

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ СТАБИЛИЗАЦИИ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ С ПОМОЩЬЮ СТАТИЧЕСКОГО ТИРИСТОРНОГО КОМПЕНСАТОРА

А.А. Николаев¹, В.В. Анохин²

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия,

² ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия

Приведены основные результаты исследования качества электроэнергии на шинах электростале-плавильного комплекса в случае работы статического тиристорного компенсатора (СТК) по новому алгоритму управления, предназначенному для улучшения электрических характеристик дуговой сталеплавильной печи (ДСП) за счет стабилизации ее активной мощности на оптимальном уровне. Анализ особенностей работы СТК в данном режиме показал значительное ухудшение характеристик напряжения по сравнению с опытами, в которых компенсатор функционировал по классическим алгоритмам. Для проведения подробной оценки негативного влияния СТК на качество электроэнергии (КЭ) при его работе по активной мощности рассчитаны показатели КЭ, характеризующие медленные изменения, несинусоидальность, несимметрию и колебания напряжения, и проведено их сравнение с результатами экспериментов с управлением компенсатора по реактивной мощности и напряжению. Опыты проводились на математической модели действующего электросталеплавильного комплекса «ДСП-120-СТК», разработанной в приложении Simulink математического пакета MATLAB. Для обеспечения требуемых значений показателей КЭ при функционировании СТК в режиме поддержания постоянной активной мощности ДСП разработаны структуры дополнительных блоков ограничения по напряжению и коэффициенту реактивной мощности, симметрирования напряжений и подавления фликера.

Ключевые слова: качество электроэнергии, статический тиристорный компенсатор, режимы управления тиристорно-реакторной группой, дуговая сталеплавильная печь, отклонение напряжения, фликер, коэффициент реактивной мощности.

Введение

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) являются мощными источниками электромагнитных помех, их работа приводит к ухудшению качества электроэнергии (КЭ) по следующим показателям: медленные изменения напряжения, несинусоидальность и несимметрия напряжений, колебания напряжения. Для обеспечения заданных показателей КЭ в точке общего подключения с другими промышленными приемниками мощные ДСП получают питание от подстанций глубокого ввода или отдельных распределительных устройств. Несмотря на организацию электрической развязки резкопеременной и более спокойной нагрузки, помехи от ДСП в меньшей степени, но ухудшают качество напряжения во внешней сети. Кроме этого, нагрузка дуговой печи имеет низкий коэффициент мощности (0,6–0,7), что приводит к высоким потерям электроэнергии в линиях и сетевых трансформаторах и значительным отрицательным отклонениям напряжения на первичной стороне печных трансформаторов из-за протекания реактивной мощности (РМ). Понижение уровня напряжения приводит к падению мощности электрических дуг и, как следствие, ухудшению временных и электрических показателей дуговых печей [1, 2]. Поэтому для компенсации РМ дуговых печей и улучшения качества электроэнергии на шинах

электросталеплавильного комплекса используют компенсирующие и помехозащитные устройства. Статические тиристорные компенсаторы (СТК) объединяют в себе функции данных устройств, имеют значительно меньшую стоимость по сравнению с быстродействующими статическими компенсаторами типа СТАТКОМ, из-за чего они получили широкое применение в системах электро-снабжения мощных и сверхмощных дуговых печей. Статический тиристорный компенсатор относится к устройствам косвенной компенсации, состоит из тиристорно-реакторной группы (ТРГ), которая представляет регулируемую индуктивную нагрузку, и фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ) – нерегулируемого источника реактивной мощности [3].

В современных системах управления (СУ) СТК обычно реализовано два режима работы: обеспечение заданного потребления реактивной мощности комплексом «ДСП-СТК» и стабилизация напряжения в точке общего подключения дуговой печи и компенсатора на определенном уровне. В большинстве случаев для первого режима используется нулевая уставка $Q_{\Sigma} = 0$ МВАр, а для второго принимают согласованную величину напряжения $U_{\text{зад}} = U_{\text{согл}}$ [4]. При условии стабильного напряжения во внешней системе наиболее

эффективным является управление СТК по реактивной мощности. Из-за полного исключения реактивной составляющей тока нагрузки потери напряжения и электроэнергии в элементах сети, обусловленные передачей только активной мощности ДСП, будут иметь минимальные значения. Напряжение на шинах электросталеплавильного комплекса будет поддерживаться на уровне, близком к согласованному, что позволит работать дуговым печам с проектными мощностями.

В реальных условиях напряжение во внешней системе не является постоянной величиной и может изменяться в широких пределах. Электротехнический комплекс «ДСП-СТК» на большинстве предприятий связан с внешней системой через отдельный трансформатор, снабженный устройством регулирования напряжения под нагрузкой (РПН). С помощью переключения положения РПН поддерживается согласованный уровень напряжения на шинах электросталеплавильного комплекса. Однако такое регулирование осуществляется с некоторым шагом и имеет низкое быстродействие. В результате все изменения напряжения во внешней сети трансформируются на вторичную сторону сетевого трансформатора, что негативно влияет на электрические режимы работы электросталеплавильных агрегатов [5]. Работая по напряжению, компенсатор поддерживает его величину в точке общего подключения ДСП и СТК на согласованном уровне. Мощность дуговой печи при работе СТК в этом режиме не зависит от напряжения во внешней сети, однако, как и при управлении по реактивной мощности, будут иметь место колебания активной мощности ДСП относительно номинального значения, которые обусловлены нестабильным процессом плавки и низкой скоростью работы гидроприводов перемещения электродов по сравнению со скоростью изменения длины дуги. В результате средние величины активной мощности ДСП будут отличаться от номинальных значений [6].

Рассмотренные алгоритмы управления реактивной мощностью СТК в первую очередь направлены на улучшение качества электроэнергии в системе электроснабжения дуговых печей, при этом увеличение мощности ДСП является сопутствующим эффектом от повышения уровня напряжения за счет компенсации РМ. С целью прямого улучшения электрических характеристик дуговых печей авторами статьи ранее был разработан новый алгоритм управления СТК [7]. Он заключается в стабилизации активной мощности ДСП на расчётных значениях, принятых в качестве оптимальных для достижения наилучших технико-экономических показателей работы дуговых печей при составлении их профилей плавки. Управление СТК по реактивной мощности или напряжению не позволяет напрямую контролировать величины активных мощностей ДСП. В ре-

зультате этого средние мощности дуг отклоняются от оптимальных значений, что приводит к ухудшению электрических характеристик ДСП по сравнению с её расчётными режимами работы. Исследования особенностей функционирования СТК в режиме стабилизации активной мощности одновременно с улучшением работы ДСП выявили неконтролируемое изменение уровня напряжения в диапазоне, ограниченном только мощностью компенсатора, и значительный рост колебаний напряжения на шинах электросталеплавильного комплекса. Поэтому актуальными задачами являются проведение анализа качества электроэнергии в системе электроснабжения комплекса «ДСП-СТК» при работе СТК в новом режиме и разработка мер по устранению нарушений показателей КЭ.

1. Исследование медленных отклонений напряжения при функционировании СТК по активной мощности дуговой печи. Разработка блоков ограничения по напряжению и коэффициенту реактивной мощности

Работая в режиме поддержания неизменной активной мощности дуговой печи, СТК автоматически определяет необходимую величину напряжения на шинах электросталеплавильного комплекса для достижения заданной уставки на регулирование. Исходный алгоритм стабилизации активной мощности не предполагает осуществление контроля над уровнем напряжения. Один из этапов анализа качества электроэнергии был посвящен определению возможности отклонения напряжения за граничные значения при регулировании СТК по P_d [8].

Режим регулирования СТК по активной мощности предусматривает задание уставок для каждой комбинации ступеней РПН печного трансформатора и реактора, а также рабочих кривых из системы управления перемещением электродов дуговой печи. Компенсатор будет поддерживать тот уровень напряжения на шинах электросталеплавильного комплекса, при котором были определены значения активных мощностей ДСП, принятых в качестве уставок в системе управления СТК. Если уставки рассчитывались для согласованного значения, то компенсатор будет поддерживать напряжение на данном уровне. Поэтому выход величины напряжения за граничные значения маловероятен, но полностью не исключен. Например, напряжение может отклониться за допустимые значения в ситуации, когда его уровень близок к граничному, а в систему управления компенсатора внесены ошибочные уставки по активной мощности.

