

УПРАВЛЕНИЕ УСТРОЙСТВОМ РПН СЕТЕВОГО ТРАНСФОРМАТОРА С УЧЕТОМ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

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 разработки и исследования нового принципа управления устройством регулирования напряжения трансформатора под нагрузкой (РПН), который обеспечивает согласованную работу последнего с электрическими режимами сталеплавильных агрегатов, компенсирующих устройств, устанавливаемых в системе электроснабжения дуговых печей (ДСП) высокой и сверхвысокой мощности, и питающей сети. Предложенный принцип заключается в предварительном определении рабочих диапазонов напряжений на первичной стороне сетевого трансформатора для всех ступеней РПН с учётом существующих ограничений как со стороны электросталеплавильного комплекса, так и со стороны питающей сети. Для реализации переключений ступени РПН по новым алгоритмам проведено усовершенствование системы автоматического управления статического тиристорного компенсатора (СТК) путем ее дополнения блоком определения номера ступени РПН сетевого трансформатора. Проведен анализ проблемы рационального переключения ступеней РПН сетевых трансформаторов, питающих электросталеплавильные комплексы, в условиях сильных отклонений напряжения в питающей сети на примере трех российских металлургических предприятий. Рассмотрены особенности выбора положений РПН сетевых трансформаторов при двух режимах управления СТК: обеспечение нулевого потребления реактивной мощности из питающей сети и поддержание уровня напряжения в точке общего подключения дуговых печей и СТК на согласованном уровне. Эффект от предложенных решений определен на основе результатов, полученных с помощью математических моделей электросталеплавильных комплексов, разработанных в приложении Simulink математического пакета MATLAB. Рассмотрены пути дальнейшего совершенствования принципов согласованного функционирования устройства автоматического регулирования напряжения трансформатора (АРНТ) с режимами сталеплавильных агрегатов, компенсирующих устройств и питающей сети.

Ключевые слова: устройство регулирования напряжения трансформатора под нагрузкой, автоматическое регулирование напряжения трансформатора, медленные изменения напряжения, дуговая сталеплавильная печь, электрические характеристики дуговой сталеплавильной печи, статический тиристорный компенсатор, компенсация реактивной мощности.

Введение

На металлургических предприятиях электросталеплавильные комплексы, имеющие в своем составе мощные и сверхмощные дуговые печи, получают питание от отдельного распределительного устройства, которое, в свою очередь, связано с питающей сетью через понизительный трансформатор. Как известно, уровень напряжения во внешней районной сети может изменяться в больших пределах как в течение одних суток, так и за более продолжительный период времени. Для поддержания некоторого согласованного уровня напряжения на шинах электросталеплавильного комплекса сетевые трансформаторы оборудуют устройством регулирования напряжения под нагрузкой (РПН). С целью оптимизации процесса управления устройством РПН трансформаторы поставляются со специальной автоматикой, реализующей автоматическое регулирование напряжения трансформатора (АРНТ). Автоматика АРНТ функционирует по собственным алгоритмам, опираясь на электрические параметры сети со сторо-

ны высокого и низкого напряжения, и не учитывает режимов работы дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и статических тиристорных компенсаторов (СТК), подключенных к общим шинам на вторичной стороне сетевого трансформатора. Фактически в настоящее время система автоматического управления (САУ) положением электродов ДСП, САУ реактивной мощностью статического тиристорного компенсатора и автоматика АРНТ работают отдельно друг от друга, выполняя собственные задачи. Вследствие этого, как показали исследования, проведенные на основе экспериментальных данных с трех российских предприятий: ПАО «АМЗ» (г. Аша), АО «ССЗБ» (г. Балаково), ПАО «ММК» (г. Магнитогорск), электросталеплавильные агрегаты работают в неблагоприятных условиях. В зависимости от режима управления компенсатора раздельная работа автоматики АРНТ и комплекса «ДСП-СТК» может привести к различным негативным последствиям, например, нарушению нормативного коэффициента реактивной мощности на границе балансовой принадлежности

предприятия и электроснабжающей организации, перегрузке оборудования и др. Для обеспечения согласованной работы автоматики АРНТ с режимами электросталеплавильного комплекса разработан новый алгоритм управления устройством РПН, учитывающий особенности работы ДСП и СТК. Данный алгоритм реализован на базе системы управления СТК за счет введения в нее дополнительного блока определения номера ступени РПН сетевого трансформатора.

Анализ вопроса рационального управления устройством РПН сетевого трансформатора в системе электроснабжения

электротехнического комплекса «ДСП-СТК»

Дуговые сталеплавильные печи являются мощными нелинейными электроприемниками с несимметричным и резкопеременным характером нагрузки [1, 2]. Для обеспечения электромагнитной совместимости с другими потребителями металлургических предприятий электросталеплавильные комплексы питают через отдельные силовые трансформаторы, понижающие напряжение с высокого уровня 110–220 кВ до среднего 6–35 кВ (рис. 1). На рис. 1, а показана схема электроснабжения комплекса «ДСП-120-СТК», расположенного на ПАО «АМЗ». Сетевой трансформатор Т1 230/35 кВ мощностью 160 МВА связан с внешней районной сетью через открытое распределительное устройство 220 кВ (ОРУ-220 кВ) и от закрытого распределительного устройства 35 кВ (ЗРУ-35 кВ) передает электроэнергию через воздушно-кабельную линию электропередачи (ВКЛЭП-35 кВ) на ЗРУ-35 кВ электросталеплавильного цеха, к шинам которого подключены дуговая печь 120 тонн (табл. 1) и статический тиристорный компенсатор СТК-135 МВАр. В табл. 1 приведены основные параметры исследуемых электротехнических комплексов «ДСП-СТК». Аналогичным образом выполнена схема питания комплекса «ШП-125-УПК-СТК» на АО «ССЗБ» (рис. 1, б), где ШП – шахтная печь, УПК – установка печь-ковш. Если электросталеплавильный цех расположен на большом расстоянии от точек возможного подключения к сети 110–220 кВ, на территории предприятия сооружают подстанцию глубокого ввода (ПГВ), так как передача электроэнергии на среднем уровне напряжения в данном случае является экономически нецелесообразной из-за необходимости прокладки кабелей большого сечения и высоких потерь электроэнергии, возникающих при протекании нагрузочных токов ДСП [3]. В качестве примера ПГВ можно привести подстанцию 220/35 кВ на ПАО «ММК» (рис. 1, в), через которую получают питание две сверхмощные дуговые сталеплавильные печи объемом 180 т каждая (ДСП-180) и установка печь-ковш (УПК). Несмотря на осуществление электрической развязки дуговых печей и более спокойной нагрузки, ухудшение качества электро-

энергии на низкой стороне понизительных трансформаторов, питающих электросталеплавильные комплексы, в меньшей степени, но отражается в сети высокого напряжения.

Из-за технологических особенностей выплавки стали в дуговых печах они имеют низкий коэффициент мощности и при своей работе потребляют большую величину реактивной мощности из питающей сети. Протекание реактивной мощности приводит к повышенным потерям напряжения во всех элементах сети (линии электропередачи и силовые трансформаторы) до точки подключения ДСП, поэтому на первичной стороне печного трансформатора (ПТ) будут наблюдаться отрицательные отклонения напряжения. Известно, что активная мощность ДСП находится в нелинейной зависимости от напряжения на первичной стороне ПТ, поэтому при снижении уровня напряжения упадет мощность и производительность дуговой печи [4].

