

Николаев А.А., Ивекеев В.С., Ложкин И.А.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ РЕЗЕРВОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СТАТИЧЕСКИХ ТИРИСТОРНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ

В рамках данной работы разработана методика оценки резервов реактивной мощности статических тиристорных компенсаторов (СТК) промышленных предприятий для компенсации внешних провалов напряжения, позволяющая на основе имеющихся исходных данных о системе электроснабжения (СЭС) и параметрах электрических нагрузок электроприемников определить среднестатистическую величину компенсируемого провала напряжения. При выполнении исследований в качестве исходной информации были использованы экспериментальные данные о провалах напряжения на действующем металлургическом предприятии ЗАО «ММК Metalurji», г. Искендерун, Турция. Так, на примере данного предприятия было исследовано негативное влияние провалов напряжения на надежность работы чувствительных электроприемников, таких как преобразователи частоты (ПЧ) с активными выпрямителями (АВ) и предложена методика их компенсации за счет использования резервов мощных СТК дуговых сталеплавильных печей (ДСП). Полученные результаты позволили ввести понятие коэффициента демпфирования, который определяется как среднее относительное отклонение между требуемой реактивной мощностью при однофазном и трехфазном провалах напряжения. Проведенный математический анализ зависимости требуемой реактивной мощности СТК от величины провалов напряжения позволил разработать новый подход в проектировании внутрицеховых систем электроснабжения. Полученные результаты исследований имеют большую практическую значимость для действующих компактных металлургических предприятий, включающих в себя электросталеплавильное и прокатное производство.

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, статический тиристорный компенсатор, провалы напряжения, компенсация реактивной мощности, качество электроэнергии.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач электроснабжения промышленных предприятий является обеспечение качества электроэнергии, отвечающего нормам ГОСТ 32144-2013 [1]. Несоответствие того или иного показателя качества допустимому значению влечет за собой выход из строя электрооборудования, увеличение потерь активной мощности, нарушение нормального технологического процесса, что приводит, в свою очередь, к значительному материальному ущербу. В частности, провалы напряжения, возникающие в энергосистеме металлургических предприятий, являются причиной аварийных остановок приводов листовых и сортовых прокатных станов, а также вспомогательных агрегатов непрерывной обработки полосы, которые чувствительны к изменению уровня напряжения в питающей сети [2]. С целью детальной проработки данной проблемы был проведен анализ влияния провалов напряжения на работу листового стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji» (г. Искендерун, Турция), где главные электроприводы клетей построены на базе многоуровневых преобразователей частоты с активными выпрямителями. В ходе исследований было выявлено, что провалы напряжения по одной фазе глубиной 30% и длительностью 200 мс могут привести к отключению ПЧ из-за снижения напряжения в звене постоянного тока, а также из-за увеличения токов, потребляемых АВ из питающей сети [3].

В настоящее время большинство электроприводов прокатных станов выполнены на базе мощных высоковольтных синхронных (асинхронных) двигателей и преобразователей частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ). Имеющиеся на данный момент системы

управления преобразователей не адаптированы к несимметричным провалам напряжения, возникающим во внешней питающей сети. В выполненных ранее исследованиях были предложены мероприятия по компенсации провалов напряжения за счет использования резервов статических тиристорных компенсаторов, функционирующих в системах электроснабжения дуговых сталеплавильных печей, при условии параллельной работы электросталеплавильного комплекса и преобразователей частоты с активными выпрямителями прокатного стана. Также в предыдущих работах проводились исследования возможности параллельной работы ПЧ-АВ в условиях колебаний частоты, создаваемых ДСП [4]. Как показывает практика, заводом-изготовителем поставляются СТК с завышенным значением установленной реактивной мощности, что, в свою очередь, позволяет использовать их как средство компенсации провалов напряжения и поддержания номинального уровня напряжения во внутризаводской сети путем внесения изменений в алгоритмы системы управления СТК [5].

В данной статье приводится разработка общей методики оценки использования резервов реактивной мощности СТК промышленных предприятий для компенсации провалов напряжения на примере металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji».

Основные сведения о системе электроснабжения металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji»

Как известно, протекание переменного тока по ЛЭП сопровождается возникновением индуктивного сопротивления, которое обуславливает разность напряжений в начале и конце линий. Для определения потерь напряжения в ЛЭП рассмотрим однолинейную схему электроснабжения промышленного предприятия ЗАО «ММК Metalurji» (рис. 1).



Особенностью электроснабжения данного предприятия являются частые провалы напряжения, возникающие во внешней питающей сети. Данная проблема оказывает существенное влияние на бесперебойную работу электроприёмников прокатных станов и других агрегатов непрерывного действия. Стоит отметить, что возникновение провалов напряжения носит сезонный характер, поэтому для выявления основных причин отказов электрооборудования в предыдущих работах был проведен анализ зависимости провалов напряжения от возникающих грозовых разрядов. В качестве исходных данных для анализа были использованы сведения о провалах напряжения, зафиксированные на шинах РУ-380 и 34,5 кВ ГПП, а также на цеховых распределительных пунктах (РП) прокатного стана 1750

ЗАО «ММК Metalurji» за несколько лет, по которым были восстановлены реальные осциллограммы мгновенных значений фазных напряжений на секциях 380 и 34,5 кВ. Также была получена информация о погодных условиях за аналогичный период времени. Результаты проведенных исследований показали, что возникновение аварийных ситуаций, связанных с перебоями в электроснабжении, в 50% случаев возникали по причине атмосферных осадков, сопровождающихся грозовыми разрядами [6].