Данный режим был рассчитан на математической модели комплекса «ДСП-120-СТК», разработанной в приложении Simulink математического пакета MATLAB (рис. 1). Она состоит из имита-

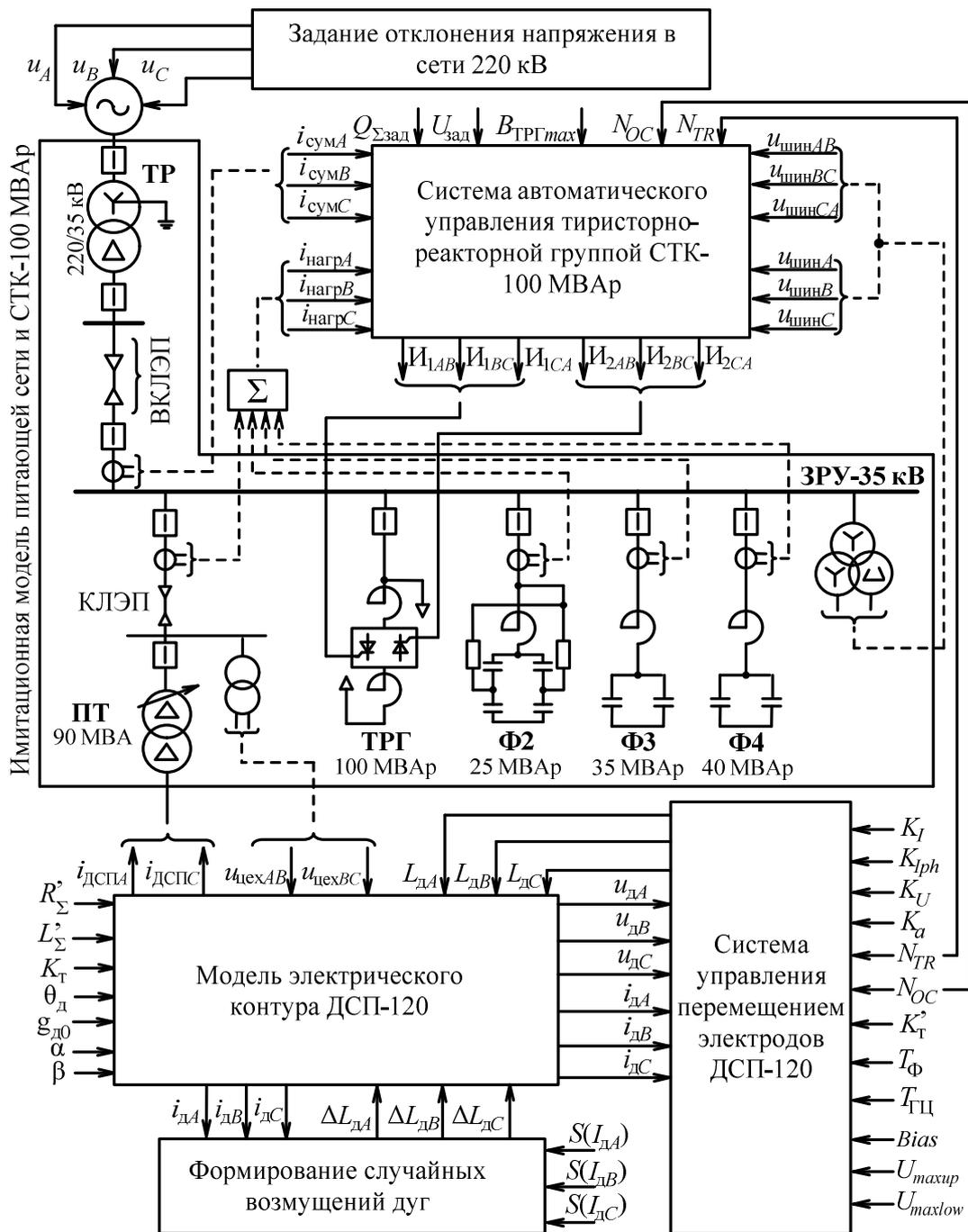


Рис. 1. Математическая модель электросталеплавильного комплекса «ДСП-120-СТК»

ционной модели питающей сети и силовой части СТК-100 МВАр, моделей систем управления СТК и перемещением электродов ДСП, модели короткой сети и электрических дуг. Также в математической модели реализовано задание изменения уровня напряжения в питающей сети 220 кВ и моделирование резкопеременной нагрузки ДСП-120 за счет формирования случайных возмущений дуг. По результатам расчета построены графики изменения активной мощности ДСП, напряжения на шинах электросталеплавильного комплекса и коэффициента реактивной мощности на первичной

стороне сетевого трансформатора (рис. 2). По графику, представленному на рис. 2а, видно, что СТК на всем анализируемом периоде работы комплекса эффективно стабилизирует активную мощность дуговой печи. Горизонтальные участки графика $P_d = f(t)$ соответствуют уставкам на регулирование ($P_{д.зад}$), заданным в обратный канал по активной мощности СУ СТК. Управление СТК по алгоритму поддержания неизменной активной мощности ДСП привело к снижению напряжения ниже граничного значения $U_{(-)гр}$ на время t_2 (рис. 2б).

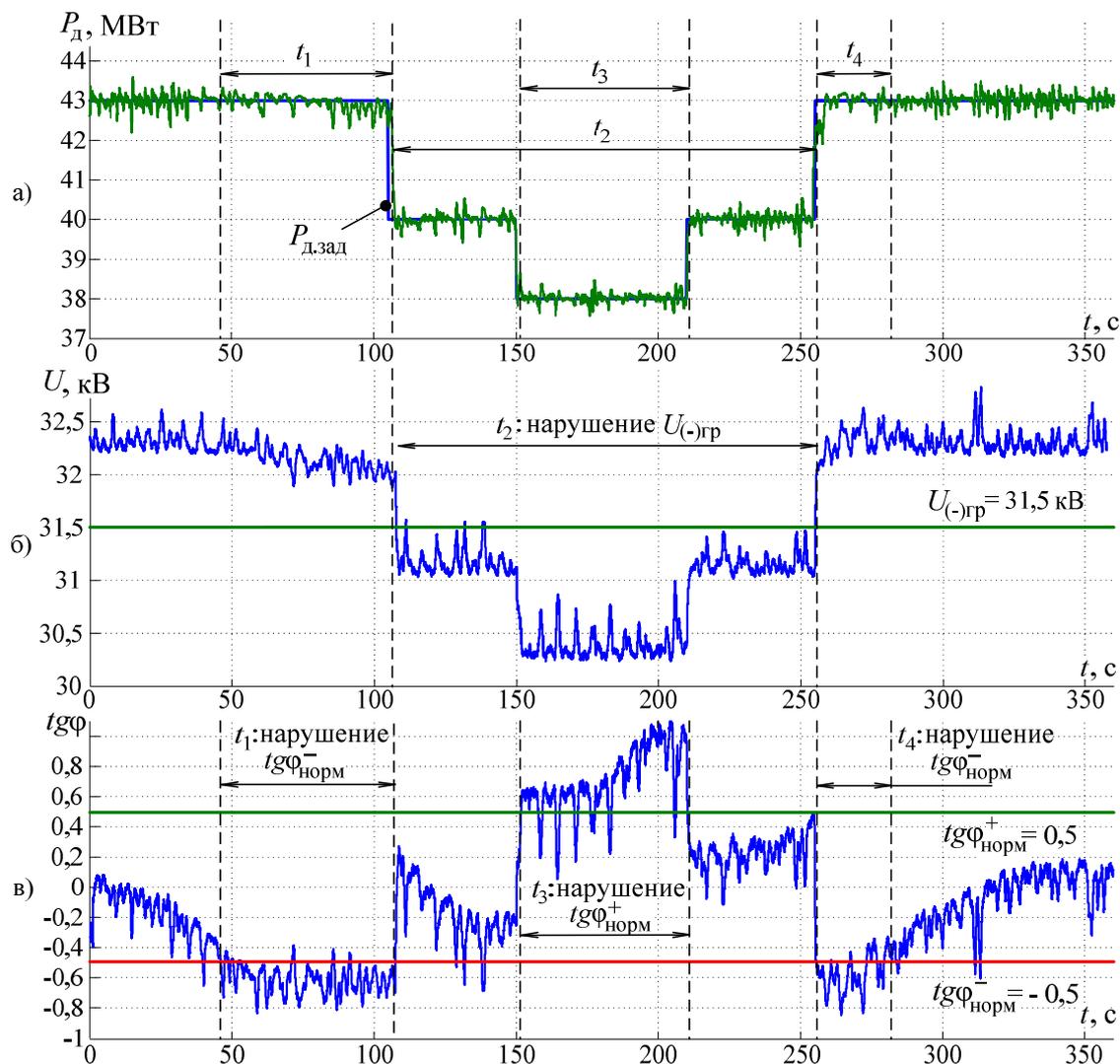


Рис. 2. Графики изменения активной мощности ДСП (а), напряжения (б) и коэффициента реактивной мощности (в), полученные при работе СТК с исходной структурой обратного канала по активной мощности ДСП