Для компенсации реактивной мощности и улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения мощных и сверхмощных ДСП устанавливают статические тиристорные компенсаторы. Данный тип компенсирующих устройств обладает достаточным быстродействием для компенсации резкопеременной реактивной нагрузки [5–8].

Управляемая часть СТК – тиристорно-реакторная группа (ТРГ) предназначена для потребления избыточной реактивной мощности, генерируемой фильтрокомпенсирующими цепями (ФКЦ), и имеет пофазное регулирование для симметрирования общих нагрузочных токов ДСП и ФКЦ. Фильтрокомпенсирующие цепи также предназначены для фильтрации высших гармонических составляющих токов нагрузки ДСП и ТРГ. Система управления СТК обычно предусматривает два режима управления реактивной мощностью компенсатора: 1) обеспечение нулевого потребления реактивной мощности из сети комплексом «ДСП-СТК» $Q_2 = 0$ МВАр; 2) поддержание номинального уровня напряжения в точке общего подключения ДСП и СТК $U_2 = \text{const}$ [9, 10]. Первый режим управления целесообразно применять при стабильном напряжении на первичной стороне сетевого трансформатора из соображения минимизации потерь активной мощности в элементах сети за счет полной компенсации реактивной составляющей нагрузки комплекса «ДСП-СТК».

Напряжение во внешней районной сети не имеет постоянной величины и зависит от многих факторов: 1) баланса реактивной мощности в системе в зависимости от состава генерирующего оборудования, от изменения нагрузки, например, утренний и вечерний максимумы, ночной и дневной минимумы для городских потребителей; 2) от конфигурации сети из-за отключения и включения

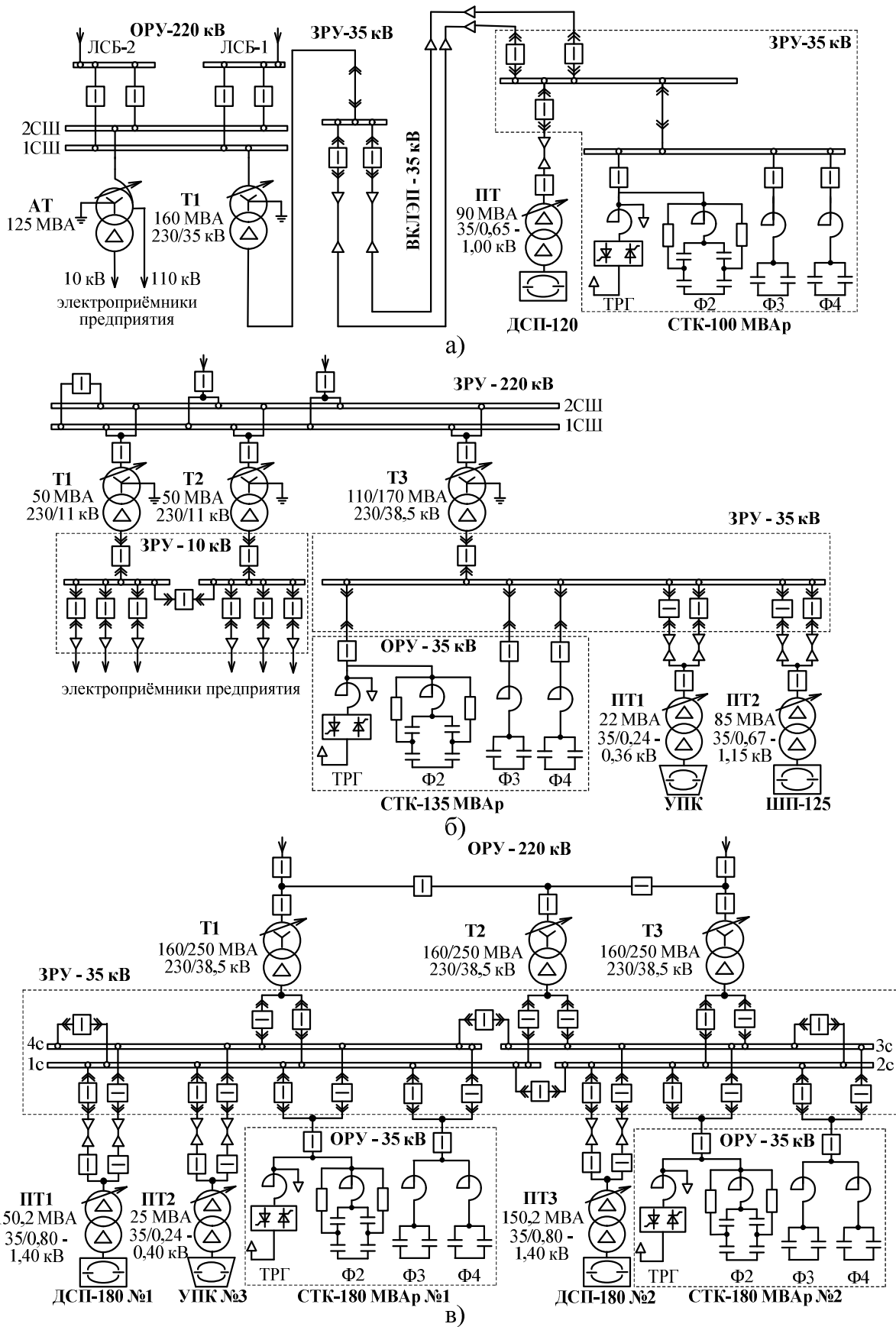


Рис. 1. Упрощенные схемы электроснабжения электросталеплавильных комплексов предприятий:
 а – ПАО «АМЗ», г. Аша; б – АО «ССЗБ», г. Балаково; в – ПАО «ММК», г. Магнитогорск

Основные параметры исследуемых электросталеплавильных комплексов

| | ПАО «АМЗ», г. Аша | АО «ССЗБ», г. Балаково | | ПАО «ММК», г. Магнитогорск | |
|---|---|---------------------------|------------|-------------------------------|------------|
| Однолинейная схема | Рис. 1, а | Рис. 1, б | | Рис. 1, в | |
| Электросталеплавильный агрегат | ДСП-120 | ШП-125 | УПК | ДСП-180 | УПК |
| Масса стали на выпуске, т | 120 | 125 | 125 | 180 | 180 |
| Мощность печного трансформатора (ПТ), МВА | 90 | 85 | 22 | 150 | 25 |
| Диапазон регулирования вторичного напряжения ПТ, кВ | 0,65–1,00 | 0,67–1,15 | 0,24–0,36 | 0,80–1,40 | 0,24–0,40 |
| Уровень напряжения сети в точке общего подключения ДСП (ШП), УПКи СТК, кВ | 35 | | | | |
| Компенсирующее устройство (КУ) | СТК-100 | СТК-135 | | СТК-180 | |
| Мощность КУ и ТРГ, МВАр | 100 | 135 | | 180 | |
| Мощность фильтра второй гармоники (Ф2), МВАр | 25 | 25 | | 44,62 | |
| Мощность Ф3, МВАр | 35 | 58,8 | | 66,70 | |
| Мощность Ф4, МВАр | 40 | 52,2 | | 68,68 | |
| Режим управления КУ | Поддержание нулевой реактивной мощности электросталеплавильного комплекса | | | | |
| Параметры системы электроснабжения | | | | | |
| Мощность сетевого трансформатора (Т), МВА | 160 | 110/170 | | 160/250 | |
| Регулирование вторичного напряжения Т | Устройство регулирования под нагрузкой (РПН) напряжения трансформатора | | | | |
| Автоматика АРНТ | Установлена | | | Не предусмотрена | |
| Управление РПН Т | Ручное | | | Не производится | |
| Уровень напряжения сети на первичной стороне Т, кВ | 220 кВ | | | | |
| Мощность короткого замыкания на первичной стороне Т, МВА | 3346–6015 | 3269–7564 | | 6000–7080 | |