При разработке мероприятий по компенсации провалов напряжения на шинах 34,5 кВ необходимо учитывать тот факт, что обмотки сетевых трансформаторов, установленных на ГПП завода имеют схему соединения «звезда-треугольник». В связи с этим характер провала напряжения, возникающего в сети 380 кВ, после трансформации на низкую сторону меняется. Векторные диаграммы напряжений на секциях 380 и 34,5 кВ, иллюстрирующие этот процесс, представлены на рис. 2.

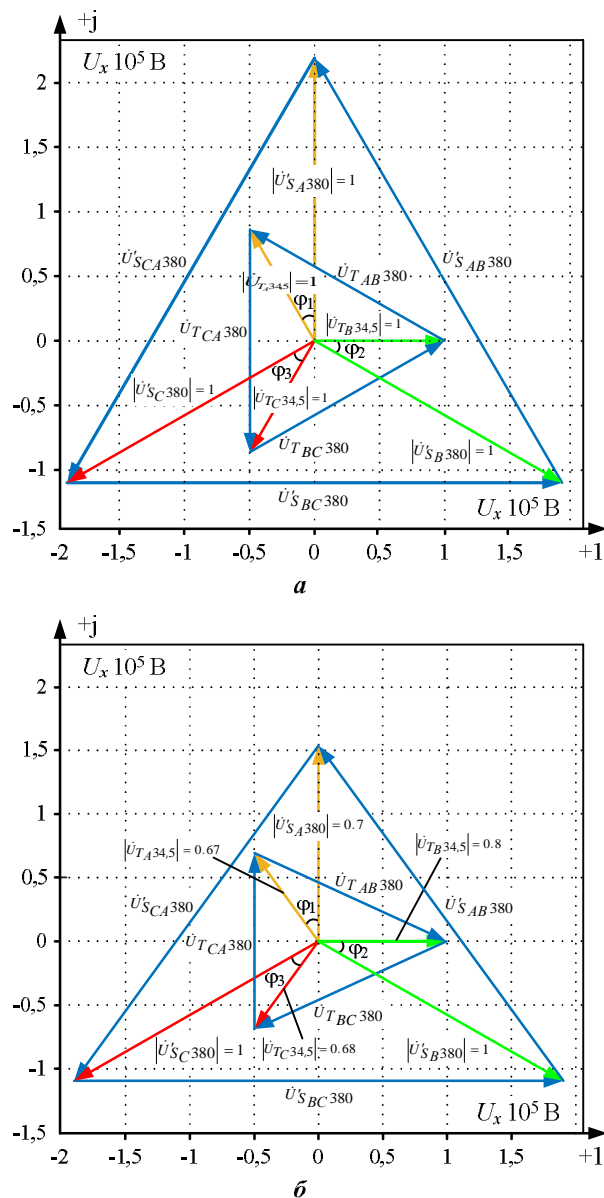


Рис. 2. Векторные диаграммы напряжений на секциях 380 и 34,5 кВ при нормальной работе сети (а) и при однофазном провале напряжения в питающей сети 380 кВ (б)

Из рис. 2 видно, что при переходе на секцию 34,5 кВ характер провала напряжения меняется: из однофазного провала с глубиной 30 % на напряжении 380 кВ в электрической сети 34,5 кВ возникает двухфазный провал напряжения глубиной 30 % и однофазный 20%. Численные значения представлены в таблице.

В предыдущих исследованиях при анализе уровней провалов напряжения были учтены статистические данные о погодных условиях в данном регионе и данные о частоте возникновения провалов напряжения. Было показано, что средняя величина  $\delta U = 25,5 \%$ ,  $t_{cp} = 67,5$  мс, при этом период времени с наибольшей частотой возникновения провала – февраль-июнь и сентябрь-декабрь [5].

Теоретические основы компенсации провалов напряжения за счёт СТК электродуговых печей

Для определения номинальной мощности СТК, необходимой для компенсации заданного провала напряжения, необходимо найти математическую зависимость  $Q_{СТК} = f(\delta U)$ . Схема замещения электросталеплавильного комплекса завода ЗАО «ММК Metalurji» представлена на рис. 3.

При исследовании демпфирующей способности СТК был использован метод математического моделирования. В программном пакете Matlab, в приложении Simulink, была реализована модель электросталеплавильного комплекса металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji» (рис. 4), включающая в себя сеть 34,5 кВ с сетевыми трансформаторами 155 МВА, включенных на параллельную работу, СТК 330 МВАр и ДСП-250 с печным трансформатором 300 МВА и реактором. Также была реализована математическая модель усовершенствованной системы управления СТК с переключающейся структурой, в которой за счет активации индивидуальных контуров регулирования фазных напряжений с ПИД-регуляторами обеспечивается компенсация провалов напряжения [7].

Схема замещения электрического контура ДСП представлена на рис. 5. Электрическая дуга в данном случае представлена с использованием противоЭДС [8].