Напряжение в этот период опустилось ниже 30,5 кВ (t_3). Таким образом, имеем нарушение показателя отрицательного отклонения напряжения $\delta U_{(-)}$, характеризующего медленные изменения напряжения.

С целью предотвращения отклонения напряжения за допустимые значения разработан блок ограничения по напряжению и внедрен в обратный канал по активной мощности. Функциональная схема обратного канала по активной мощности системы управления СТК представлена на рис. 3. В исходном виде обратный канал включает в себя блок определения уставки, блок расчета активной мощности ДСП и пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор). Величина задания на регулирование $P_{д.зад}$ на выходе блока определения уставки сравнивается с действительным значением активной мощности дуг $P_{д}$, рассчитанным на основе ортогональных составляющих прямой после-

довательности вторичного напряжения печного трансформатора и токов дуг. Ошибка отправляется в ПИ-регулятор, в котором формируется сигнал реактивной проводимости фаз ТРГ. Данная реактивная проводимость $B_{доп.зад}$ является дополнительной составляющей, которая суммируется с реактивными проводимостями из прямого канала системы управления СТК и определяет режим управления компенсатором.

В обратном канале по активной мощности усовершенствованной системы управления сигнал рассогласования $\Delta P_{д}$ перед отправкой в ПИ-регулятор проходит через блок ограничения по напряжению. Принцип работы данного блока состоит в переводе СТК в режим управления по напряжению при выходе его уровня за граничные значения. После возврата величины напряжения в допустимый диапазон СТК продолжит работу по активной мощности.

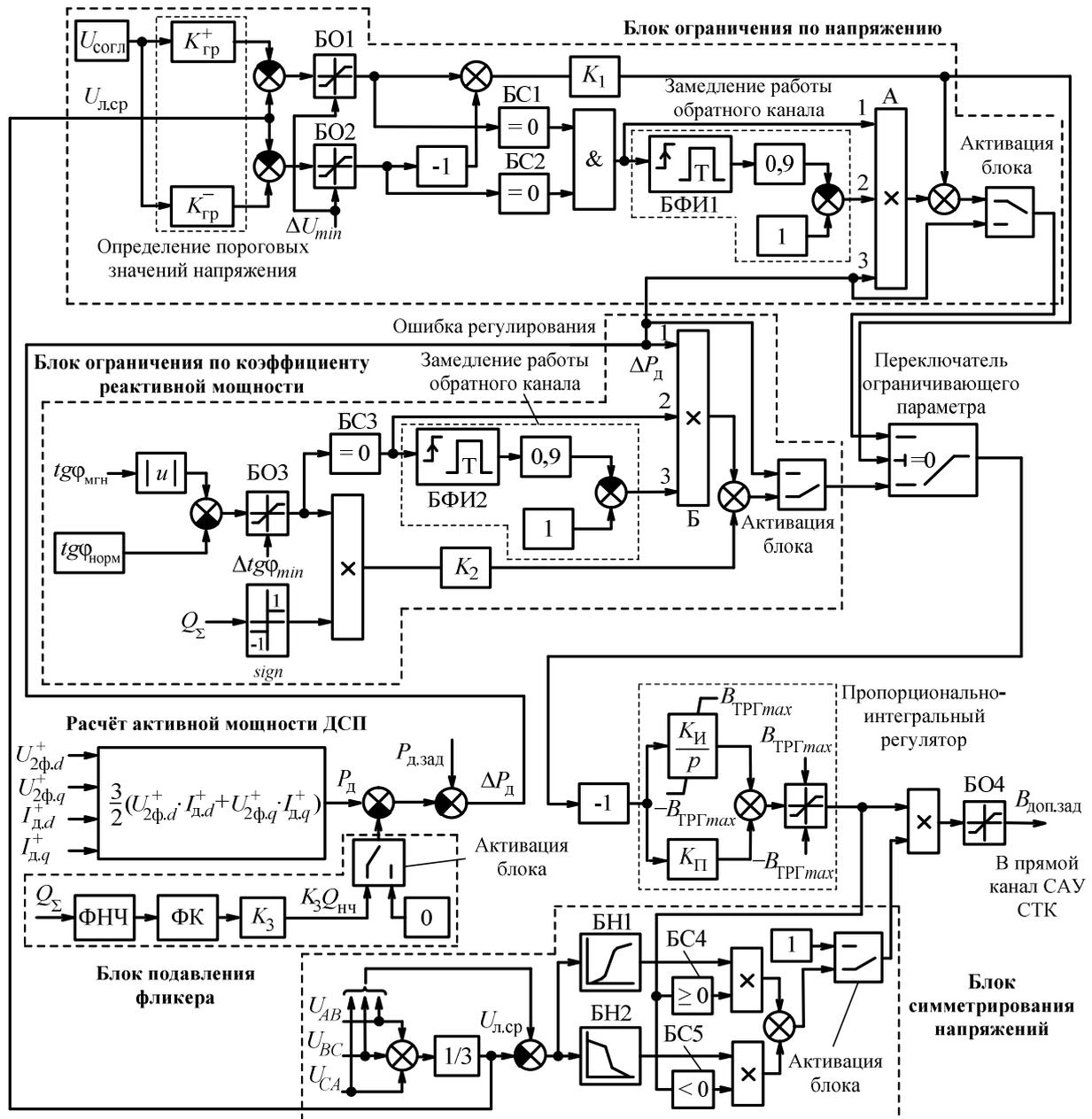


Рис. 3. Функциональная схема усовершенствованного обратного канала по активной мощности системы управления СТК

Входными сигналами блока ограничения являются среднее линейное напряжение $U_{л.ср}$ и согласованное напряжение $U_{согл}$, применительно к комплексу «ДСП-120-СТК» $U_{согл} = 35$ кВ. Согласованное напряжение умножается на коэффициенты $K_{гр}^+$ и $K_{гр}^-$ для автоматического определения граничных значений. Они сравниваются со средним уровнем напряжения и отправляются в блоки ограничения БО1 и БО2. Данные блоки пропускают только положительные сигналы. При равенстве входных сигналов нулю блоки сравнения БС1 и БС2 выдают 1. Сигнал на выходе логического

элемента «И», поступаая на первый вход блока умножения А, разрешает работу СТК по активной мощности. Рассмотрим работу блока ограничения при нарушении нижнего граничного значения напряжения. Положительный сигнал ΔU с блока БО2 приведет к изменению выходного сигнала БС2 с 1 на 0. Конъюнктор заблокирует работу канала по активной мощности. После активации блока ограничения реализуется алгоритм управления по напряжению, для которого имеющиеся параметры ПИ-регулятора не являются оптимальными. С целью повышения его точности и быстродействия при управлении по напряжению предусмотрена коррекция коэффициентов пропорцио-

нальной и интегральной частей путем их умножения на K_1 . В момент возврата уровня напряжения в допустимую область БО2 выдаст 0, а блок сравнения БС2 – единицу. На входе блока формирования импульса (БФИ1) ноль изменится на 1, в результате этого блок сформирует единичный импульс с шириной 0,05 с в момент возобновления управления СТК по активной мощности для кратковременного замедления работы обратного канала. Эта мера принята с целью уменьшения амплитуды колебаний напряжения вокруг граничного значения при попеременной работе двух контуров регулирования по активной мощности и напряжению из-за длительного нарушения контролируемого параметра.

