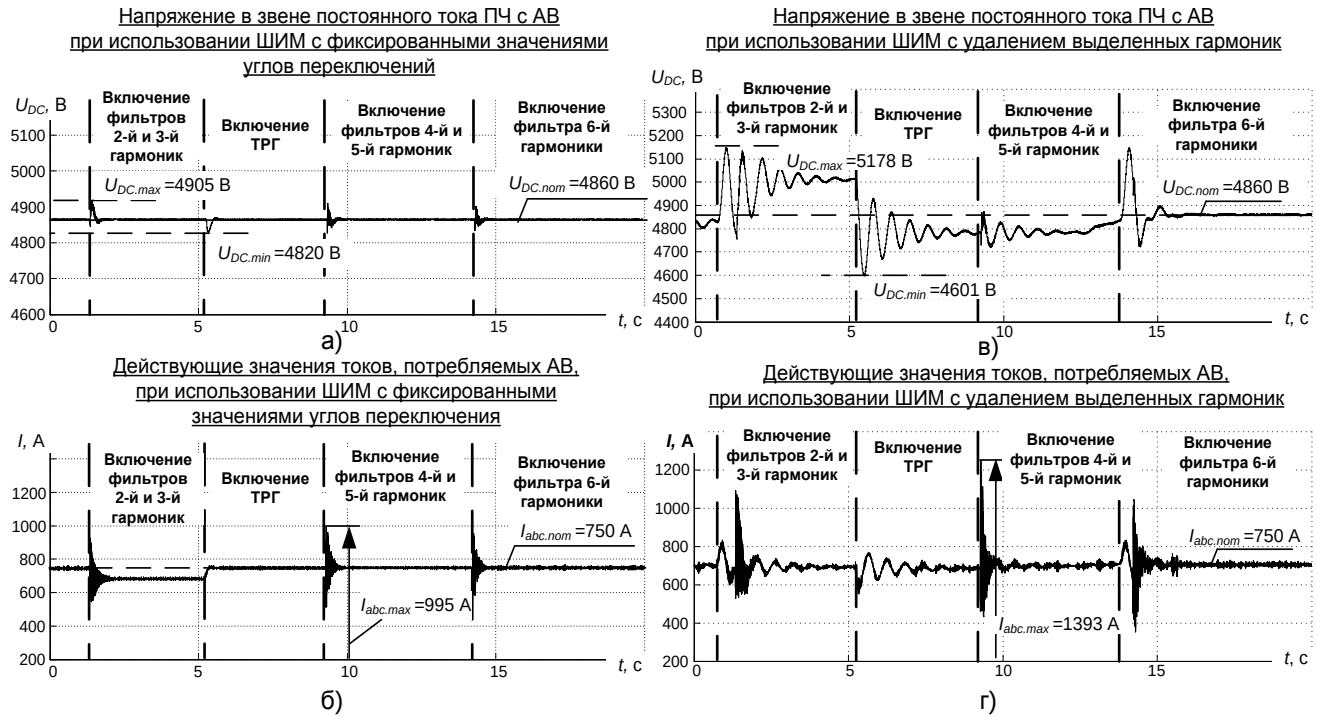

Рис. 4. Графики изменения напряжения в звене постоянного тока и действующих значений фазных токов, потребляемых АВ, полученные на математической модели для режима включения фильтров высших гармоник СТК 330 МВАр, при использовании исходной структуры системы управления АВ: а, б – ШИМ с фиксированными значениями углов переключений; в, г – ШИМ с удалением выделенных гармоник

Более устойчивая работа ПЧ-АВ наблюдается при использовании ШИМ с фиксированными значениями углов переключений (рис. 4,а,б). Улучшение переходных процессов токов потребляемых АВ и напряжения в звене постоянного тока вызвано спецификой используемого алгоритма ШИМ. В ШИМ с фиксированными значениями углов переключения производится фиксация амплитуды напряжения и изменение фазы напряжения на входе АВ по отношению с фазой напряжения питания. Другими словами, регулирование активной составляющей тока происходит за счет изменения величины реактивной составляющей. Таким образом, для повышения устойчивости работы ПЧ-АВ при использовании алгоритмов ШИМ с двухконтурной системой управления (ШИМ с удалением выделенных гармоник, векторный алгоритм ШИМ, классический (синусоидальной) ШИМ) необходимо в моменты коммутации ФКЦ СТК обеспечить потребление реактивной составляющей тока из питающей сети.