линий, трансформаторов и компенсирующих устройств и др. На рис. 2 представлены суточные графики изменения напряжения в сети 220 кВ – первичная сторона сетевого трансформатора (U_1) и 35 кВ – шины электросталеплавильного комплекса (U_2) на трех рассматриваемых предприятиях. Как можно видеть по рис. 2, а, на Ашинском металлургическом заводе разница между максимальным уровнем напряжения в питающей сети (U_1) и минимальным за первые сутки составляет $\Delta U_{1,1} = 10,6$ кВ, а за вторые $\Delta U_{1,2} = 9,7$ кВ. Напряжение в сети 220 кВ на двух других предприятиях АО «ССЗБ» (рис. 2, б) и ПАО «ММК» (рис. 2, в) за одни сутки изменяется не так сильно, по сравнению с ПАО «АМЗ», однако здесь наблюдаются значительные отклонения уровня напряжения на более длительном промежутке времени. Поэтому для наглядности на рис. 2 были совмещены суточные графики напряжений за два произвольных дня. В первый день средний уровень напряжения на АО «ССЗБ» составил $U_{1cp,1} = 233,5$ кВ,

а в другой $U_{1cp,2} = 237$ кВ, разница между средними уровнями $\Delta U_{1cp} = 3,5$ кВ, а между максимальными и минимальными значениями в первый день $\Delta U_{1,1} = 3,5$ кВ и во второй $\Delta U_{1,2} = 3,4$ кВ. Наибольший максимум напряжения за два дня $U_{1max,2} = 239,3$ кВ, наименьший минимум $U_{1min,1} = 233,5$ кВ, наибольшая разница составляет $\Delta U_{1наиб} = 5,8$ кВ. На ПАО «ММК» в рассматриваемые дни среднесуточные уровни напряжения соответственно равны $U_{1cp,1} = 227,5$ кВ и $U_{1cp,2} = 232$ кВ, разница $\Delta U_{1cp} = 4,5$ кВ, величины ΔU_1 составляют 6,2 кВ и 5,2 кВ. Разница между наибольшим максимумом $U_{1max,2} = 234,9$ кВ и наименьшим минимумом $U_{1min,1} = 223,9$ кВ равна $\Delta U_{1наиб} = 11$ кВ.

Все изменения напряжения в питающей сети трансформируются на низкую сторону сетевого трансформатора, что приводит к отклонению

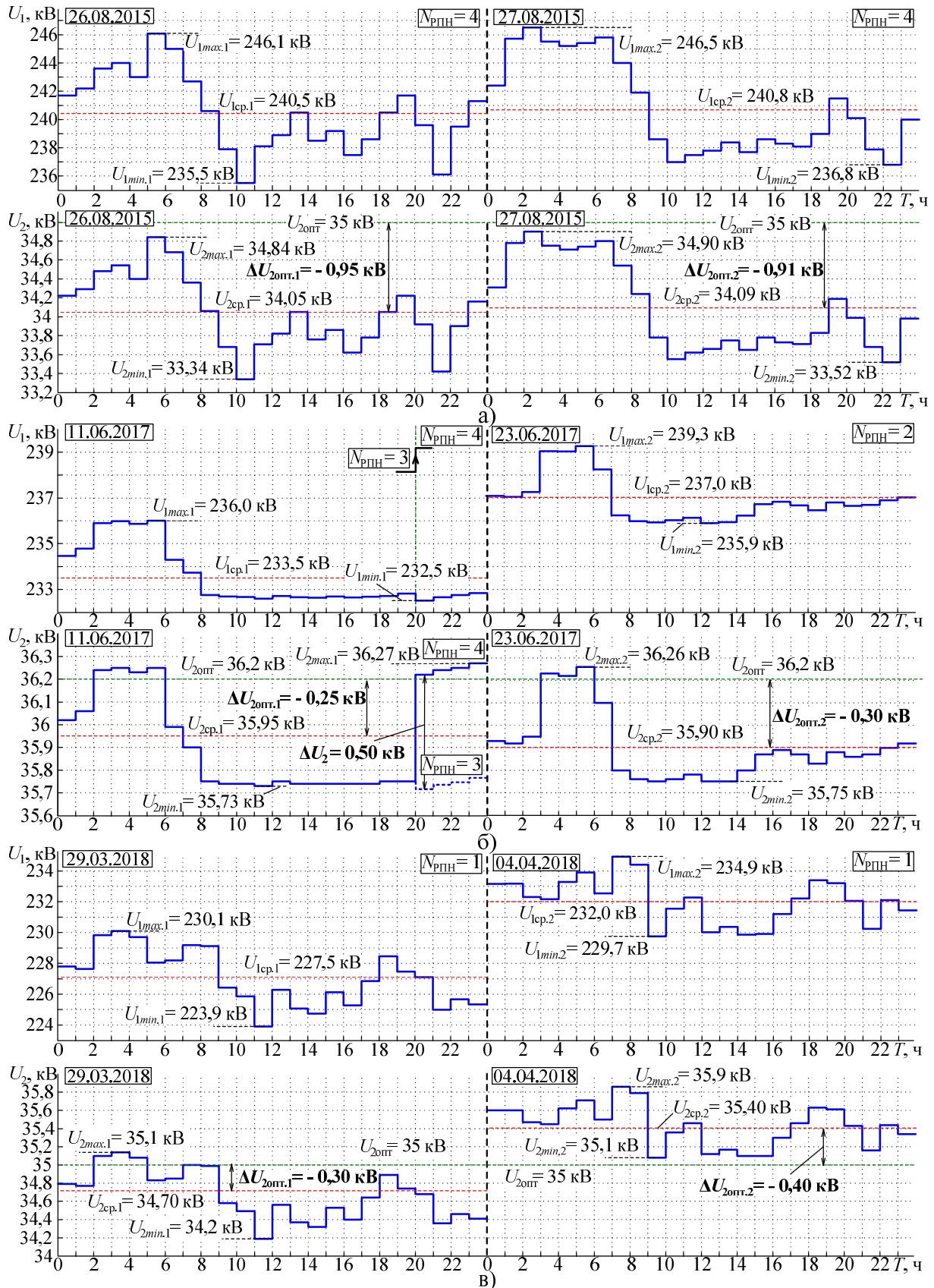


Рис. 2. Графики изменения напряжений на первичной и вторичной стороне сетевых трансформаторов за два произвольных дня: а – ПАО «АМЗ», г. Аша; б – АО «СЗБ», г. Балаково; в – ПАО «ММК», г. Магнитогорск

напряжения на шинах сталеплавильного комплекса относительно некоторого согласованного уровня. На ПАО «АМЗ» и ПАО «ММК» в качестве согласованного принят уровень напряжения $U_{2\text{опт}} = 35$ кВ, на АО «ССЗБ» $U_{2\text{опт}} = 36,2$ кВ. Для системы управления перемещением электродов дуговых печей данный уровень напряжения является оптимальным, так как его используют при определении профилей плавки, расчете уставок задания на регулирование в САУ перемещением электродов, проведении всех прогнозных технических и экономических расчетов [11, 12].