Графики, полученные на математической модели после усовершенствования обратного канала по активной мощности СУ СТК, представлены на рис. 4. Напряжение на всем времени моделирова-

ния не опускается ниже граничного значения $U_{(-)гр}$ (рис. 4б). Благодаря работе блока ограничения по напряжению в период t_2 оно стабилизируется на уровне 31,5 кВ. Переход от режима поддержания активной мощности дуг к стабилизации напряжения на время нарушения $U_{(-)гр}$ привел к отклонению действительной активной мощности ДСП от заданных уставок на регулирование $P_{д.зад}$ (рис. 4а).

В эксперименте с исходным вариантом обратного канала по активной мощности СУ СТК кроме отклонения напряжения за граничное значение было зафиксировано нарушение нормативного коэффициента реактивной мощности $tg\phi_{норм}$ как в емкостной (t_1 и t_4), так и индуктивной области (t_3) графика на рис. 2в. Нарушение нормативного

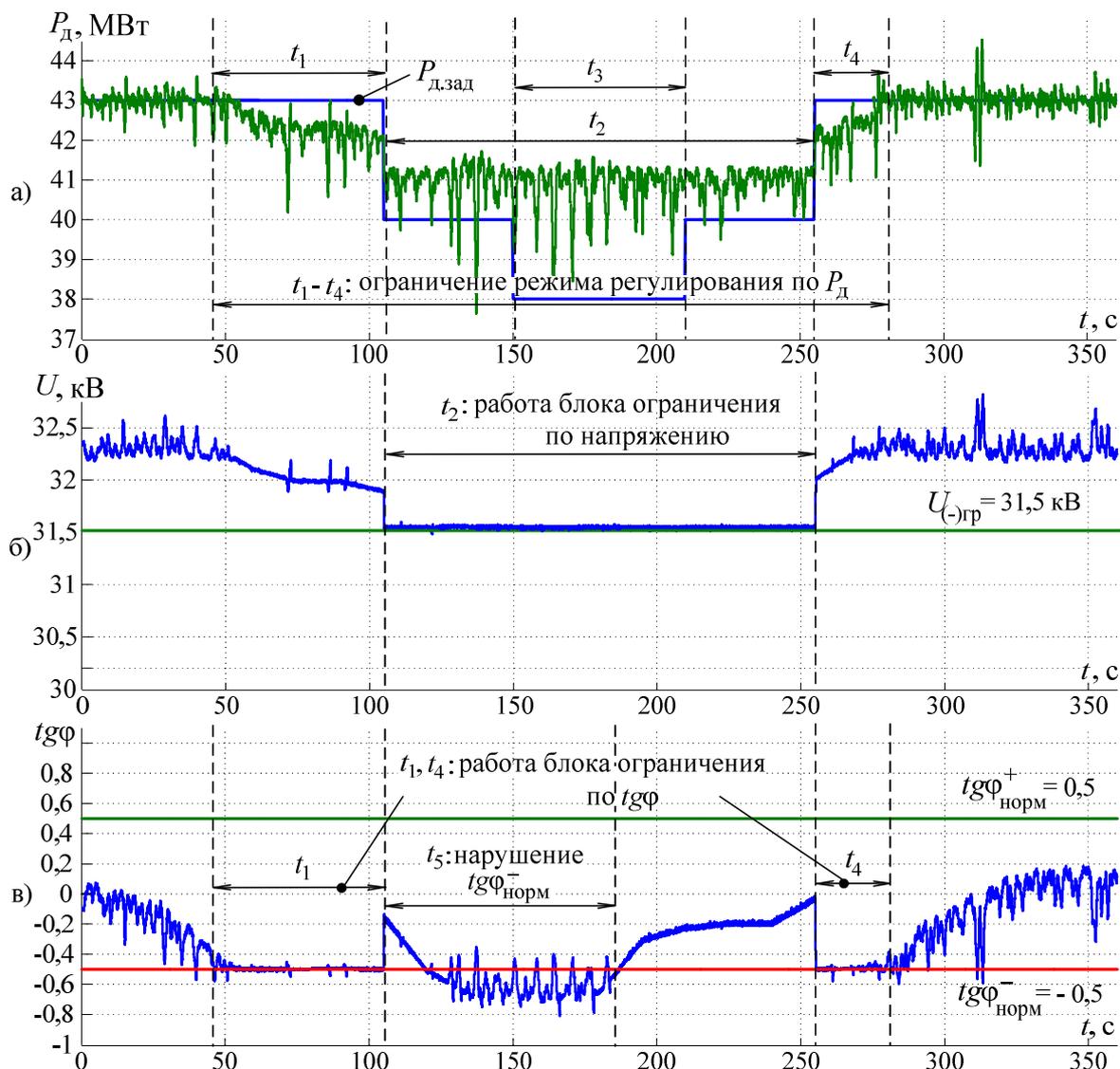


Рис. 4. Графики изменения активной мощности ДСП (а), напряжения (б) и коэффициента реактивной мощности (в) при использовании блоков ограничения по напряжению и $tg\phi$ в обратном канале по активной мощности системы управления СТК

tgφ обусловлено особенностью функционирования СТК по алгоритму поддержания активной мощности. В этом режиме СТК не осуществляет прямого контроля над величиной перетоков суммарной реактивной мощности электросталеплавильного комплекса. Нормативный tgφ контролировался на первичной стороне сетевого трансформатора. Для контроля tgφ выбрана именно эта точка по причине того, что по высокой стороне сетевого трансформатора на исследуемом объекте проходит граница балансовой принадлежности предприятия и электроснабжающей организации. В сетях с напряжением 220 кВ tgφ_{норм} равен 0,5 [9].

Для осуществления контроля над коэффициентом реактивной мощности по аналогии с блоком ограничения по напряжению разработан блок ограничения по tgφ (см. рис. 3). В обратный канал усовершенствованной СУ СТК также добавлен автоматический переключатель с целью согласования блоков ограничения при одновременном нарушении двух контролируемых параметров. В качестве приоритетной величины принято напряжение на общих шинах ДСП и СТК. При одновременном превышении $U_{гр}$ и tgφ_{норм} будет активен только блок ограничения по напряжению. На рис. 4, в видно, что на промежутках времени t_1 и t_4 tgφ поддерживается на нормативном значении, активная мощность ДСП отклоняется от $P_{д.зад}$ из-за ограничения работы обратного канала СУ СТК по $P_{д}$ (рис. 4а). Работа блока ограничения по напряжению в период t_2 привела к нарушению tgφ_{норм} на время t_5 . Так как напряжение является приоритетной величиной для контроля, то блок ограничения по tgφ в этот момент был неактивен.