Данный подход можно объяснить рассмотрев однофазную схему замещения (рис. 5), в которой активный выпрямитель представлен в виде источника ЭДС E_{AB}, подключенного к ЭДС сети E_C через реактор L_p. Разность ЭДС сети и ЭДС на входе АВ приходится на падение напряжения E_{AB} на индуктивности реактора. Таким образом, при работе АВ в режиме потребления реактивной мощности вектор тока, потребляемого из сети, отстает от вектора ЭДС сети. В этом случае вектор падения напряжения на реакторе ΔU_p совпадает с вектором ЭДС E_{AB} на входе АВ. Благодаря сложению векторов ЭДС E_{AB} на входе АВ и падения напряжения на реакторе E_{AB} происходит выравнивание ЭДС сети E_C, а также ЭДС на входе АВ E_{AB}.

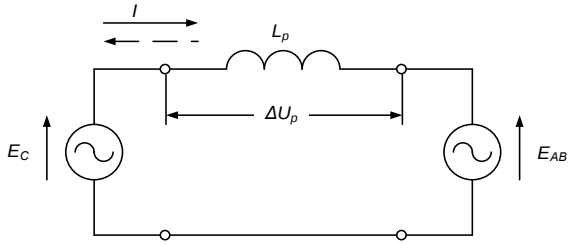

Рис. 5. Однофазная схема замещения АВ

Регулируя величину реактивной составляющей тока, потребляемого из сети АВ, можно обеспечить устойчивую работу АВ при коммутации ФКЦ СТК. Для этого необходимо добавить в существующую систему управления АВ блок сравнения средних значений напряжения сети и напряжения на входе АВ за реактором (рис. 6). Сигнал рассогласования ЭДС сети и ЭДС на входе АВ обрабатывается пропорционально-интегральным регулятором, на выходе которого формируется ток задания по реактивной составляющей.

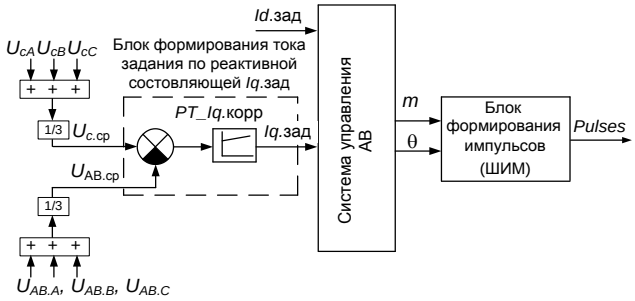

Рис. 6. Упрощенная функциональная схема усовершенствованной системы управления АВ с коррекцией сигнал задания на реактивную составляющую тока *Iq*.зад: $Uc_{A,B,C}$ – фазные напряжения сети; $U_{AB.A,B,C}$ – фазные напряжения на входе АВ; *PT_Iq*.корр – корректирующий ПИ-регулятор тока по реактивной составляющей; *Id*.зад, *Iq*.зад – токи задания по активной и реактивной составляющей; *m* – коэффициент модуляции; θ – угол сдвига; *Pulses* – импульсы управления IGCT-тиристорами АВ

При использовании модернизированной системы управления АВ при ШИМ с удалением выделенных гармоник наблюдается заметное улучшение переходных процессов напряжения в звене постоянного тока, а также токов, потребляемых АВ (рис. 7,а,б).