На графиках $U_2 = f(t)$ (см. рис. 2) показаны отклонения среднесуточных величин напряжения от оптимальных значений. На Ашинском заводе в рассматриваемые дни среднесуточные напряжения ниже оптимальных на $\Delta U_{2\text{опт.1}} = -0,95$ кВ и $\Delta U_{2\text{опт.2}} = -0,91$ кВ, на АО «ССЗБ» на $\Delta U_{2\text{опт.1}} = -0,25$ кВ и $\Delta U_{2\text{опт.2}} = -0,3$ кВ. Среднесуточная величина напряжения на шинах комплекса «ДСП-180-СТК» (ПАО «ММК») в первый день ниже оптимального на $\Delta U_{2\text{опт.1}} = -0,3$ кВ, во второй, наоборот, выше на $\Delta U_{2\text{опт.2}} = 0,4$ кВ. Отрицательное отклонение напряжения приводит к снижению активной мощности и, как следствие, падению производительности дуговых печей. При значительном повышении напряжения на первичной стороне печного трансформатора возможно возникновение режима, когда при заданных уставках на регулирование в САУ перемещением электродов ДСП, рассчитанных для $U_{2\text{опт}}$, происходит увеличение токов дуг выше номинального для конкретной ступени РПН ПТ. В этом случае вспомогательные блоки САУ перемещением электродов ДСП с целью исключения длительной перегрузки ПТ периодически формируют сигнал управления на подъем электродов, вследствие чего возникает неустойчивый режим горения дуг, сопровождающийся принудительными обрывами, что негативным образом влияет на энергетические и временные показатели работы ДСП [13].

Для поддержания напряжения на шинах электросталеплавильного комплекса на согласованном уровне сетевые трансформаторы снабжены устройством регулирования напряжения под нагрузкой. Регулирование вторичного напряжения трансформатора осуществляется за счет изменения его коэффициента трансформации путем переключения ответвлений первичной обмотки. С целью оптимизации процесса переключения ступеней РПН сетевого трансформатора устанавливают устройства автоматического регулирования напряжения трансформатора. Автоматика АРНТ по встроенным алгоритмам, опираясь на значения первичных и вторичных напряжений и токов трансформатора, коэффициентов мощности и других параметров, определяет номер ступени РПН и с задан-

ной выдержкой времени посылает сигнал управления для перехода РПН с одного положения на другое [14, 15]. Поддержание вторичного напряжения с помощью РПН осуществляется с некоторым шагом, значение которого зависит от диапазона регулирования напряжения и количества ступеней. Поэтому на вторичной стороне трансформатора при изменении напряжения в питающей сети в рамках одной ступени РПН будут иметь место отклонения напряжения относительно согласованного уровня.

В дополнение к работе автоматики АРНТ для достижения более точного поддержания согласованного напряжения на шинах электросталеплавильного комплекса СТК можно перевести в режим стабилизации напряжения $U_2 = \text{const}$. В этом случае СТК в каждый момент времени автоматически подбирает такую величину суммарной реактивной мощности комплекса «ДСП-СТК», при которой достигается неизменный уровень напряжения. Регулирующая способность СТК в данном режиме ограничивается мощностью его реактивных элементов и требованием к соблюдению нормативного коэффициента реактивной мощности ($\text{tg } \varphi_{\text{норм}}$) на границе балансовой принадлежности предприятия и электроснабжающей организации [16]. При значительных отклонениях в положительную сторону в технологические паузы дуговой печи ТРГ будет работать с перегрузкой, а при отрицательных отклонениях напряжения мощности ФКЦ может оказаться недостаточно для поддержания согласованного уровня напряжения. Возникновение описанных выше крайних режимов работы СТК в случае изменения уровня напряжения в сети в границах рабочего диапазона одной ступени РПН или при условии грамотного управления устройством РПН маловероятно. Однако из-за сложности управления электрическими режимами комплекса «ДСП-СТК» при работе компенсатора по напряжению, связанной с необходимостью осуществления постоянного контроля над величиной перетоков реактивной мощности, которые вызывают дополнительные потери активной мощности в элементах сети и нагружают их реактивными токами, практически на всех российских и зарубежных предприятиях СТК функционируют по алгоритму $Q_\Sigma = 0$ МВАр [17, 18].

В настоящее время на ПАО «АМЗ» и АО «ССЗБ» автоматика АРНТ выведена из работы и изменение ступени РПН выполняется вручную по местным инструкциям. Данная мера была принята с целью предотвращения частых переключений РПН и быстрого расхода его ресурса. На рис. 2, б показан момент переключения ступени РПН сетевого трансформатора с третьего в четвертое положение, что позволило повысить напряжение в сети 35 кВ на $\Delta U_2 = 0,5$ кВ и поднять его уровень до оптимального значения $U_{2\text{опт}} = 36,2$ кВ. Однако

по графику $U_2 = f(t)$ рис. 2, б также можно увидеть, что ручное управление РПН менее эффективно по сравнению с автоматическим, так как напряжение было сильно понижено в течение 12 ч до момента перехода на ступень РПН с меньшим коэффициентом трансформации. На ПГВ ПАО «ММК» автоматика АРНТ вовсе отсутствует, трансформаторы работают с одним положением РПН уже продолжительное время, несмотря на достаточно большие отклонения напряжения в питающей сети (рис. 2, в), так как в соответствии с правилами предприятия для выполнения даже ручного переключения необходимо решить множество организационных и технических задач. Следует отметить, что даже при включенной автоматике АРНТ возможно возникновение неблагоприятных режимов для дуговых печей и СТК, так как ее алгоритмы не учитывают особенностей работы электросталеплавильных комплексов. Без проведения дополнительных исследований действие автоматики АРНТ является сложнопрогнозируемым, например, в периоды понижения и повышения уровня напряжения в сети 35 кВ, наблюдаемого при работе ДСП под током и в ее технологические паузы, при условии, что первичное и вторичное напряжения сетевого трансформатора в этот момент равны пороговым значениям рабочих диапазонов двух соседних ступеней РПН или в случае управления СТК по напряжению, когда вторичное напряжение трансформатора зависит не только от его значения на первичной стороне.

Таким образом, на основании вышесказанного можно сделать заключение, что разработка алгоритма переключения РПН, учитывающего особенности работы дуговых печей и СТК, который будет ориентирован на улучшение электрических характеристик ДСП и минимизацию потерь электроэнергии с соблюдением всех ограничений, связанных с номинальными параметрами оборудования, с электрическими режимами комплекса «ДСП-СТК» и питающей сети, является актуальной задачей.

Разработка усовершенствованной системы управления СТК с функцией определения ступени РПН сетевого трансформатора

В настоящее время известны исследования, в которых предлагаются различные способы скоординированной работы автоматики АРНТ с режимами СТК в электрических сетях [19, 20], направленные на обеспечение условий для функционирования ТРГ в регулировочном диапазоне без перегрузки или полного запираания тиристором. Однако данные алгоритмы согласования АРНТ и СТК не учитывают режимов работы нагрузки, поэтому их применение в данном случае будет неэффективным.