2. Анализ гармонического состава линейных напряжений при работе СТК по активной мощности

На следующем этапе исследований была выполнена оценка несинусоидальности напряжения

на шинах электросталеплавильного комплекса по суммарному коэффициенту гармонических составляющих напряжения K_U . На основе экспериментальных данных линейных напряжений, записанных на шинах комплекса «ДСП-120-СТК», были построены графики изменения K_U , усредненные за 10 мин для одного цикла плавки при работе дуговой печи без СТК и с СТК (рис. 5а). С отключенным компенсатором коэффициент K_U имеет наибольшее значение на начальных стадиях плавки (в период расплавления твердой шихты). В течение цикла плавки значение K_U снижается, и на конечных стадиях данный коэффициент равен $K_U \approx 1-1,5\%$ [10]. После включения СТК уровень гармоник увеличился в технологические паузы ДСП и на конечных стадиях плавки. Рост K_U связан с работой ТРГ. Для адекватной оценки влияния режима управления СТК на величину K_U в математической модели были определены такие параметры работы ДСП-120 без СТК, при которых суммарные коэффициенты гармонических составляющих трех линейных напряжений принадлежали диапазону экспериментальных значений (см. рис. 5а). Далее были проведены расчеты K_U в трех опытах при регулировании СТК по реактивной мощности ($Q_{\Sigma} = 0$ МВАр), по напряжению ($U_{зад} = 35$ кВ) и по активной мощности ($P_{д} = P_{д.зад}$). По результатам расчета, представленным в табл. 1, видно, что после включения СТК величины K_U линейных напряжений в среднем снизились на 0,7–0,9%. Это объясняется тем, что генерируемые в процессе работы ДСП и ТРГ гармонические составляющие тока поглощаются фильтрами высших гармоник в составе СТК. В группу фильтров обычно входит фильтр второй гармоники С-типа для фильтрации спектра гармоник, начиная со второго порядка, и несколько узкополосных фильтров для подавления отдельных гармоник [11]. На основе полученных значений K_U можно

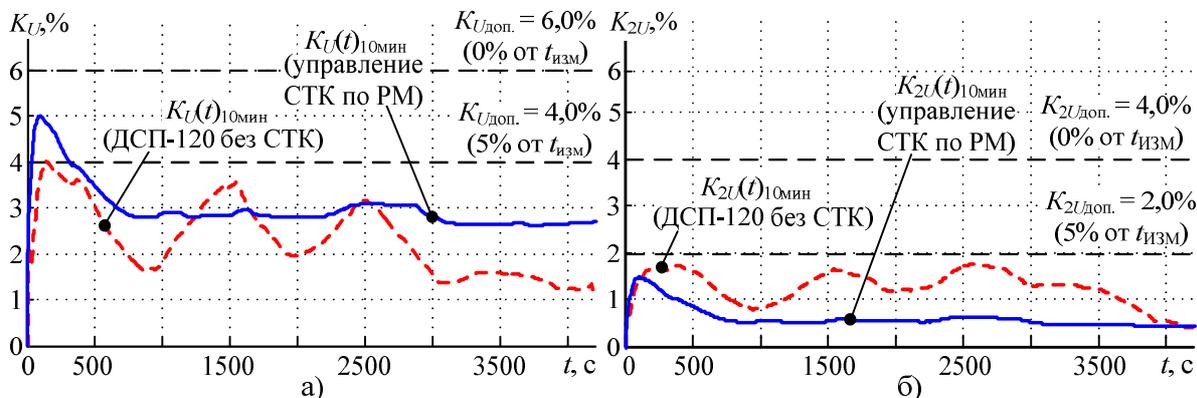


Рис. 5. Графики суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (а) и коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (б), рассчитанные на основе экспериментальных данных комплекса «ДСП-120-СТК»

Таблица 1

Определение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

Опыт		Значение K_U линейных напряжений, %		
		U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
ДСП-120 без СТК		2,59	2,37	2,53
Режим управления СТК	$Q_{\Sigma} = 0$ МВАр	1,85	1,54	1,60
	$U_{зад} = 35$ кВ	1,84	1,54	1,55
	$P_d = P_{д.зад}$	1,85	1,54	1,56

Таблица 2

Исследование несимметрии напряжений

Параметр	ДСП-120 без СТК	Режим управления СТК			
		$Q_{\Sigma} = 0$ МВАр	$U_{зад} = 35$ кВ	$P_d = P_{д.зад}$	$P_d = P_{д.зад}$ с блоком симметрирования
K_{2U} , %	1,59	0,53	0,50	0,60	0,52

заключить, что режим управления СТК не оказывает заметного влияния на гармонический состав напряжения, поэтому работа компенсатора по активной мощности не приведет к ухудшению синусоидальности кривой напряжения.

3. Оценка эффективности работы усовершенствованной СУ СТК при симметрировании нагрузки ДСП. Разработка дополнительного блока симметрирования напряжений

Одной из функций СТК является симметрирование суммарных нагрузочных токов электроплавильного комплекса. По графикам изменения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} (рис. 5б) видно, что в период плавки ДСП-120 без СТК K_{2U} лежит в пределах от 0,8 до 1,8 %. После включения компенсатора коэффициент K_{2U} снизился до 0,6–0,7 % и практически не изменялся на протяжении всего анализируемого цикла плавки. Результаты расчета K_{2U} на математической модели «ДСП-120-СТК» представлены в табл. 2. В опыте без СТК коэффициент несимметрии составил 1,59 %. Компенсатор во всех анализируемых режимах управления уменьшил коэффициент K_{2U} примерно в 3 раза. При работе компенсатора по алгоритму поддержания активной мощности ДСП заметного ухудшения несимметрии напряжений не наблюдается. Это объясняется особенностями функционирования СУ СТК, используемой в математической модели [12]. Реализация принятого режима управления осуществляется после симметрирования суммарных токов нагрузки в прямом быстродействующем канале. Так как новый алгоритм управления СТК предназначен для контроля суммарной активной мощности ДСП, к реактивным проводимостям фаз ТРГ, рассчитанным

в обратном канале, прибавляется одинаковая добавка $B_{доп.зад}$. Поэтому компенсатор в режиме поддержания активной мощности ДСП также выполняет функцию симметрирования [13].

С целью дополнительного снижения несимметрии напряжений и приближения K_{2U} к значению, полученному при работе СТК по классическим алгоритмам, разработан блок симметрирования напряжений (см. рис. 3). На вход блока симметрирования поступают сигналы действующих значений линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} и определяется их средняя величина $U_{л.ср}$. Отклонения напряжений ΔU_{AB} , ΔU_{BC} и ΔU_{CA} с сумматора поступают в блоки нелинейности БН1 и БН2. В работе постоянно находится только один из двух блоков нелинейности в зависимости от знака дополнительной составляющей реактивной проводимости на выходе ПИ-регулятора. Обратный канал по активной мощности осуществляет одинаковую добавку $B_{доп.зад}$, поэтому величины изменения трех линейных напряжений, вызванные составляющей $B_{доп.зад}$ будут примерно равны между собой. Блок симметрирования фиксирует существующую разницу между линейными напряжениями и их средним значением и осуществляет пофазную корректировку $B_{доп.зад}$ умножением на определенные коэффициенты в зависимости от знака и величины отклонения ΔU . В случае если активную мощность дуговой печи необходимо понизить до величины уставки, на выходе ПИ-регулятора формируется положительная величина реактивной проводимости $B_{доп.зад}$, которая обнуляет сигнал от блока нелинейности БН2. Сигналы на выходе БН1 формируются таким образом, чтобы компенсатор осуществлял ускоренное понижение наибольшего линейного напряжения и замедлен-

ное снижение наименьшего. При необходимости в увеличении суммарной мощности ДСП ПИ-регулятор формирует отрицательную величину $V_{\text{доп.зад}}$, разрешая работу блока БН2. В процессе повышения напряжения СТК будет в большей степени увеличивать минимальное линейное напряжение и в меньшей степени – максимальное линейное напряжение. Пофазное изменение быстродействия обратного канала по активной мощности приведет к снижению разницы между величинами линейных напряжений. Для проверки эффективности разработанного блока проведен дополнительный расчет и определено значение коэффициента K_{2U} (см. табл. 2). Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности снизился с 0,60 до 0,52 %.

4. Исследование эффективности работы усовершенствованной СУ СТК при демпфировании колебаний напряжения. Разработка блока подавления фликера

В разработанном алгоритме управления СТК стабилизация активной мощности ДСП достигается за счет изменения уровня напряжения на шинах электросталеплавильного комплекса. Так как дуговая печь имеет резкопеременный характер нагрузки, компенсатор, поддерживая $P_{\text{д.зад}}$, создает дополнительные колебания напряжения, что приводит к росту фликера.