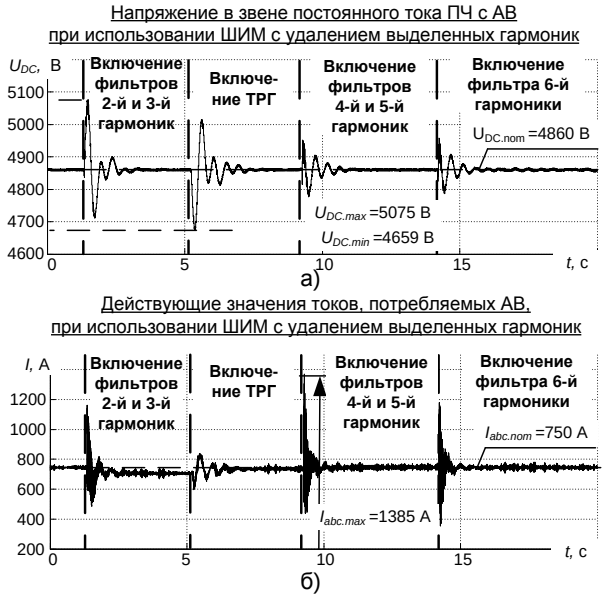

Рис. 7. Графики изменения напряжения в звене постоянного тока (а) и действующих значений фазных токов (б), потребляемых АВ, полученные на математической модели для режима включения фильтров высших гармоник СТК 330 МВАр, при использовании ШИМ с удалением выделенных гармоник и усовершенствованной системы управления АВ

Результаты исследований работы ПЧ-АВ при включении печного трансформатора ДСП на холостом ходу. Опыт эксплуатации мощных ДСП показывает, что включение печного трансформатора на холостом ходу сопровождается бросками тока намагничивания [20]. Амплитуды бросков токов намагничивания могут достигать 2–3-кратных значений от номинального тока трансформатора. Причиной возникновения бросков тока намагничивания является насыщение магнитной системы трансформатора. Амплитуда броска тока является непостоянной и зависит от многих факторов, таких как: уровень напряжения сети; ступень РПН трансформатора; распределение остаточной индукции в стержнях магнитопровода, а также от фазы напряжения в момент замыкания полюсов выключателя.

Необходимо отметить, что бросок тока намагничивания сопровождается возникновением естественных провалов напряжения на первичной стороне печного трансформатора величиной 15–20 %. Учитывая тот фактор, что время затухания броска тока намагничивания может составлять 2–3 с, данное явление может оказывать сильное негативное воздействие на работу ПЧ-АВ при параллельном включении с комплексом «ДСП-СТК».

Для исследования режимов работы АВ при возникновении бросков тока намагничивания были использованы экспериментальные массивы мгновенных значений напряжений и токов печного трансформатора, записанные на шинах 34,5 кВ электросталеплавильного комплекса (рис. 8). В рассматриваемом случае кратность броска тока намагничивания равна 50 % от номинальной амплитуды тока печного трансформатора в связи с тем, что трансформатор с номинальным напряжением $U_{m.nom}$ = 35 кВ эксплуатируется на пониженном напряжении сети 34,5 кВ.

После обработки полученных массивов, так же как и в предыдущем случае, были восстановлены три синусоиды линейных напряжений, которые использовались в качестве исходных сигналов для управляемых источников напряжения. В процессе исследований оценивались мгновенные значения токов на входе АВ и напряжение в звене постоянного тока (рис. 9).

Анализ результатов моделирования показал, что при включении печного трансформатора с кратностью амплитуды $0{,}5I_{\text{т.ном}}$ сохраняется устойчивая работа ПЧ-АВ.