С целью улучшения электрических характеристик дуговых печей за счет рационального управления устройством РПН сетевого трансфор-

матора проведено усовершенствование системы управления СТК путем добавления в нее блока определения номера ступени РПН, который реализует согласованную работу АРНТ с режимами электросталеплавильного комплекса и питающей сети. Для пояснения принципа работы блока определения номера ступени РПН сетевого трансформатора на рис. 3 приведена упрощенная схема электротехнического комплекса «ДСП-СТК» без привязки к определенному объекту. Из классической системы управления СТК [21] на вход нового блока поступает сигнал с информацией о принятом режиме управления компенсатора ($Q_{\text{зад}}$ или $U_{\text{зад}}$), вторым входным сигналом является значение напряжения, измеренного на первичной стороне сетевого трансформатора (U_1). На основе этих сигналов блок по встроенным в него массивам рабочих диапазонов первичных напряжений (ΔU) и их пороговых значений (U_n) всех положений РПН определяет номер ступени, на которую необходимо выполнить переход. После этого блок отправляет сигнал в автоматику АРНТ с номером рекомендуемой ступени ($N_{\text{РПН}}$). В свою очередь АРНТ, работая с собственными настройками (время задержки переключения ответвлений, максимальный нагрузочный ток, при котором разрешается выполнение переключений, и др.), воздействует на устройство РПН и устанавливает ту ступень, которая была определена в разработанном блоке. Массивы значений ΔU и U_n определяются по результатам расчетов электрических режимов комплексов «ДСП-СТК», проведенных на их математических моделях в приложении Simulink математического пакета MATLAB. Расчеты выполняются индивидуально для всех объектов, так как параметры оборудования, принцип работы и настройки систем управления ДСП и СТК, верхняя граница допустимого уровня напряжения на шинах электросталеплавильного комплекса, требование к соблюдению $\text{tg } \varphi_{\text{норм}}$ и др. на каждом из них отличаются друг от друга.

Для выбора оптимальных ступеней РПН на математической модели определяются электрические параметры сталеплавильного комплекса в двух крайних режимах работы ДСП: 1) дуговая печь (и установка печь-ковш при ее наличии) отключена (технологическая пауза); 2) дуговая печь (и УПК) работает с максимальной нагрузкой в наиболее продолжительную стадию. При управлении СТК по реактивной мощности ($Q_2 = 0$ МВАр) преследуется цель уменьшения отрицательных отклонений напряжения на шинах электросталеплавильного комплекса относительно оптимального уровня. В периоды технологической паузы ДСП допустимая величина положительного отклонения напряжения при выборе положения РПН ограничивается значением максимально допустимого

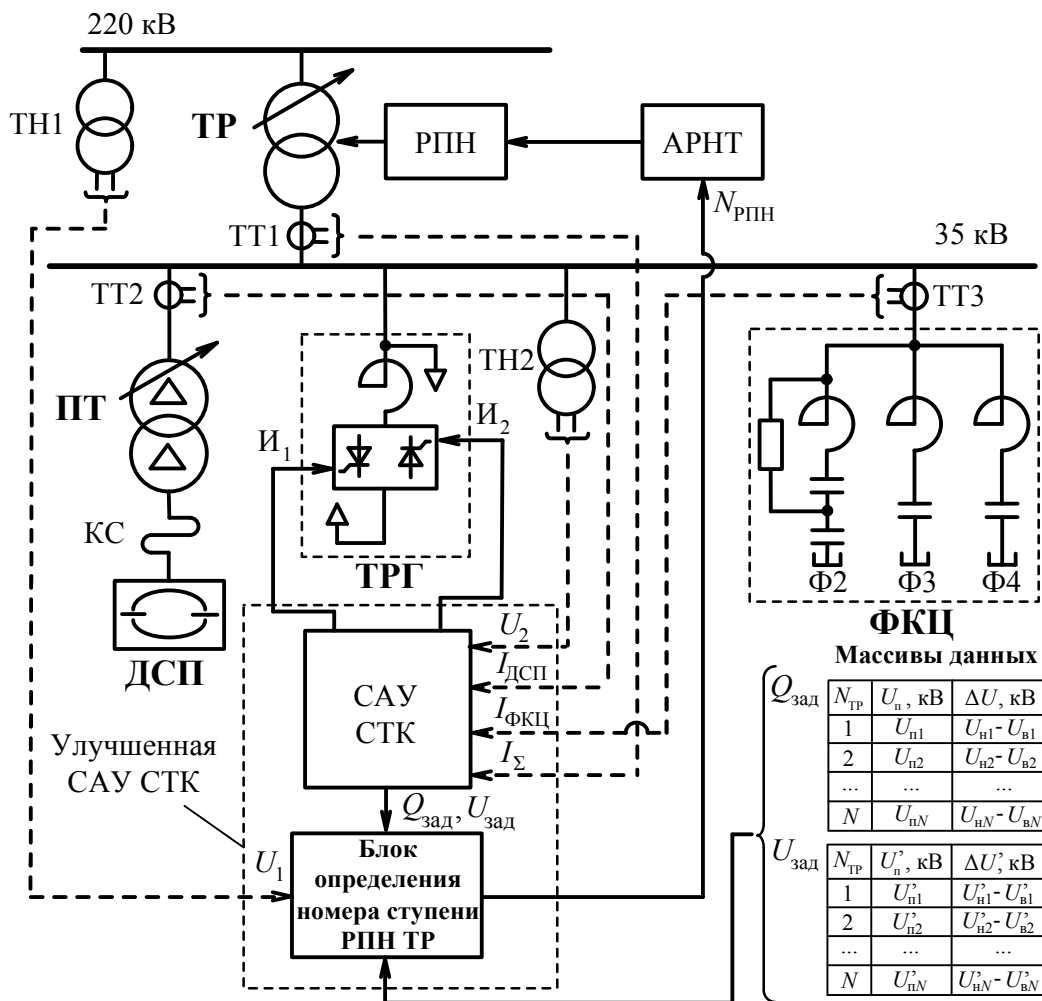


Рис. 3. Упрощенная схема электротехнического комплекса «ДСП-СТК», поясняющая принцип работы блока определения номера ступени РПН (ТР – сетевой трансформатор; ТН – трансформатор напряжения; ТТ – трансформатор тока; КС – короткая сеть; I_1, I_2 – отпирающие импульсы; $I_{ДСП}$ – ток ДСП; $I_{ФКЦ}$ – суммарный ток ФКЦ; I_{Σ} – суммарный ток ДСП и СТК)

уровня напряжения в сети 35 кВ, например, на Ашинском металлургическом заводе максимально допустимый уровень принят равным $U_{2доп} = 35,2$ кВ.

В процессе определения ступеней РПН при работе СТК в режиме стабилизации напряжения основной задачей является минимизация перетоков реактивной мощности в сети. Отбираются те режимы работы комплекса «ДСП-СТК», в которых ТРГ работает в регулировочном диапазоне без перегрузки или полного закрытия тиристоров, а коэффициент реактивной мощности в контролируемой точке не превышает нормативного значения $\text{tg } \varphi_{норм}$. Расчет электрических режимов комплекса «ДСП-СТК» проводится для всех профилей плавки дуговой печи, изменяя напряжение питающей сети с определенным шагом. После из всех расчетных данных по приведенным выше критериям отбираются наиболее предпочтительные режимы и формируются два массива с рабо-

чими диапазонами первичных напряжений сетевого трансформатора (ΔU) и их пороговыми значениями (U_n) для двух алгоритмов управления СТК ($Q_{\Sigma} = 0$ МВАр и $U_2 = \text{const}$), которые записываются в блок определения номера ступени РПН [22].