В проектной документации на СТК указано, что кратковременная доза фликера на шинах 35 кВ в случае функционирования ДСП-120 без компенсатора составляет $P_{St} \approx 1,9$. Данное значение было получено на математической модели путем подбора параметров электрического режима дуговой печи с целью осуществления достоверной оценки эффективности подавления фликера в опытах с работой СТК по трем анализируемым алгоритмам. Результаты расчета кратковременных доз фликера в сети 35 кВ (P_{St35}) и 220 кВ (P_{St220}), а также коэффициентов подавления фликера $k_{\text{под}}$ для P_{St35} сведены в табл. 3. Кратковременные дозы фликера в сети 35 кВ при работе СТК по реактивной мощности и напряжению составили 1,07 и 0,9. Коэффици-

енты подавления равны $k_{\text{под}Q} = 1,87/1,07 = 1,75$ и $k_{\text{под}U} = 1,87/0,9 = 2,08$. При управлении СТК по активной мощности кратковременная доза фликера $P_{St35} = 2,16$ оказалась выше допустимого значения $P_{St\text{доп}} = 1,38$. В сети 220 кВ во всех опытах P_{St220} ниже установленной нормы в 1,38 [14]. От шин электросталеплавильного комплекса получают питание только дуговые печи и СТК, поэтому к качеству электроэнергии не предъявляют жестких требований. Реализация алгоритма управления СТК по стабилизации $P_{\text{д}}$ возможна, несмотря на значительный рост дозы фликера на шинах комплекса, который практически не оказывает влияния на работу дуговых печей, однако нежелательна по причине негативного воздействия колебаний напряжения на другие электротехнологические установки, получающие питание от сети 220 кВ, к которой подключен сетевой трансформатор комплекса «ДСП-СТК» [15, 16].

Наибольший вклад в величину кратковременной дозы фликера вносят низкочастотные колебания напряжения [17]. Известно, что основное влияние на отклонение напряжения в сети оказывает протекание реактивной мощности, которое в высоковольтных сетях примерно в 10 раз превышает изменение напряжения от передачи активной мощности. В системе управления СТК, описанной в патенте США [18], помимо компенсации реактивной мощности осуществляется учет низкочастотной составляющей изменения активной нагрузки ДСП для лучшего снижения колебаний напряжения. Подобный принцип предложен в российском патенте на датчик реактивной мощности резкопеременной нагрузки [19]. В обоих случаях компенсатор работает по реактивной мощности комплекса «ДСП-СТК».

По аналогии с приведенными выше работами предлагается снизить P_{St} при управлении СТК по активной мощности за счет компенсации низкочастотных колебаний суммарной реактивной мощности комплекса «ДСП-СТК». Для этой цели разработан блок подавления фликера, его функциональная схема представлена на рис. 3. Вход-

Таблица 3

Расчет кратковременной дозы фликера

Опыт	P_{St35} , о.е.	P_{St220} , о.е.	$k_{\text{под}}$, о.е.	
ДСП без СТК	1,87	0,6	–	
Режим управления СТК $Q_{\Sigma} = 0$ МВАр	1,07	0,33	1,75	
Режим управления СТК $U_{\text{зад}} = 35$ кВ	0,9	0,28	2,08	
Режим управления СТК $P_{\text{д}} = \text{const}$	2,16	0,67	0,87	
Режим управления СТК $P_{\text{д}} = \text{const}$ с блоком подавления	$K = 0,2$	1,80 (–16,67 %)	0,56 (–16,42 %)	1,04 (+19,54 %)
	$K = 0,3$	1,53 (–24,54 %)	0,48 (–28,36 %)	1,22(+40,23 %)
	$K = 0,4$	1,36 (–37,04 %)	0,42(–37,31 %)	1,40 (+60,92 %)

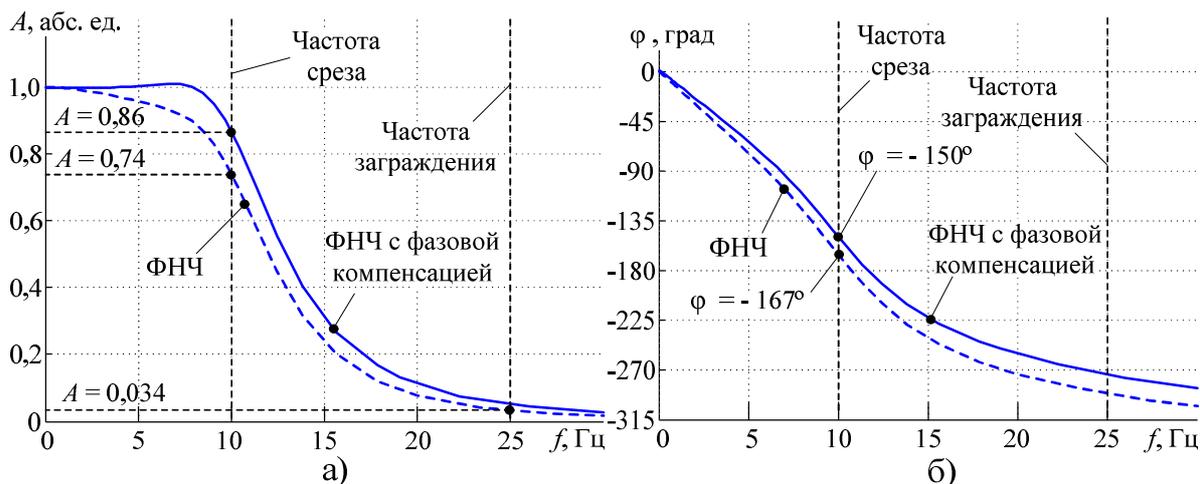


Рис. 6. Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики фильтра нижних частот Баттерворта 4-го порядка

ным сигналом блока является суммарная реактивная мощность комплекса «ДСП-120-СТК» (Q_Σ). Сигнал Q_Σ проходит через фильтр нижних частот (ФНЧ), фазовый компенсатор (ФК) и коэффициент усиления K_3 . На выходе блока подавления фликера получаем дополнительную составляющую $K_3 Q_{\Sigma\text{нч}}$ к сигналу действительной величины активной мощности дуг. Если реактивная мощность имеет емкостный характер, то дополнительная составляющая $K_3 Q_{\Sigma\text{нч}}$ имеет отрицательное значение. При $Q_\Sigma < 0$ значение $K_3 Q_{\Sigma\text{нч}}$ суммируется с P_d и общий сигнал $P_d + K_3 Q_{\Sigma\text{нч}}$ сравнивается с $P_{d\text{зад}}$, для достижения которого после активации блока необходима меньшая величина реактивной мощности, так как расчетное значение P_d увеличено на $K_3 Q_{\Sigma\text{нч}}$. В результате этого компенсатор снижает генерацию реактивной мощности. Если $Q_\Sigma > 0$, то сигнал на выходе блока подавления фликера ($K_3 Q_{\Sigma\text{нч}} > 0$) вычитается из P_d , и с $P_{d\text{зад}}$ сравнивается общий сигнал $P_d - K_3 Q_{\Sigma\text{нч}}$, поэтому для достижения уставки на регулирование необходимо большее значение уровня напряжения.

Для фильтрации низкочастотных составляющих реактивной мощности Q_Σ используется ФНЧ Баттерворта 4-го порядка [20]. Его амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики представлены на рис. 6. По фазо-частотной характеристике ФНЧ (рис. 6б) видно, что фазовая задержка на частоте среза $f = 10$ Гц составляет $\varphi = -167^\circ$. Такой сильный сдвиг сигнала на выходе фильтра негативным образом влияет на эффективность работы блока подавления фликера. Для того чтобы уменьшить фазовую задержку ФНЧ, последовательно с ним был включен фазовый компенсатор [21]. Амплитудно-частотная и фазо-частотная ха-

рактеристики ФНЧ с фазовой компенсацией показаны на графиках рис. 6 сплошными линиями.

Проведены дополнительные расчеты P_{St} после внедрения блока подавления фликера в обратный канал СУ СТК, результаты которых представлены в табл. 3. Кратковременная доза фликера сравнивалась режимом, когда СТК работал по активной мощности ДСП без блока подавления фликера. Выполнены три опыта с коэффициентами усиления $K_3 = 0,2; 0,3$ и $0,4$. По данным в табл. 3 видно, что с увеличением коэффициента K_3 уменьшается P_{St} . Ее удалось снизить до допустимого значения при $K_3 = 0,4$ ($P_{St35} = 1,36$). Одновременно с улучшением качества электроэнергии по данному показателю наблюдается отклонение активной мощности дуговой печи от ее номинального значения, причем чем больше K_3 и P_{St} ближе к $P_{St\text{доп}}$, тем хуже СТК справляется со стабилизацией P_d . Изменяя величину K_3 , можно достичь компромиссного алгоритма управления СТК в зависимости от установленного приоритета – демпфирования колебаний напряжения или оптимизации режимов работы дуговой печи.