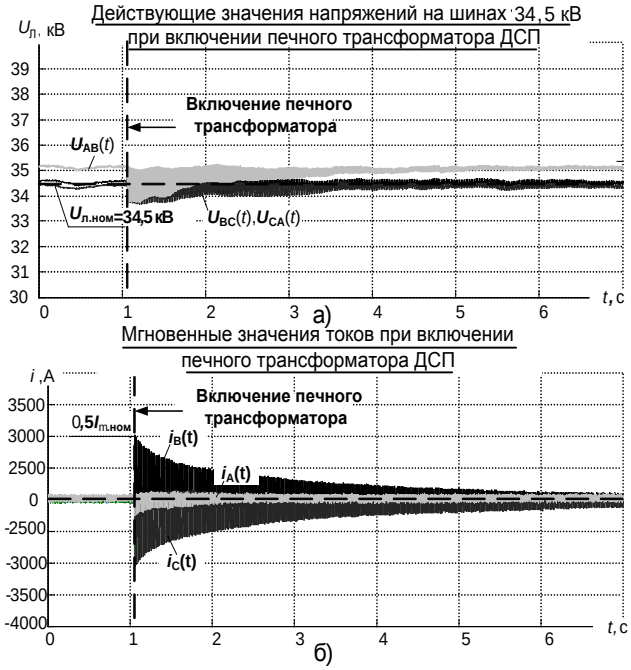

Рис. 8. Экспериментальные графики изменения действующих значений линейных напряжений на шинах 34,5 кВ (а) и мгновенных значений токов на первичной стороне печного трансформатора (б) при его включении на холостой ход

Наилучшие переходные процессы в звене постоянного тока и на входе АВ наблюдаются при использовании ШИМ с фиксированными значениями углов переключений (рис. 9,а,б). В данном случае включение печного трансформатора не вызывает сильных отклонений напряжения в звене постоянного тока АВ. Несимметрия токов, потребляемых АВ, вызванная несимметричным напряжением на шинах 34,5 кВ, является незначительной. При использовании ШИМ с удалением выделенных гармоник качество переходных процессов ниже (рис. 9,в,г). В момент включения печного трансформатора в звене постоянного тока наблюдается посадка напряжения на 0,93 %, затем при восстановлении уровня напряжения в звене постоянного тока до номинального значения происходит перенапряжение на 0,9 % (рис. 9,в). Как и в предыдущем случае, использование усовершенствованной системы управления АВ для ШИМ с двухконтурной системой управления позволит повысить устойчивость АВ при включении печного трансформатора.