Действующие значения фазных и линейных напряжений на шинах 34,5 и 380 кВ при однофазном провале напряжения глубиной 30%, выраженные в абсолютных и относительных единицах

$U_{\Phi\_380}, \text{ В}$		$U_{Л\_380}, \text{ В}$		$U_{\Phi\_34,5}, \text{ В}$		$U_{Л\_34,5}, \text{ В}$	
$U_A$	154	$U_{AB}$	325	$U_A$	13,3	$U_{AB}$	25,9
$U_B$	219	$U_{BC}$	380	$U_B$	15,8	$U_{BC}$	26,2
$U_C$	219	$U_{CA}$	325	$U_C$	13,5	$U_{CA}$	21,6
$U_{\Phi\_380}, \text{ о.е.}$		$U_{Л\_380}, \text{ о.е.}$		$U_{\Phi\_34,5}, \text{ о.е.}$		$U_{Л\_34,5}, \text{ о.е.}$	
$U_A$	$0,7U_H$	$U_{AB}$	$0,86U_H$	$U_A$	$0,67U_H$	$U_{AB}$	$0,75U_H$
$U_B$	$1,0U_H$	$U_{BC}$	$1,0U_H$	$U_B$	$0,79U_H$	$U_{BC}$	$0,76U_H$
$U_C$	$1,0U_H$	$U_{CA}$	$0,86U_H$	$U_C$	$0,67U_H$	$U_{CA}$	$0,62U_H$

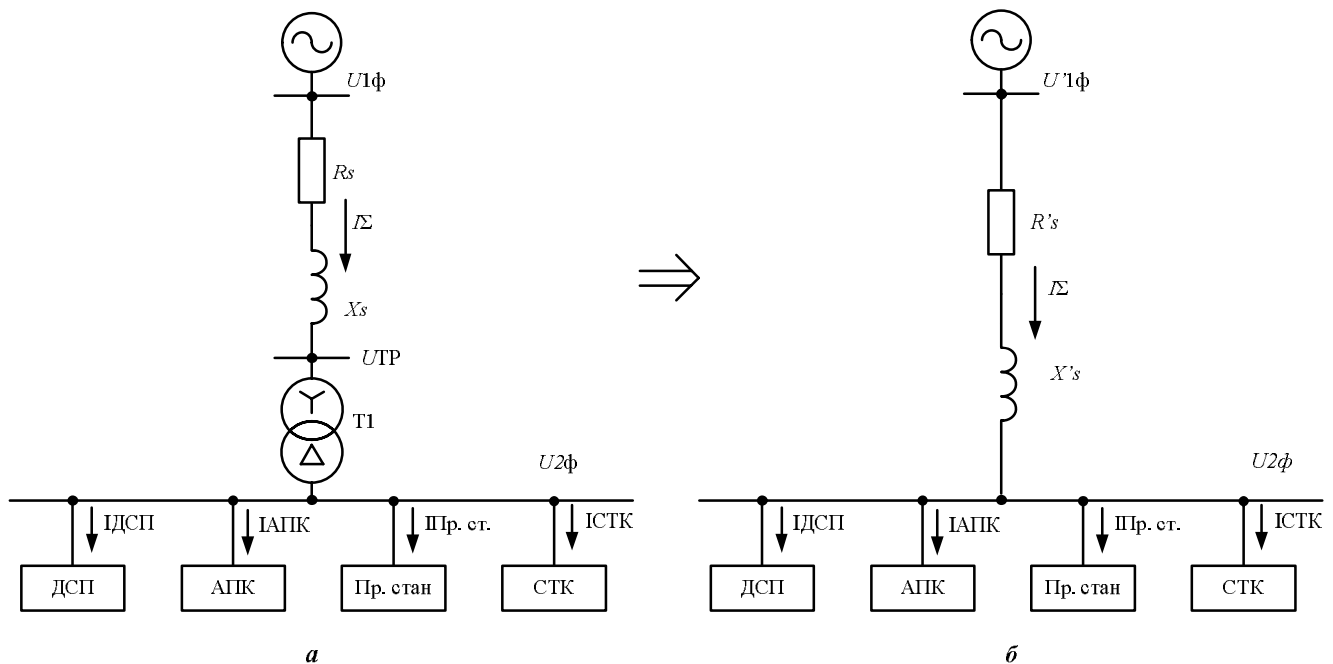


Рис. 3. Схема замещения электросталеплавильного комплекса завода ЗАО «ММК Metalurji»