Заключение

1. Анализ результатов исследований показал, что в режиме поддержания постоянной активной мощности ДСП за счёт СТК наблюдается ухудшение КЭ и существует вероятность нарушения нормативного $\text{tg}\varphi$ на границе балансовой принадлежности предприятия и электроснабжающей организации.

2. На математической модели комплекса «ДСП-120-СТК» показана возможность отклонения уровня напряжения ниже граничного значения и нарушения нормативного коэффициента реактивной мощности при работе СТК по активной

мощности. Для предотвращения таких режимов работы электросталеплавильного комплекса разработаны блоки ограничения по напряжению и tgφ, которые реализуют управление СТК по одному из данных параметров с блокировкой алгоритма стабилизации активной мощности в периоды их нарушения. Проведено согласование двух блоков ограничения путем выбора приоритетного контролируемого параметра.

3. Анализ гармонического состава линейных напряжений на шинах комплекса «ДСП-СТК» показал, что режим регулирования $P_d = P_{d,зад}$ СТК не оказывает существенного влияния на величину K_U . В данном случае использование дополнительных мероприятий по обеспечению нормативных значений K_U и $K_{U(n)}$ не требуется.

4. В режиме поддержания активной мощности дуговой печи СТК сохраняет функцию симметрирования реактивной нагрузки. По этой причине коэффициент несимметрии по обратной последовательности, полученный в опыте с управлением СТК по активной мощности, примерно равен значениям K_{2U} в опытах с регулированием по реактивной мощности и напряжению. Для дополнительного снижения K_{2U} разработан блок симметрирования, принцип действия которого основан на пофазном изменении быстродействия обратного канала по активной мощности СУ СТК.

5. Стабилизация резкопеременной активной нагрузки ДСП за счет изменения уровня напряжения приводит к увеличению значения дозы фликера на шинах комплекса «ДСП-СТК» и в точке общего присоединения с другими электроприёмниками. Кратковременная доза фликера возросла по сравнению с классическими алгоритмами более чем в два раза, из-за чего имеем нарушение данного показателя. Для исключения данного негативного эффекта разработан блок подавления фликера, компенсирующий низкочастотные колебания суммарной реактивной мощности комплекса «ДСП-СТК». Применение данного блока обеспечивает снижение P_{St} до установленной нормы.

6. Таким образом, проведенные улучшения СУ СТК устранили или значительно снизили негативные последствия, которые имели место при работе компенсатора в режиме поддержания активной мощности ДСП. Структура усовершенствованной СУ СТК позволяет активировать блоки, добавленные в обратный канал по активной мощности, отдельно друг от друга в зависимости от нарушения тех или иных показателей КЭ и нормативного tgφ.

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

Литература

1. Research on the calculation of the influence of arc furnace reactive impact loads on power system and the method of compensation / H. Yu, Y. Yue, C. Zhifei, X. Ling // 2010 Conference Proceedings IPEC. – Singapore, 2010. – P. 1052–1055. DOI: 10.1109/IPEC.2010.5696970

2. Ustariz-Farfan, A.J. Electric arc furnaces influence in power systems area / A.J. Ustariz-Farfan, E.A. Cano-Plata, S. Arias-Guzman // 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. – Cincinnati, OH (USA), 2017. – P. 1–6. DOI: 10.1109/IAS.2017.8101813

3. Dionise, T.J. Assessing the Performance of a Static Var Compensator for an Electric Arc Furnace / T.J. Dionise // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2014. – Vol. 50, iss. 3. – P. 1619–1629. DOI: 10.1109/TIA.2013.2282762

4. Ненахов, А.И. Особенности построения систем управления статическими тиристорными компенсаторами / А.И. Ненахов, С.И. Гамазин, Д.С. Мологин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 1. – С. 36–42.

5. Николаев, А.А. Повышение эффективности работы электротехнического комплекса «дуговая сталеплавильная печь – статический тиристорный компенсатор»: моногр. / А.А. Николаев. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. – 318 с.

6. Kawamura, A. An Optimal Control Method Applied for the Compensation of the Fundamental VAR Fluctuations in the Arc Furnace / A. Kawamura // IEEE Transactions of Industry Applications. – 1983. – Vol. 1A-19, iss. 3. – P. 414–423. DOI: 10.1109/TIA.1983.4504217

7. Николаев, А.А. Сравнительный анализ режимов регулирования статического тиристорного компенсатора в системе электроснабжения дуговой сталеплавильной печи высокой мощности / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.В. Анохин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 35–46. DOI: 10.14529/power160205

8. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.

9. О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии: Приказ Министерства Энергетики РФ от 23 июня 2015 г. № 380 // Зарегистрирован в Минюсте России 22 июля 2015 г. № 38151.

10. Uz-Logoglu, E. Online Characterization of Interharmonics and Harmonics of AC Electric Arc Furnaces by Multiple Synchronous Reference Frame Analysis / E. Uz-Logoglu, O. Salor, M. Ermis //

IEEE Transaction on Industry Applications. – 2016. – Vol. 52, iss. 3. – P. 2673–2683. DOI: 10.1109/TIA.2016.2524455

11. Grünbaum, R. *Powerful Reactive Power Compensation of a Very Large Electric Arc Furnace* / R. Grünbaum, P. Ekström, A.A. Hellström // *Proceedings of the 2013 Fourth International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. – Istanbul (Turkey), 2013. – P. 277–282. DOI: 10.1109/PowerEng.2013.6635619

12. Николаев, А.А. *Разработка математической модели электротехнического комплекса «дуговая сталеплавильная печь – статический тиристорный компенсатор»* / А.А. Николаев, В.В. Анохин, П.Г. Тулунов // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2016. – № 4 (33). – С. 61–71. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-61-71

13. Guygui, L. *Principles and applications of static, thyristor-controlled shunt compensators* / L. Guygui, R.A. Otto, T.H. Putman // *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*. – 1978. – Vol. PAS-97, no. 5. – P. 1935–1945. DOI: 10.1109/tpas.1978.354690

14. Гамазин, С.И. *Математическая оценка подавления фликера с помощью СТК* / С.И. Гамазин, М.А. Кулага, А.И. Ненахов // *Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: сб. материалов XI международного науч.-практ. интернет-конф.* – Орел: Изд-во ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК», 2013. – С. 60–62.

15. Вагин, Г.Я. *Электромагнитная совместимость в электроэнергетике* / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.А. Севостьянов. – М.: Издат. центр «Академия», 2010. – 244 с.

16. *Исследование взаимосвязи показателей качества электроэнергии и надежности электроснабжения* / Ю.В. Шаров, И.И. Карташёв, В.Н. Тульский, О.В. Большаков // *Энергоэксперт*. – 2011. – № 6. – С. 78–83.

17. ГОСТ Р 51317.4.15–2012. *Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Функциональные и конструктивные требования*. – М.: Стандартинформ, 2014. – 38 с.

18. Patent 6114841 United States of America, Int. Cl. G05F 1/70. *Method and a device for compensation of reactive power* / J-P Hasler, T. Johansson, L. Angquist; Assignee Asea Brown Boveri AB (Vasteras, Sweden). – Appl. No. 08/874,035; decl. 12.06.1997; publ. 5.09.2000.

19. Патент № 2488204 РФ, МПК H02J 3/18. *Датчик реактивной мощности резкопеременной нагрузки для управления статическим компенсатором реактивной мощности* / В.В. Тропин, В.А. Кузьменко, Д.С. Мологин, О.С. Панова; заявители и патентообладатели: ЗАО «Совместное предприятие «АО Ансальдо-ВЭИ», В.В. Тропин, В.А. Кузьменко, Д.С. Мологин, О.С. Панова. – № 2012100347/07; заявл. 10.01.2012; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20.

20. Сорокин, Г.А. *Фильтры нижних частот* / Г.А. Сорокин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 100–107.