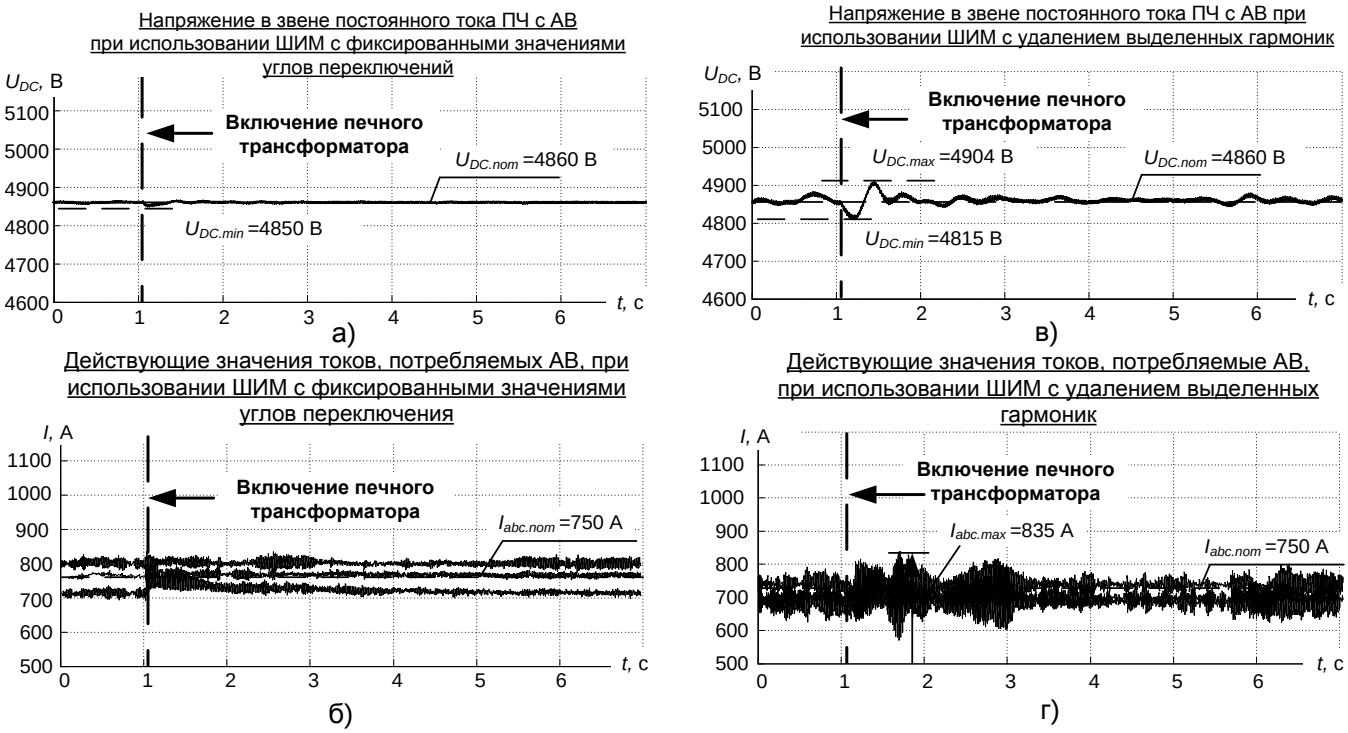

Рис. 9. Графики изменения напряжения в звене постоянного тока ПЧ-АВ действующих значений фазных токов, потребляемых АВ, полученные на математической модели для режима включения печного трансформатора: а, б – ШИМ с фиксированными значениями углов переключений; в, г – ШИМ с удалением выделенных гармоник

Выводы. Параллельная работа электроприводов прокатного стана на базе ПЧ-АВ с электротехническим комплексом «ДСП-СТК» позволяет решить проблему негативного влияния внешних провалов напряжения на устойчивость работы активных выпрямителей за счет резервов реактивной мощности СТК дуговой печи. Однако при совместном функционировании двух комплексов (электросталеплавильного и прокатного) возникают дополнительные возмущающие воздействия, оказывающие негативное влияние на работу системы управления АВ, которые также могут вызывать аварийные отключения преобразователей частоты. Этими явлениями являются перенапряжения при коммутации ФКЦ СТК, а также естественные провалы напряжения при включении печного трансформатора ДСП на холостом ходу.

Анализ устойчивости работы ПЧ-АВ при коммутации ФКЦ СТК показал, что наиболее устойчивая работа АВ достигается при использовании алгоритма ШИМ с фиксированными значениями углов переключения. Сохранение устойчивости вызвано спецификой используемого алгоритма ШИМ, а именно автоматическим изменением реактивной составляющей тока, потребляемого из сети. Алгоритм ШИМ с двухконтурными системами управления АВ в данном случае не является предпочтительным, так как включение ФКЦ СТК приводят к аварийным отключениям АВ. Повышение устойчивости работы ПЧ-АВ при использовании алгоритмов ШИМ с двухконтурной системой управления АВ возможно за счет кратковременного перехода активного выпрямителя в режим потребления реактивной мощности из сети. Данная функция может быть реализована за счет использования вспомогательного блока контроля уровня напряжения сети и напряжения на входе АВ, в котором формируется ток задания на реактивную составляющую $I_{q\text{зад}}$ для традиционной системы управления АВ.