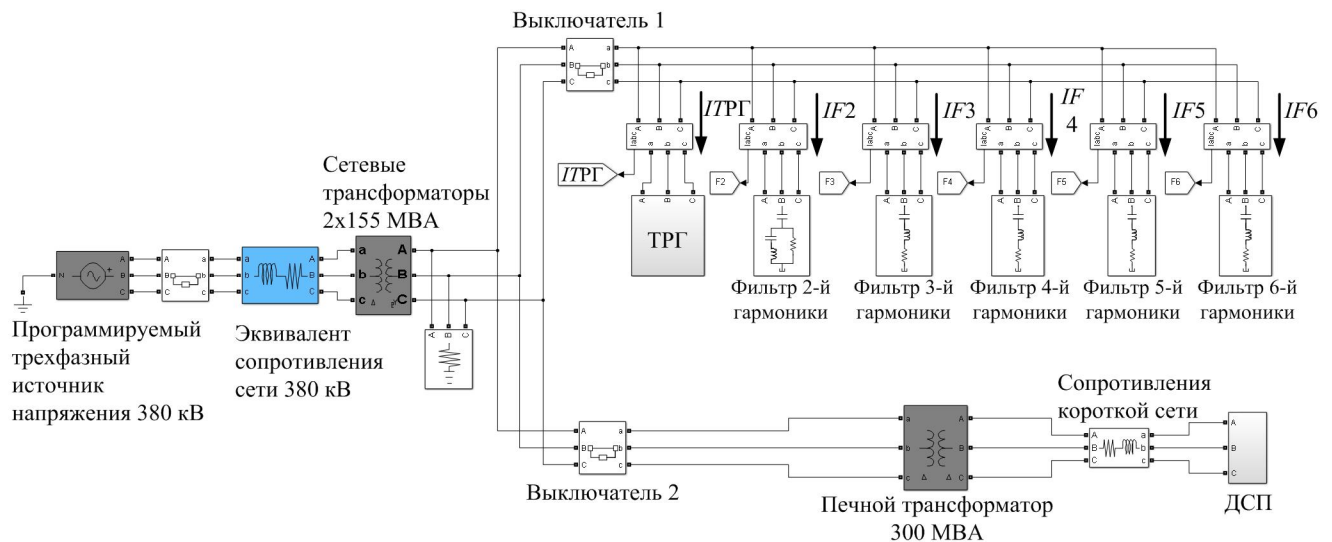


Рис. 4. Имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК» завода ЗАО «ММК Metalurji», реализованная в математическом пакете MATLAB с приложением Simulink

С помощью представленной модели была получена векторная диаграмма, характеризующую потерю напряжения в ЛЭП (рис. 6). На диаграмме показаны вектор напряжения в конце линии ( $\vec{U}_{2\phi A}$ ) и под углом  $\varphi$  вектор тока нагрузки  $\vec{I}_{\Sigma A}$ . Чтобы найти напряжение в начале линии, необходимо построить треугольник падений напряжения. Для этого из конца вектора  $\vec{U}_{2\phi A}$  параллельно току  $\vec{I}_{\Sigma A}$  откладывается вектор падения напряжений на активной составляющей сопротивления ЛЭП – вектор  $\vec{I}_{\Sigma A} \cdot R'_S$  (отрезок  $ac$ ). Перпендикулярно данному вектору строится вектор падения напряжения на реактивной составляющей сопротивления линии – вектор  $\vec{I}_{\Sigma A} \cdot X'_S$  (отрезок  $cb$ ). Геометрическая сумма векторов  $\vec{I}_{\Sigma A} \cdot R'_S$  и  $\vec{I}_{\Sigma A} \cdot X'_S$  дает полное падение напряжения в линии  $\vec{I}_{\Sigma A} \cdot Z'_S$ . Соединив точку  $o$  с концом вектора  $\vec{I}_{\Sigma A} \cdot Z'_S$ , получим вектор напряжения в начале линии  $\vec{U}_{1\phi A}$ . Таким образом, падение напряжения в линии

определяется как геометрическая разность между напряжениями в начале и конце линии.

Если пренебречь поперечной составляющей падения напряжения, то отрезок  $ae$  представляет собой алгебраическую разность между напряжением в начале и конце линии и называется потерей напряжения  $\Delta U_\phi$ .

Из векторной диаграммы видно, что вектор потерь напряжения состоит из отрезков  $ad$  и  $de$ :

$$\Delta U_\phi = ad + de, \quad (1)$$

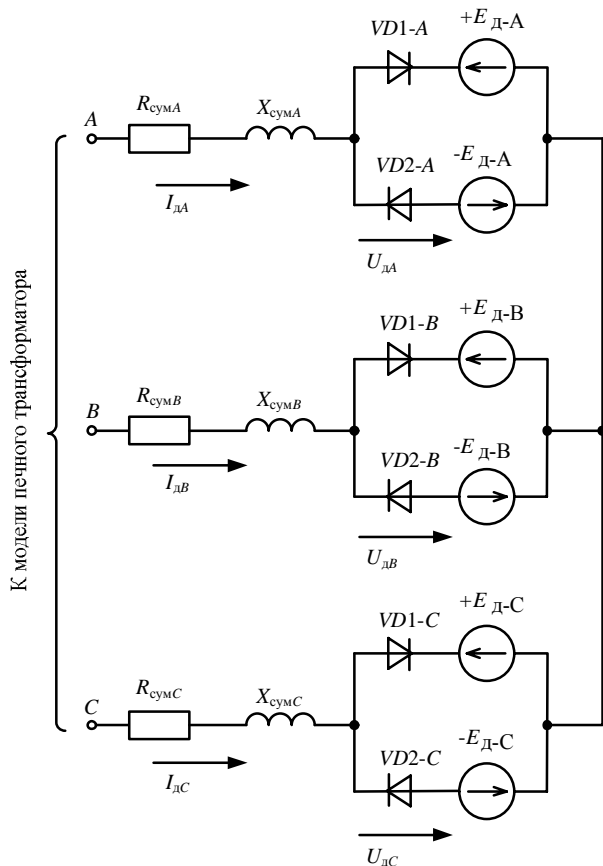
где

$$ad = IR_s \cos(\varphi); \quad (2)$$

$$de = IX_s \sin(\varphi). \quad (3)$$

Следовательно, получим следующее выражение:

$$\Delta U_\phi = IR_s \cos(\varphi) + IX_s \sin(\varphi). \quad (4)$$



$R_{кк}=0,27$  мОм,  $X_{кк}=4,25$  мОм – активное и реактивное сопротивление короткой сети