21. Wang, F. *The Exact and Unique Solution for Phase-Lead and Phase-Lag Compensation* / F. Wang // *IEEE Transactions on Education*. – 2003. – Vol. 46, no. 2. – P. 258–262. DOI: 10.1109/te.2002.808279

Николаев Александр Аркадьевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизированный электропривод и мехатроника», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; aa.nikolaev@magtu.ru.

Анохин Василий Васильевич, электромонтёр по ремонту и обслуживанию электрооборудования, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск; anohinvasilii@mail.ru.

Поступила в редакцию 25 июня 2019 г.

ANALYSIS OF POWER QUALITY FOR ACTIVE POWER STABILIZATION OF ELECTRIC ARC FURNACE BY MEANS OF STATIC VAR COMPENSATOR

A.A. Nikolaev¹, aa.nikolaev@magtu.ru,
V.V. Anokhin², anohinvasilii@mail.ru

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation,

² PJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works", Magnitogorsk, Russian Federation

The paper presents the key findings of studying the quality of electricity at the buses of an electric steel-making complex as affected by a static var compensator (SVC) running a novel control algorithm designed to improve the electric performance of an electric arc furnace (EAF) by stabilizing its active power at an optimal value. Analysis of how an SVC runs this algorithm reveals a considerable degradation of voltage quality compared to experiments with conventional algorithms. For detailed evaluation of SVC effects on the quality of electricity (QE), the research team ran an SVC in active-power mode and computed the QE values characterizing slow voltage deviations, non-sinusoidality, imbalance, and fluctuation; the values were compared against those attained by the reactive power- or voltage-controlled compensator. Experimentation used the mathematical model of an existing EAF-120-SVC unit, which was developed and run in MATLAB Simulink. To enable the SVC to sustain a constant active EAF power while also keeping the QE values sufficiently high, the paper proposes a structure of additional voltage and reactive power coefficient constraints, voltage balancing, and flicker suppression.

Keywords: quality of electricity, static var compensator, control modes of thyristor-controlled reactor, electric arc furnace, voltage deviation, flicker, reactive power factor.

References

1. Yu H., Yue Y., Zhifei C., Ling X. Research on the Calculation of the Influence of Arc Furnace Reactive Impact Loads on Power system and the Method of Compensation. *2010 Conference Proceedings IPEC*. Singapore, 2010, pp. 1052–1055. DOI: 10.1109/IPECON.2010.5696970
2. Ustariz-Farfan A. J., Cano-Plata E.A., Arias-Guzman S. Electric Arc Furnaces Influence in Power Systems Area. *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. Cincinnati, OH (USA), 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/IAS.2017.8101813
3. Dionise T.J. Assessing the Performance of a Static Var Compensator for an Electric Arc Furnace. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, vol. 50, iss. 3, pp. 1619–1629. DOI: 10.1109/TIA.2013.2282762
4. Nenakhov A.I., Gamazin S.I., Mologin D.S. [Specifics of Constructing Static Var Compensator Controls]. *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont* [Electrical Equipment: Exploitation and Repair], 2014, no. 1, pp. 36–42. (in Russ.)
5. Nikolaev A.A. *Povyshenie ehffektivnosti raboty ehlektrotekhnicheskogo kompleksa "dugovaya staleplavil'naya pech' – staticheskiy tiristornyy kompensator"* [Optimizing the SVC-EAF Complex]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2017. 318 p.
6. Kawamura A. An Optimal Control Method Applied for the Compensation of the Fundamental VAR Fluctuations in the Arc Furnace. *IEEE Transactions of Industry Applications*, 1983, vol. 1A-19, iss. 3, pp. 414–423. DOI: 10.1109/TIA.1983.4504217
7. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Anokhin V.V. [Comparative Analysis of Static Var Compensator Control Modes for High Power Electric Arc Furnace]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 35–46. (in Russ.). DOI: 10.14529/power160205
8. *GOST 32144–2013*. [Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Power Quality Limits in the Public Power Supply Systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p. (in Russ.)
9. *O poryadke rascheta znacheniy sootnosheniya potrebleniya aktivnoy i reaktivnoy moshchnosti dlya otdelnykh energoprinimayushchikh ustroystv (grupp energoprinimayushchikh ustroystv) potrebiteley elektricheskoy energii* [Calculating the Active-Reactive Power Ratio for Electricity Consumers' Power Units or Their Clusters], Order of the Ministry of Industrial Energy of the Russian Federation on 23 June, 2015 no. 380, Registered in the Russian Ministry of Justice on July 22, 2015 no. 38151.
10. Uz-Logoglu E., Salor O., Ermis M. Online Characterization of Interharmonics and Harmonics of AC Electric Arc Furnaces by Multiple Synchronous Reference Frame Analysis. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 2016, vol. 52, iss. 3, pp. 2673–2683. DOI: 10.1109/TIA.2016.2524455

11. Grünbaum R., Ekström P., Hellström A.A. Powerful Reactive Power Compensation of a Very Large Electric Arc Furnace. *Proceedings of the 2013 Fourth International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. Istanbul (Turkey), 2013, pp. 277–282. DOI: 10.1109/PowerEng.2013.6635619
12. Nikolaev A.A., Anokhin V.V., Tulupov P.G. [Design of Mathematical Model of Electrotechnical Complex “Electric Arc Furnace – Static Var Compensator”]. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 4 (33), pp. 61–71. (in Russ.). DOI: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-61-71
13. Guygui L., Otto R.A., Putman T.H. Principles and Applications of Static, Thyristor-Controlled Shunt Compensators. *IEEE. Transaction on Power Apparatus and Systems*, 1978, vol. PAS-97, no. 5, pp. 1935–1945. DOI: 10.1109/tpas.1978.354690
14. Gamazin S.I., Kulaga M.A., Nenakhov A.I. [Mathematical Evaluation of the Suppression of Flicker Using SVC]. *Ehnergo- i resursosberezhenie – XXI vek* [Energy and Resource Saving – XXI Century]. Orel, Orel State University Publ, 2013, pp. 60–62. (in Russ.)
15. Vagin G.A., Loskutov A.A., Sevostyanov A.A. *Elektromagnitnaya sovместimost v elektroenergetike* [Electromagnetic Compatibility in Electric Power Industry]. Moscow, Academy Publ., 2010. 244 p.
16. Sharov Yu.V., Kartashyov I.I., Tulskiy V.N., Bolshakov O.V. [Research of Interrelation of Power Quality Parameter and Reliability of Power Supply]. *Energoekspert* [Energy Expert], 2011, no. 6, pp. 78–83. (in Russ.)
17. *GOST R 51317.4.15–2012*. [Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Flicker. Functional and Design Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 38 p. (in Russ.)
18. Hasler J-P., Johansson T., Angquist L. Method and a Device for Compensation of Reactive Power. Patent USA, no. 6114841; decl. 12.06.1997; publ. 5.09.2000.
19. Tropin V.V., Kuzmenko V.A., Mologin D.S., Panova O.S. *Datchik reaktivnoy moshchnosti rezkopere-mennoy nagruzki dlya upravleniya staticheskim kompensatorom reaktivnoy moshchnosti* [Abruptly Variable Load Reactive Power Sensor for Controlling a Static Reactive Power Compensator]. Patent RF, no. 2488204; decl. 10.01.2012; publ. 20.07.2013, Bul. no. 20.
20. Sorokin G.A. [Filters of the Lower Frequencies]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 100–107. (in Russ.)
21. Wang F. The Exact and Unique Solution for Phase-Lead and Phase-Lag Compensation. *IEEE Transactions on Education*, 2003, vol. 46, no. 2, pp. 258–262. DOI: 10.1109/te.2002.808279

Received 25 June 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Николаев, А.А. Анализ качества электроэнергии при стабилизации активной мощности дуговой сталеплавильной печи с помощью статического тиристорного компенсатора / А.А. Николаев, В.В. Анохин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 51–64. DOI: 10.14529/power190306

FOR CITATION

Nikolaev A.A., Anokhin V.V. Analysis of Power Quality for Active Power Stabilization of Electric Arc Furnace by Means of Static Var Compensator. *Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 51–64. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190306