На основании проведенных исследований было показано, что потребление реактивной мощности положительно влияет на работу ПЧ-АВ при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник. Это способствует снижению размаха колебаний напряжения в звене постоянного тока с 7 до 4,32 %. Кроме того, улучшение качества регулирования напряжения в звене постоянного тока приводит к снижению бросков тока потребляемого АВ более 10 А.

Исследования устойчивости работы ПЧ-АВ при включении печного трансформатора с пониженной кратностью броска тока намагничивания $0{,}5I_{\text{т.ном}}$ показали, что естественные провалы напряжения, создаваемые броском тока намагничивания, не оказывают критического воздействия на систему управления АВ. Однако в качестве дополнительных мероприятий было рекомендовано использовать усовершенствованную систему управления АВ с применением алгоритмов ШИМ с двухконтурной системой управления.

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. Khramshin et. al. // Procedings of IEEE 2014 Electrical Power and Energy Conference. (EPEC 2014). – 2014. – P. 235–241.
4. **Николаев А.А., Денисевич А.С., Буланов М.В.** Исследование параллельной работы автоматизированных электроприводов прокатного стана и дуговой сталеплавильной печи // Вестник ИГЭУ. – 2017. – Вып. 3. – С. 59–69.
5. **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. 59–69.
6. **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.
7. **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.
8. **Николаев А.А., Корнилов Г.П., Денисевич А.С.** Разработка усовершенствованной методики расчета параметров фильтрокомпенсирующих цепей статического тиристорного компенсатора электродуговой печи // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 89–100.
9. **O'Brien K., Teichmann R., Bernet S.** Active rectifier for medium voltage drive systems // Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE. – 2001. – С. 557–562.
10. **Маклаков А.С.** Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клети толстолистового стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 16–25.
11. **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.
12. **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.
13. **Blooming T.M., Carnovale D.J.** Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits // Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. – 2006. – С. 1–9.
14. **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.
15. **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.
16. **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.
17. **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.
18. **Маклаков А.С.** Анализ работы активного выпрямителя напряжения в режимах компенсации реактивной мощности // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 1. – С. 43–50.

19. **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.

References

1. Khramshin, T.R., Krubtsov, D.S., Kornilov, G.P. Matematicheskaya model' aktivnogo vypryamitelya v nesimmetrichnykh rezhimakh raboty [A mathematical model of the active rectifier under unbalanced voltage operating conditions]. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 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]. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 3–7.

3. Nikolaev, A.A., Kornilov, G.P., Khramshin, T.R., Akcay, 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. Procedings of IEEE 2014 Electrical Power and Energy Conference. (EPEC 2014), 2014, pp. 235–241.

4. Nikolaev, A.A., Denisevich, A.S., Bulanov, M.V. Issledovanie parallel'noy raboty avtomatizirovannykh elektroprivodov prokatnogo stana i dugovoy staleplavil'noy pechi [Investigation of parallel work of rolling mill automated electric drives and an electric arc furnace]. *Vestnik IGEU*, 2017, issue 3, pp. 59–69.

5. Nikolaev, A.A., Kornilov, G.P., Ivekeev, V.S., Lozhkin, I.A., Kotyishev, V.E., Tukhvatullin, M.M. Ispol'zovanie staticheskogo tiristornogo 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 ensuring stable operation of the power system and increasing reliability of the in-house power supply]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, no. 1, pp. 59–69.

6. Nikolaev, 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 of voltage sag effects in the power supply system of the «MMK Metalurji» on the operation of the main electric drives of the hot rolling mill]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy*, 2015, no. 3(28), pp. 8–14.

7. 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*, 2014, vol. 2, no. 4, pp. 7–13.

8. Nikolaev, A.A., Kornilov, G.P., Denisevich, A.S. Razrabotka usovershenstvovannoy metodiki rascheta parametrov fil'tro-kompensiruyushchikh tsepey staticheskogo tiristornogo kompensatora elektrodugovoy pechi [Developing of an improved method for calculating parameters of harmonic filters of the arc furnace static var compensator]. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 89–100.