Рис. 5. Схема замещения вторичного электрического контура ДСП-250 ЗАО «ММК Metalurji»

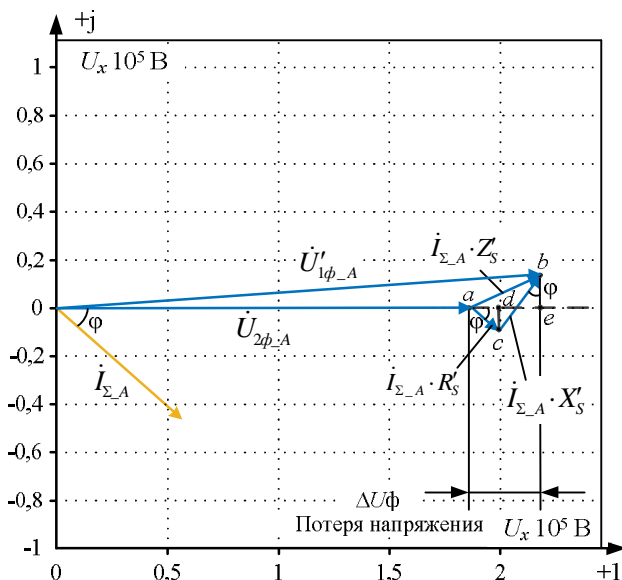


Рис. 6. Векторная диаграмма схемы замещения электросталеплавильного комплекса завода ЗАО «ММК Metalurji»

Переходя от фазных напряжений к линейным, а также умножив и поделив каждое слагаемое на  $\sqrt{3}U$ , получим окончательную формулу для определения потери напряжения в линии:

$$\Delta U = \sqrt{3} \left( \frac{PR_s}{\sqrt{3}U_s} + \frac{QX_s}{\sqrt{3}U_s} \right) = \frac{PR_s + QX_s}{U_s}. \quad (5)$$

Относительная потеря напряжения будет равна

$$\delta U = \frac{\Delta U}{U_s}. \quad (6)$$

Представим сопротивление сети как

$$X_s = \frac{U^2}{S_{кз}}. \quad (7)$$

Тогда получим

$$\Delta U = \frac{PR_s + Q \frac{U^2}{S_{кз}}}{U_s}. \quad (8)$$

Выражение для потери напряжения с учетом дополнительной активной нагрузки в относительных единицах будет иметь вид

$$\delta U = \frac{P_\Sigma R_s}{U_s^2} + \frac{Q_\Sigma}{S_{кз}}. \quad (9)$$

Выразим из полученной формулы суммарную реактивную мощность:

$$\frac{Q_\Sigma}{S_{кз}} = \delta U - \frac{P_\Sigma R_s}{U_s^2}; \quad (10)$$

$$Q_\Sigma = S_{кз} \left( \delta U - \frac{P_\Sigma R_s}{U_s^2} \right). \quad (11)$$

Определим требуемое значение реактивной мощности  $Q_{СТК}$ :

$$Q_{СТК} - Q_{ДСП} = S_{кз} \left( \delta U - \frac{P_\Sigma R_s}{U_s^2} \right); \quad (12)$$

$$Q_{СТК} = S_{кз} \left( \delta U - \frac{P_\Sigma R_s}{U_s^2} \right) + Q_{ДСП}. \quad (13)$$

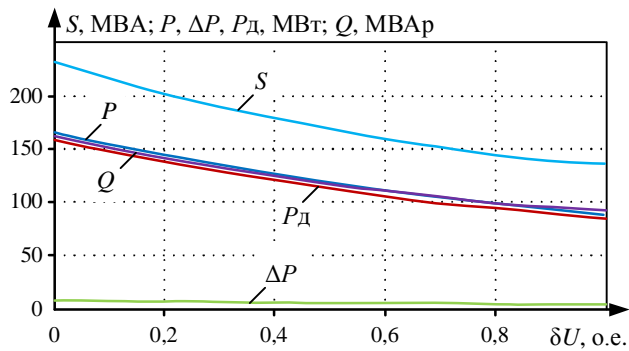
В представленной формуле:

$$P_\Sigma = P_{ДСП} + P_{АПК} + P_{ПР.СТАНА}; \quad (14)$$

$$Q_\Sigma = Q_{СТК} - Q_{ДСП}; \quad (15)$$

$$\cos(\phi) = 0,72 - 0,8. \quad (16)$$

На представленной выше математической модели (см. рис. 4) были смоделированы трехфазный и однофазный провалы напряжения в сети 380 кВ, при этом производился анализ зависимости активной, реактивной и полной мощности ДСП, мощности дуги и потерь активной мощности от провала напряжения, выраженного в относительных единицах (рис. 7, а, б). По данным характеристикам были получены соответствующие уравнения регрессии.