Оценка эффективности нового алгоритма переключения ступени РПН сетевого трансформатора в системе электроснабжения электротехнического комплекса «ДСП-СТК»

Для всех исследуемых объектов определен технический эффект по улучшению электрических характеристик дуговых печей за счет переключения ответвления РПН сетевого трансформатора из исходного в рекомендуемое положение, которое рассчитано в блоке определения номера ступени РПН усовершенствованной САУ СТК. Расчеты проводились на математических моделях трех комплексов «ДСП-120-СТК», «ДСП-180-УПК-СТК»,

«ШП-125-УПК-СТК», разработанных в приложении Simulink математического пакета MATLAB. На рассматриваемых предприятиях СТК работает по алгоритму $Q_{\Sigma} = 0$ МВАр (см. табл. 1), поэтому для объективного сравнения электрических режимов комплекса «ДСП-СТК», полученных с разными положениями РПН сетевого трансформатора, в математических моделях компенсатор функционировал также по данному алгоритму. В табл. 2 представлены основные результаты анализа режимов работы комплекса «ДСП-СТК» и определения технического эффекта от предложенного алгоритма управления устройством РПН. Сравнение проводилось при двух ступенях сетевого трансформатора, выбранных по исходному и усовершенствованному алгоритмам переключения РПН. Исходным является алгоритм переключения РПН, который применяется на исследуемых комплексах в настоящее время, его основные принципы были рассмотрены выше. Усовершенствованный алгоритм управления РПН реализуется с помощью блока определения ступени РПН сетевого трансформатора в улучшенной САУ СТК. Значения активной мощности дуг ДСП ($P_{д.ср}$) и напряжения на шинах электросталеплавильного комплекса ($U_{2.ср}$) усреднены за один цикл плавки, продолжительность которой также приведена в табл. 2 ($t_{пл}$). Положительный эффект от перехода в рекомендованное положение РПН в нашем случае заключается в уменьшении отрицательного отклонения напряжения на шинах электросталеплавильного комплекса и приближении его уровня к оптимальному значению. За счет этого повышается мощность ДСП, снижается время цикла плавки, и как

следствие, повышается производительность дуговой печи. На ПАО «АМЗ» в период записи экспериментальных данных РПН было установлено в четвертое положение $N_{РПН} = 4$. Анализ осциллограмм напряжения, записанных на шинах комплекса «ДСП-120-СТК», показал, что уровень U_2 сильно понижен, его значение, усредненное за один цикл плавки, составляет 34,36 кВ. По новому алгоритму с использованием блока определения номера ступени РПН усовершенствованной САУ СТК рассчитано оптимальное положение для рассматриваемой плавки $N_{РПН} = 5$. Напряжение U_2 повысилось на 0,47 кВ (+1,39 %) и стало равным 34,83 кВ. При переключении на $N_{РПН} = 6$ средний уровень напряжения составил бы $U_{2.ср} = 35,3$ кВ, это позволило бы еще в большей степени улучшить электрические режимы работы ДСП, однако, как было сказано выше, напряжение на шинах ЗРУ-35 кВ электросталеплавильного цеха на ПАО «АМЗ» не должно превышать 35,2 кВ. Отрицательное отклонение напряжения в сети 35 кВ относительно оптимального значения уменьшилось с $\Delta U_{2.опт} = -0,64$ кВ до $\Delta U_{2.опт} = -0,17$ кВ. Во втором опыте расчеты проводились на математической модели электросталеплавильного комплекса и питающей сети АО «ССЗБ» с двумя положениями РПН сетевого трансформатора ТЗ (см. рис. 1, б): вторым $N_{РПН} = 2$ (исходным) и третьим $N_{РПН} = 3$, полученным с помощью блока определения номера ступени РПН. Согласованный уровень напряжения на данном объекте равен 36,2 кВ. С исходным положением РПН среднее напряжение на шинах комплекса «ШП-125-УПК-СТК» равно $U_{2.ср} = 35,76$ кВ,

Таблица 2

Результаты оценки технического эффекта от применения нового алгоритма управления РПН сетевого трансформатора

| Алгоритм переключения РПН | $N_{РПН}$ | $U_{2.опт}$, кВ | $U_{2.ср}$, кВ | $P_{д.ср}$, МВт | $t_{пл}$, с | $\Delta U_{2.опт}$, кВ | $\Delta U_{2.ср}$, кВ | $\Delta P_{д.ср}$, МВт | $\Delta t_{пл}$, с |
|--|-----------|------------------|-----------------|------------------|--------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|
| ПАО «Ашинский метзавод» ДСП-120 (г. Аша) | | | | | | | | | |
| Исходный | 4 | 35,00 | 34,36 | 60,82 | 3682 | -0,64 -1,83 % | 0,47 +1,37 % | 1,97 +3,24 % | 105 -2,85 % |
| Усовершенствованный | 5 | | 34,83 | 62,79 | 3577 | -0,17 -0,49 % | | | |
| АО «Северсталь – сортовой завод Балаково» ШП-125 (г. Балаково) | | | | | | | | | |
| Исходный | 2 | 36,20 | 35,76 | 58,17 | 3230 | -0,44 -1,22 % | 0,49 +1,37 % | 1,87 +3,21 % | -75 -2,32 % |
| Усовершенствованный | 3 | | 36,25 | 60,04 | 3155 | +0,05 +0,14 % | | | |
| ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» ДСП-180 (г. Магнитогорск) | | | | | | | | | |
| Исходный | 1 | 35,00 | 34,25 | 79,00 | 3190 | -0,75 -2,14 % | 0,77 +2,25 % | 3,10 +3,92 % | 110 -3,45 % |
| Усовершенствованный | 3 | | 35,02 | 82,10 | 3080 | 0,02 +0,06 % | | | |

что ниже оптимального уровня на $\Delta U_{2\text{ опт}} = -0,44$ кВ. В результате установки РПН в третье положение в период анализируемой плавки напряжение U_2 повысилось до 36,25 кВ.

Наибольший эффект получен при расчете режимов комплекса «ДСП-180-СТК» (ПАО «ММК»). Как было сказано ранее, что на данном объекте не производят переключений ступени РПН. Устройство РПН уже несколько лет установлено в первом положении. В анализируемый период времени напряжение на первичной стороне сетевого трансформатора имело такие значения, что для повышения U_2 до согласованного уровня необходимо перейти на две ступени вверх и установить РПН в третье положение $N_{\text{РПН}} = 3$. Напряжение на шинах комплекса «ДСП-180-СТК» повысилось на 0,77 кВ (+2,25 %) с 34,25 кВ до 35,02 кВ. Отклонение напряжения с исходным положением РПН равно $\Delta U_{2\text{ опт}} = -0,75$ кВ. После перехода на рекомендуемую ступень $N_{\text{РПН}} = 3$ средний уровень напряжения на вторичной стороне сетевого трансформатора стал равен оптимальному. Во всех опытах из-за повышения напряжения на шинах комплекса «ДСП-СТК» произошло увеличение средней мощности дуговой печи на 3,2–3,9 %. Рост активной мощности ДСП привел к сокращению времени цикла плавки на 2,3–3,5 %.

Заключение

1. Величина напряжения в районной энергетической системе зависит от многих факторов и часто изменяется в широких пределах. Диапазон отклонения данного напряжения обычно превышает границы первичных напряжений одной ступени РПН понизительного трансформатора. С целью поддержания напряжения на шинах электротехнического комплекса «ДСП-СТК» на согласованном уровне необходимо обеспечить грамотное управление устройством РПН сетевого трансформатора.

2. Сетевые трансформаторы, оборудованные устройством РПН, обычно поставляются вместе с автоматикой АРНТ. В настоящее время на исследуемых объектах АРНТ выведена из работы или вовсе отсутствует, управление устройством РПН производится вручную, а определение необходимого положения последнего осуществляется без каких-либо методик, ориентируясь на величину вторичного напряжения трансформатора. Ввод автоматике АРНТ в эксплуатацию не гарантирует эффективного управления устройством РПН в системе электроснабжения электросталеплавильного комплекса, так как ее стандартные алгоритмы функционирования не учитывают особенностей работы дугowych печей и компенсирующих устройств.