9. O'Brien, K., Teichmann, R., Bernet, S. Active rectifier for medium voltage drive systems. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE, 2001, pp. 557–562.

10. Maklakov, A.S. Imitatsionnoe modelirovanie glavnogo elektroprivoda prokatnoy kleti tolstolistovogo stana 5000 [Simulation of the main electric drive of plate mill rolling stand 5000]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, no. 3, pp. 16–25.

11. Nikolaev, A.A., Anokhin, V.V., Urmanova, F.F. Razrabotka sposoba snizheniya kommutatsionnykh perenapryazheniy pri nalichii fil'trov vysshikh garmonik staticheskogo tiristornogo kompensatora [Development of a new method of switching overvoltage reduction in harmonic filters of static var compensators]. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2015, vol. 2, no. 4, pp. 72–76.

12. Maklakov, A.S., Gasiyarov, V.R., Belyy, A.V. Energosberegayushchiy elektroprivod na baze dvukhzvennogo preobrazovatelya chastoty s aktivnym vypryamitelem i avtonomnym invertorom napryazheniya [The energy-saving electric drive based on a back to back frequency converter and an autonomous voltage inverter]. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 23–30.

13. Blooming, T.M., Carnovale, D.J. Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits. Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2006, pp. 1–9.

14. Khramshin, T.R., Abdulveleev, I.R., Kornilov, G.P. Matematicheskaya model' silovoy skhemy moshchnogo STATKOMa [A Mathematical Model of the Power Circuit of a Large Capacity STATCOM]. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 38–46.

15. Maklakov, A.S., Radionov, A.A. Vliyanie na set' trekhfaznogo mostovogo dvukhurovnevogo aktivnogo vypryamitelya napryazheniya pri razlichnykh vidakh ShIM [Influence of three-phase bridge two-stage active rectifier with different types of PWM on the power network]. *Mashinostroenie:*

setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal, 2013, no. 2, pp. 40–47.

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

17. Maklakov, A.S., Radionov, A.A. Issledovanie vektornoy ShIM s razlichnymi tablitsami pereklyucheniya silovykh klyuchey trekhurovnevogo preobrazovatelya [A study of the three-level converter space-vector PWM with various vector selection tables]. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 30–37.

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

19. Luk'yanov, 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 outgoing table electric drive]. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie sistem v promyshlennoy i sotsial'noy sferakh*, 2011, no. 1–2, pp. 71–76.

Николаев Александр Аркадьевич,
ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, e-mail: aa.nikolaev@magtu.ru
Nikolaev Aleksandr Arkadyevich,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor, Head of the Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, e-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

Денисевич Александр Сергеевич,
ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, e-mail: denisevich993@mail.ru
Denisevich Aleksandr Sergeyevich,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Post-graduate student of the Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, e-mail: denisevich993@mail.ru

Ивекеев Владимир Сергеевич,
ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, e-mail: vivekeev@yandex.ru
Ivekeev Vladimir Sergeyevich,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Post-graduate student of the Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, e-mail: vivekeev@yandex.ru

УДК 621.365.5

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОГНЕУПОРНОЙ ФУТЕРОВКИ ИНДУКЦИОННОЙ ТИГЕЛЬНОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

И.Ю. ДОЛГИХ, М.Г. МАРКОВ
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: ivan.dolgikh.89@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Широкий спектр технологических преимуществ индукционных тигельных плавильных печей делает актуальным их использование в различных отраслях металлургического производства. Однако тяжелые условия работы огнеупорной футеровки таких печей обусловливают необходимость осуществления постоянного контроля за ее состоянием, ориентированного на продление срока службы тигля и предотвращение возникновения аварийных ситуаций. При этом традиционные методы, основанные на использовании подового электрода и индикации утечки тока на землю, не обеспечивают непрерывного отображения степени разрушения футеровки и дают возможность регистрации только критического уровня, требующего аварийного отключения и опорожнения печи. Указанное обстоятель-