Уравнения регрессии:  $P_d = 30,952x^2 - 105,5x + 158,48$ ;

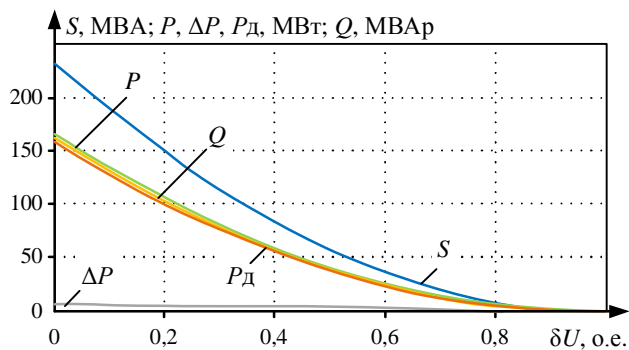
$$Q = 37,872x^2 - 108,16x + 161,82;$$

$$P = 32,469x^2 - 110,42x + 165,87;$$

$$S = 57,005x^2 - 154,98x + 231,76;$$

$$\Delta P = 1,517x^2 - 4,9242x + 7,3837$$

а



Уравнения регрессии:  $P_d = 158,67x^2 - 317,35x + 158,67$ ;

$$Q = 161,64x^2 - 323,27x + 161,64;$$

$$P = 166,06x^2 - 332,12x + 166,06;$$

$$S = 231,74x^2 - 463,47x + 231,74;$$

$$\Delta P = 7,3844x^2 - 14,769x + 7,3844$$

б

Рис. 7. Зависимости активной (P), реактивной (Q) и полной мощности ДСП (S), мощности дуги (Pд), потерь активной мощности (ΔP) от однофазного (а) и трехфазного (б) провала напряжения (δU)

Подставим полученные уравнения в выведенную ранее формулу (13):

– для случая с однофазным провалом напряжения:

$$Q_{\text{СТК}} = S_{\text{кз}} \times \left( \delta U - \frac{R_s (32,469\delta U^2 - 110,42\delta U + 165,87)}{U_s^2} \right) + 37,872\delta U^2 - 108,16\delta U + 161,82;$$

– для случая с трехфазным провалом напряжения:

$$Q_{\text{СТК}} = S_{\text{кз}} \times \left( \delta U - \frac{R_s (166,06\delta U^2 - 332,12\delta U + 166)}{U_s^2} \right) + 161,64\delta U^2 - 323,27\delta U + 161,64.$$

После упрощения получим:

– для случая с однофазным провалом напряжения:

$$Q_{\text{СТК}} = \left( 37,872 - 32,469 \frac{R_s S_{\text{кз}}}{U_s^2} \right) \delta U^2 + \left( S_{\text{кз}} - 108,16 + 110,42 \frac{R_s S_{\text{кз}}}{U_s^2} \right) \delta U + \left( 161,82 - 165,87 \frac{R_s S_{\text{кз}}}{U_s^2} \right);$$

– для случая с трехфазным провалом напряжения:

$$Q_{\text{СТК}} = \left( 161,64 - 166,06 \frac{R_s S_{\text{кз}}}{U_s^2} \right) \delta U^2 + \left( S_{\text{кз}} - 323,27 + 332,12 \frac{R_s S_{\text{кз}}}{U_s^2} \right) \delta U + \left( 161,64 - 166 \cdot \frac{R_s \cdot S_{\text{кз}}}{U_s^2} \right).$$

Построим на одном графике зависимость  $Q_{\text{СТК}} = f(\delta U)$ , полученную с помощью математических формул для различных вариантов провалов напряжения (рис. 8).

Теперь представим на одном графике зависимость  $Q_{\text{СТК}} = f(\delta U)$ , полученную с помощью имитационной модели для различных вариантов провалов напряжения (рис. 9).

По результатам исследований, проведенных на математической модели, была определена разница между зависимостями  $Q_{\text{СТК}} = f(\delta U)$  с однофазным и трехфазным провалами напряжения. Ошибка в данном случае меняется от 1 до 7% относительного отклонения и в среднем находится на уровне 4,45%. Данное обстоятельство обусловлено несимметричными режимами работы СТК.

Таким образом, при разработке инженерной методики определения требуемой величины реактивной мощности СТК можно использовать среднюю величину относительного отклонения между требуемой реактивной мощностью при однофазном и трехфазном провалах напряжения (4,45 %) и ввести поправочный коэффициент, равный 1,05. Например, для компенсации 30%-го однофазного провала напряжения необходимая номинальная мощность СТК может быть определена как произведение номинальной мощности СТК при 30%-м трехфазном провале и поправочного коэффициента 1,05.

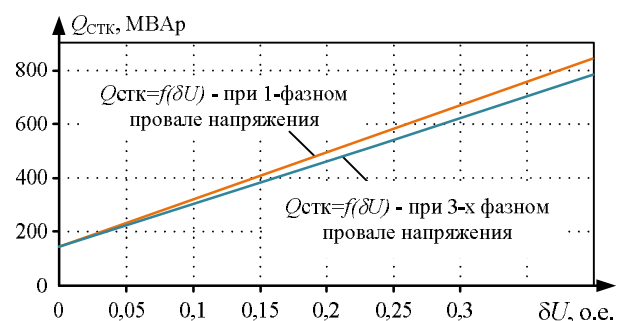


Рис. 8. Графики зависимостей требуемой реактивной мощности СТК от провалов напряжения при однофазном и трехфазном провалах, полученные с помощью математических формул



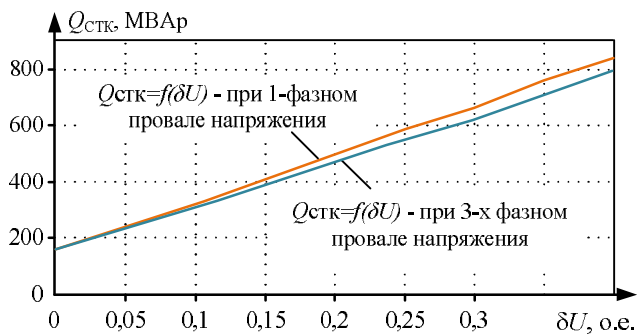


Рис. 9. Графики зависимостей требуемой реактивной мощности СТК от провалов напряжения при однофазном и трехфазном провалах, полученные с помощью имитационной модели комплекса «ДСП-СТК»