3. С целью реализации согласованного управления устройством РПН сетевого трансформатора с режимами комплекса «ДСП-СТК» проведено усовершенствование САУ СТК за счет дополнения ее блоком определения номера ступени РПН. При составлении алгоритма работы улучшенной САУ СТК за критерии повышения эффективности процесса регулирования напряжения на вторичной стороне сетевого трансформатора были приняты: 1) при управлении СТК по реактивной мощности – снижение отклонений напряжения на шинах электросталеплавильного комплекса относительно оптимального уровня, значение которого определяется индивидуально для каждого объекта; 2) при регулировании СТК по напряжению – минимизация перетоков реактивной мощности и контроль над $\text{tg}\varphi$ на границе балансовой принадлежности предприятия и электроснабжающей организации.

4. Проведен анализ экспериментальных данных с трех отечественных металлургических предприятий, на основе которых разработаны математические модели комплексов «ДСП-СТК» и рассчитаны их электрические режимы работы. Показан технический эффект от применения нового алгоритма управления устройством РПН: напряжение на шинах электросталеплавильного комплекса повысилось в среднем на 1,4–2,3 %, мощность дуговой печи возросла на 3,2–3,9 %, время плавки сократилось на 2,3–3,5 %.

5. Одним из направлений дальнейшего развития идеи скоординированной работы автоматики АРНТ с ДСП и СТК является достижение оптимальных параметров режима для работы дугowych печей за счет коррекции уставок регулирования САУ компенсатора и дуговой печи в зависимости от напряжения питающей сети и выставленной ступени РПН сетевого трансформатора, номер которой определен по описанным в данной работе алгоритмам. Также важной задачей является определение периода усреднения анализируемого напряжения для одновременного достижения наибольшей эффективности от изменения положения РПН сетевого трансформатора и минимума количества переключений. Кроме этого, необходим выбор оптимального принципа управления устройством РПН: 1) ступенчатое, которое предусматривает предварительный анализ автоматикой АРНТ параметров нового установившегося режима после переключения на соседнюю ступень с целью определения необходимости дальнейшего управления устройством РПН для перехода в рекомендованное положение, или 2) прямое, когда РПН устанавливается на некоторое ответвление без анализа электрических характеристик сети в промежуточных положениях.

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

Литература

1. Power Quality Measurements in a Steel Industry with Electric Arc Furnaces / P.E. Issouribehere, J.C. Barbero, F. Issouribehere, A. Barbera // Proceedings of the Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. – Pittsburgh, PA (USA): IEEE, 2008. – P. 1–8. DOI: 10.1109/PES.2008.4596177
2. Вагин, Г.Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.А. Севостьянов. – М.: Издат. центр «Академия», 2010. – 244 с.
3. Means and Trends of Reactive Power Management at Large Ironworks / A.A. Nikolaev, G.P. Kornilov, A.Y. Kovalenko, E.A. Kuznetsov // Russian Electrical Engineering. – 2008. – Vol. 79, no 5. – P. 248–253. DOI: 10.3103/S1068371208050052
4. 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.
5. 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
6. Матинян, А.М. Сравнительный анализ подавления фликера статическим тиристорным компенсатором и активным фильтрокомпенсирующим устройством / А.М. Матинян, А.Н. Куселёв, А.В. Дроздов // Электричество. – 2014. – № 12. – С. 4–13.
7. Статические тиристорные компенсаторы для энергосистем и сетей электроснабжения / И.Н. Бортник, С.Ф. Буряк, М.В. Ольшеванг, И.П. Таратута // Электричество. – 1985. – № 2. – С. 13–19.
8. Xiao, H. Research of Power Quality Management Technology According to Distribution Network Involving Electric Arc Furnace / H. Xiao, C. Zhu, F. Liu // Proceedings of the 2012 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC). Nanchang, Jiangxi (China), 2012. – P. 7–10. DOI: 10.1109/IHMSC.2012.8
9. 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.
10. Usiki, K. Development of SVC Control for Suppressing Voltage Fluctuations / K. Usiki, F. Aoyama, M. Hanamatsu // Proceedings of the 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE). – Jeju (South Korea): IEEE, 2011. – P. 2073–2080. DOI: 10.1109/ICPE.2011.5944521
11. Парсункин, Б.Н. Автоматизация и оптимизация управления выплавкой стали в электродуговых печах: моногр. / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, О.С. Логунова. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – 304 с.
12. Свенчанский, А.Д. Автоматическое управление электротермическими установками / А.Д. Свенчанский. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.
13. Николаев, А.А. Повышение эффективности работы дуговых сталеплавильных печей и установок ковша-печь за счет применения усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами / А.А. Николаев. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. – 161 с.
14. Насыров, Р.Р. Система активно-адаптивного регулирования напряжения в распределительных электрических сетях 110–220/6–20 кВ / Р.Р. Насыров, В.Н. Тульский, И.И. Карташев // Электричество. – 2014. – № 12. – С. 13–18.
15. Перетягко, В.А. Проблемы регулирования напряжения / В.А. Перетягко // Вестник Черниговского государственного технического университета. Серия: технические науки. – 2011. – № 1 (47). – С. 142–151.
16. 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.
17. Morello, S. Installation, Startup and Performance of a Static Var Compensator for an Electric Arc Furnace Upgrade / S. Morello, T.J. Dionise, T.L. Mank // Proceedings of the Industry Applications Society Annual Meeting. – Addison, TX (USA): IEEE, 2015. – P. 1–9. DOI: 10.1109/IAS.2015.7356881
18. 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 (POWERENG). – Istanbul (Turkey), 2013. – P. 277–282. DOI: 10.1109/PowerEng.2013.6635619
19. Abdel-Rahman, M.H. New Static Var Compensator Control Strategy and Coordination with Under-Load Tap Changer / M.H. Abdel-Rahman, F.M.H. Youssef, A.A. Saber // IEEE Transaction on Power Delivery. – 2006. – Vol. 21, no. 3. – P. 1630–1635. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.858814
20. Coordination of an SVC with a ULTC Reserving Compensation Margin for Emergency Control / K.M. Son, K.S. Moon, S.K. Lee, J.K. Park // IEEE Transaction on Power Delivery. – 2000. – Vol. 15, no. 4. – P. 1193–1198. DOI: 10.1109/61.891502.
21. Николаев, А.А. Повышение эффективности работы электродуговых печей за счет при-

менения новых алгоритмов управления реактивной мощностью статических тиристорных компенсаторов / А.А. Николаев, В.В. Анохин, В.С. Ивекеев. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. – 229 с.

22. Патент № 175561 РФ, МПК51, H02J 3/12. Система управления статическим тиристорным компенсатором / А.А. Николаев, В.В. Анохин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». – № 2017116422; заявл. 11.05.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 35.

Николаев Александр Аркадьевич, канд. техн. наук, 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 16 сентября 2018 г.