Анализ способности СТК по демпфированию провалов напряжения с учетом реального графика электрической нагрузки ДСП

Поскольку предложенная методика демпфирования провалов напряжения предполагает параллельную работу ДСП и стана горячей прокатки, то важно понимать, что помимо своих основных функций, выполняемых в процессе плавок металла, СТК должен отдавать часть своей реактивной мощности на поддержание заданного уровня напряжения в момент возникновения однофазного короткого замыкания в сети 380 кВ. Таким образом, необходимо знать, насколько часто провалы напряжения будут совпадать по времени с работой печи. Для этого рассмотрим график изменения мощности и тока дуги ДСП-250 завода ЗАО «ММК-Metalurji» (рис. 10). На данном графике обозначено время работы печи  $t_p$  и время пауз между началами и концами плавок и подвалкой скрапа  $t_{\text{пауз}}$ . Время всего цикла плавки равно  $t_{\text{ц}} = t_p + t_{\text{пауз}}$ .

Таким образом, для ДСП-250 среднее время от выпуска до выпуска металла составляет 60 мин ( $t_{\text{цс}}$ ), суммарное время работы под током  $t_{p\Sigma} = 46,8$  мин, а суммарное время пауз  $t_{\text{пауз}\Sigma}$  равно 13,2 мин.

Найдем коэффициент включения, характеризующий степень использования ДСП во времени:

$$K_B = \frac{t_{p\Sigma}}{t_{p\Sigma} + t_{\text{пауз}\Sigma}} = \frac{46,8}{46,8 + 13,2} = 0,78.$$

Рассмотрим график, представленный на рис. 11, иллюстрирующий величину однофазного провала напряжения в сети 380 кВ, которую может скомпенсировать СТК при включенной и отключенной ДСП. Как видно из графика на рис. 11, минимальная глубина провала напряжения в периоды плавки с которой может справиться СТК, составляет 3%. В то же время, когда печь отключена, эта величина составляет 17%.

Рассмотрим другой случай, когда необходимо скомпенсировать провал 30% и определить величину требуемой реактивной мощности.

В представленную ранее формулу (17) подставим значения параметров сети и зададим  $\delta U = 0,3$ . В соответствии с приведенной методикой получается, что требуемая реактивная мощность при данном провале находится в диапазоне от 569,8 МВАр до 824,11 МВАр в зависимости от состояния ДСП. Графически результат расчетов показан на рис. 12.

Ниже приведены такие же графики для трехфазного провала напряжения в сети 380 кВ (рис. 13-14).

Таким образом, на основе проведенных исследований можно сделать вывод, что при работающей ДСП-250 СТК 330 МВАр с вероятностью 0,78 компенсирует провал напряжения глубиной 3% и с вероятностью 0,22 компенсирует провал напряжения глубиной 17%. В дальнейшем для обеспечения бесперебойного электроснабжения необходимо выбирать для установки СТК с большей установленной мощностью, рассчитанной согласно предложенной инженерной методике.

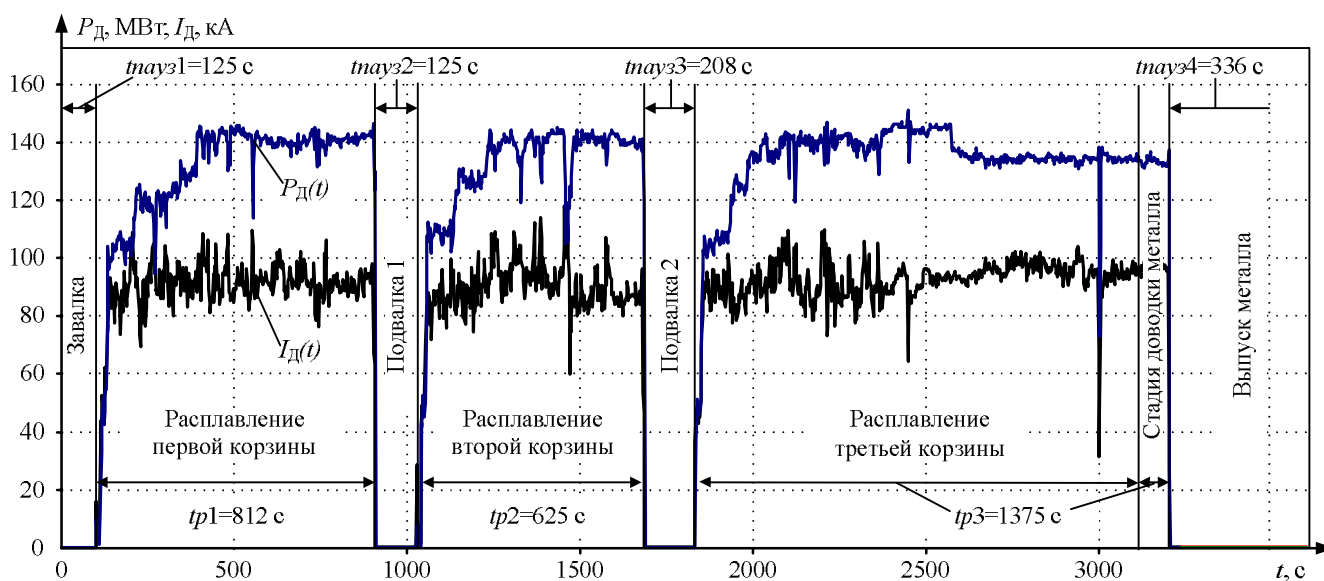


Рис. 10. Типовой график изменения мощности дуги и тока ДСП-250 ЗАО «ММК-Metalurji»