DOI: 10.14529/power180308

CONTROLLING THE ON-LOAD TAP CHANGER CONTROL OF A STEP-DOWN TRANSFORMER TAKING INTO ACCOUNT THE OPERATING PARAMETERS OF THE ELECTRIC-ARC STEELMAKING FACILITY

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 main results of developing and researching a new principle for controlling the step-down transformer on-load tap changer (OLTC), which coordinates the OLTC operation with the electrical parameters of the electric-arc steelmaker, compensators installed in the high-power and ultrahigh-power EAF power supplies, and the mains. The proposed principle consists in pre-determining the operating voltage ranges on the mains-transformer primary side for all OLTC tap positions taking into account the existing of both the electric-arc steelmaking facility and the mains. The static VAR compensator (SVC) control system is improved by adding a block for finding the mains-transformer OLTC tap position number so as to use new position-switching algorithms. The problem of optimizing the OLTC tap-position switching in mains-transformers supplying power to electric-arc steelmaking facilities under significant mains-voltage deviations is analyzed on the basis of evidence from three Russian steelworks companies. We herein discuss the particularities selecting the mains-transformer OLTC positions in two SVC control modes, one consisting in keeping zero consumption of reactive power from the mains, and the other one consisting in maintaining a coordinate voltage in the common EAF and SVC connection point. The effect of the proposed solutions is found from the results obtained by means of mathematical modeling of electric-arc steelmaking facilities in MATLAB Simulink. We discuss the options for further improvement of principles for coordinating the operation of automatic transformer-voltage regulators (AVR) with the parameters of steelmakers, compensators, and mains.

Keywords: on-load tap changer, automatic voltage regulation of transformers, slow voltage deviation, electric arc furnace, electrical parameters of electric arc furnace, static var compensator, reactive power compensation.

References

1. Issouribehere P.E., Barbero J.C., Issouribehere F., Barbera A. Power Quality Measurements in a Steel Industry with Electric Arc Furnaces. Proceedings of the Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, PA (USA), IEEE, 2008, pp. 1–8. DOI: 10.1109/PES.2008.4596177.

2. Vagin G.A., Loskutov A.A., Sevostyanov A.A. *Elektromagnitnaya sovmestimost v elektroenergetike* [Electromagnetic Compatibility in Electric Power Industry]. Moscow, Academy Publ., 2010. 244 p.
3. Nikolaevy A.A., Kornilov G.P., Kovalenko A.Y., Kuznetsov E.A. Means and Trends of Reactive Power Management at Large Ironworks. *Russian Electrical Engineering*, 2008, vol. 79, no 5, pp. 248–253. DOI: 10.3103/S1068371208050052
4. Nikolayev A.A. *Povyshenie ehffektivnosti raboty ehlektrotekhnicheskogo kompleksa “dugovaya staleplavil'naya pech' – staticheskiy tiristornyy kompensator”* [Improving the Efficiency of an EAF-SVC Facility]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2017. 318 p.
5. 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
6. Matinyan A.M., Kiselyov A.N., Drozdov A.V. [Comparative Analysis of Flicker Suppression by a Static VAR Compensator and an Active Filtering Compensator]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2014, no. 12, pp. 4–13. (in Russ)
7. Bortnik I.N., Buryak S.F., Ol'shvang M.V., Taratuta I.P. [Static VAR Compensators for Power Systems and Mains]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1985, no. 2, pp. 13–19. (in Russ.)
8. Xiao H., Zhu C., Liu F. Research of Power Quality Management Technology According to Distribution Network Involving Electric Arc Furnace. Proceedings of the 2012 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC). Nanchang, Jiangxi (China), 2012, pp. 7–10. DOI: 10.1109/IHMSC.2012.8
9. Nenakhov A.I., Gamazin S.I., Mologin D.S. [Peculiarities of Creating SVC Control Systems]. *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont* [Electrical equipment: exploitation and repair], 2014, no. 1, pp. 36–42. (in Russ.)
10. Usiki K., Aoyama F., Hanamatsu M. Development of SVC Control for Suppressing Voltage Fluctuations. Proceedings of the 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE). Jeju (South Korea), IEEE, 2011, pp. 2073–2080. DOI: 10.1109/ICPE.2011.5944521
11. Parsunkin B.N., Andreyev S.M., Logunova O.S. *Avtomatizatsiya i optimizatsiya upravleniya vyplavkoy stali v elektrodugovykh pechakh* [Automation and Optimization of Steel-Melting Control in EAF]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2012. 304 p.
12. Svenchanskiy A.D. *Avtomaticheskoye upravleniye elektrotermicheskimi ustanovkami* [Automatic Control of Electrothermal Units]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 416 p.
13. Nikolayev A.A. *Povysheniye ehffektivnosti raboty dugovykh staleplavil'nykh pechey i ustanovok kovsh-pech' za schet primeneniya usovershenstvovannykh algoritmov upravleniya elektricheskimi rezhimami* [Improving the EAF and LAF Efficiency by Using Advanced Algorithms to Control Electrical Parameters]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2015. 161 p.
14. Nasyrov R.R., Tul'skiy V.N., Kartashev I.I. [Smart Voltage Control System for 110–220/6–20 kV Distribution Grids]. *Elektrichestvo* [Electricity], 2014, no. 12, pp. 13–18. (in Russ.)
15. Peretyatko V.A. [Problems of Voltage Regulation]. *Vestnik CHernigovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: tekhnicheskkiye nauki* [Journal of Chernihiv State Technological University], 2011, no. 1 (47), pp. 142–151. (in Russ.)
16. *O poryadke rascheta znacheniy sootnosheniya potrebleniya aktivnoy i reaktivnoy moshchnosti dlya otdelnykh energoprinimayushchikh ustroystv (grupp energoprinimayushchikh ustroystv) potrebiteley elektricheskoy energii* [Procedure for Calculating the Active and Reactive Power Consumption Ratio Values for Individual Power Receivers (Groups of Power Units) of Electricity Consumers], Order of the Ministry of Industrial Energy of the Russian Federation dd 23 June, 2015 No.380, Registered with the Russian Ministry of Justice on July 22, 2015 under No. 38151. (in Russ.)
17. Morello S., Dionise T.J., Mank T.L. Installation, Startup and Performance of a Static Var Compensator for an Electric Arc Furnace Upgrade. Proceedings of the Industry Applications Society Annual Meeting. Addison, TX (USA): IEEE, 2015, pp. 1–9. DOI: 10.1109/IAS.2015.7356881
18. 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 (POWERENG). Istanbul (Turkey), 2013, pp. 277–282. DOI: 10.1109/PowerEng. 2013.6635619
19. Abdel-Rahman M.H., Youssef F.M.H., Saber A.A. New Static Var Compensator Control Strategy and Coordination with Under-Load Tap Changer. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 2006, vol. 21, no. 3, pp. 1630–1635. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.858814
20. Son K.M., Moon K.S., Lee S.K., Park J.K. Coordination of an SVC with a ULTC Reserving Compensation Margin for Emergency Control. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 2000, vol. 15, no. 4, pp. 1193–1198. DOI: 10.1109/61.891502

21. Nikolayev A.A., Anokhin V.V., Ivekeyev V.S. *Povysheniye effektivnosti raboty elektrodugovykh pechey za schet primeneniya novykh algoritmov upravleniya reaktivnoy moshchnost'yu staticheskikh tiristornykh kompensatorov* [Improving the Efficiency of Electric Arc Furnaces by Using Novel Static VAR Compensator Reactive Power Control Algorithms]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2018. 229 p.

22. Nikolayev A.A., Anokhin V.V. *Sistema upravleniya staticheskim tiristornym kompensatorom* [Static VAR Compensator Control System]. Patent RF, no. 175561, 2017.

Received 16 September 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Николаев, А.А. Управление устройством РПН сетевого трансформатора с учетом режимов работы электросталеплавильного комплекса / А.А. Николаев, В.В. Анохин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 61–74. DOI: 10.14529/power180308

FOR CITATION

Nikolaev A.A., Anokhin V.V. Controlling the On-Load tap Changer Control of a Step-Down Transformer Taking into Account the Operating Parameters of the Electric-Arc Steelmaking Facility. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 61–74. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180308