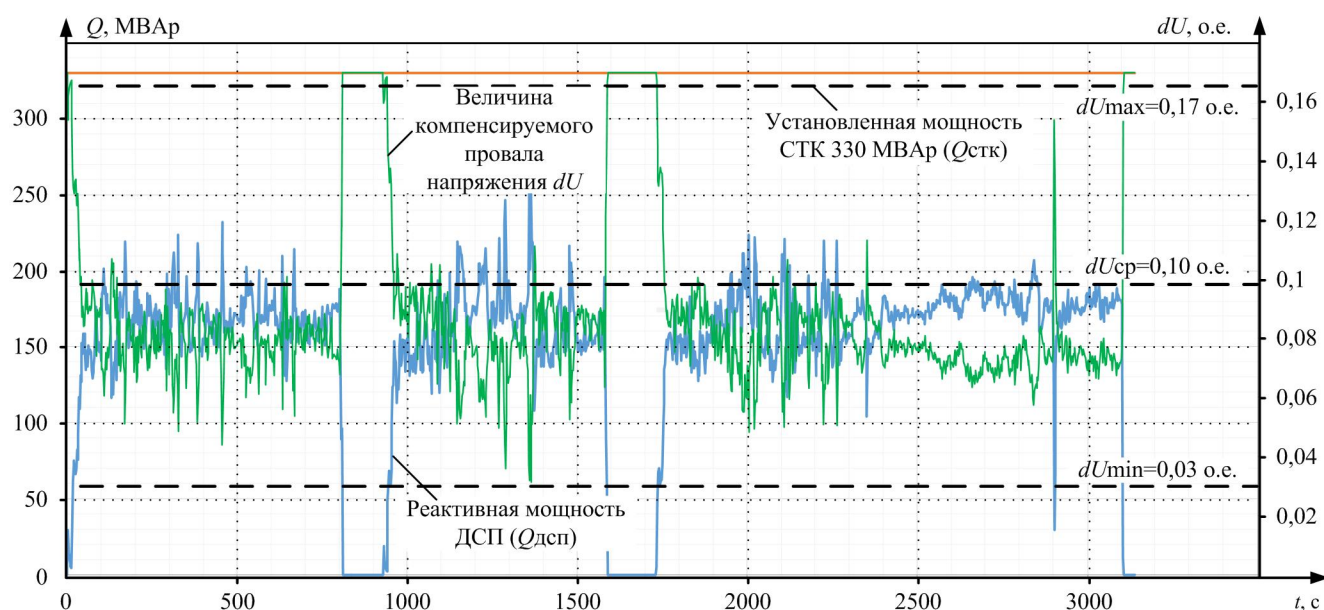


Рис. 11. Графики изменения мгновенных значений реактивной мощности ДСП-250 и максимальной компенсируемой величины однофазного провала напряжения за цикл плавки

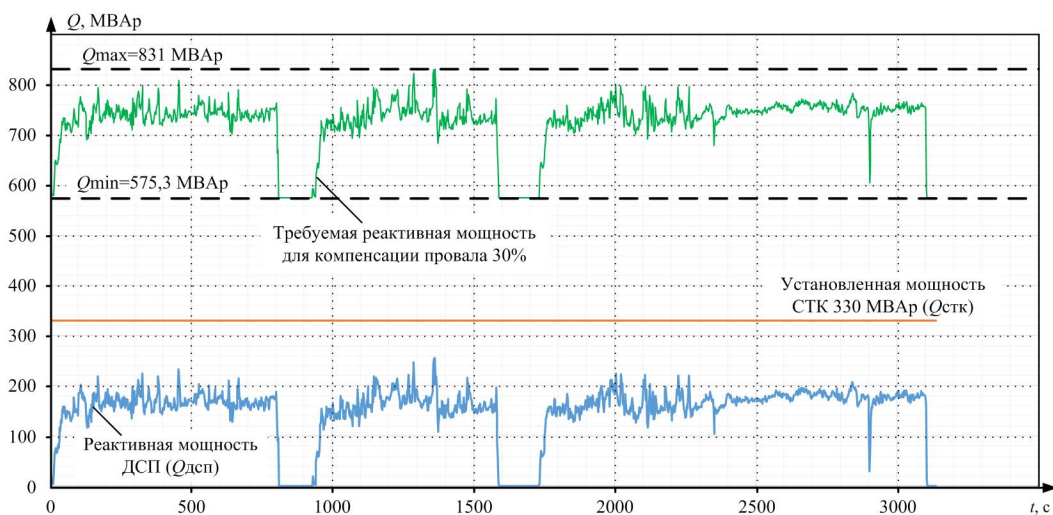


Рис. 12. График изменения требуемой реактивной мощности СТК при действующей ДСП-250 при однофазном провале напряжения глубиной 30 %

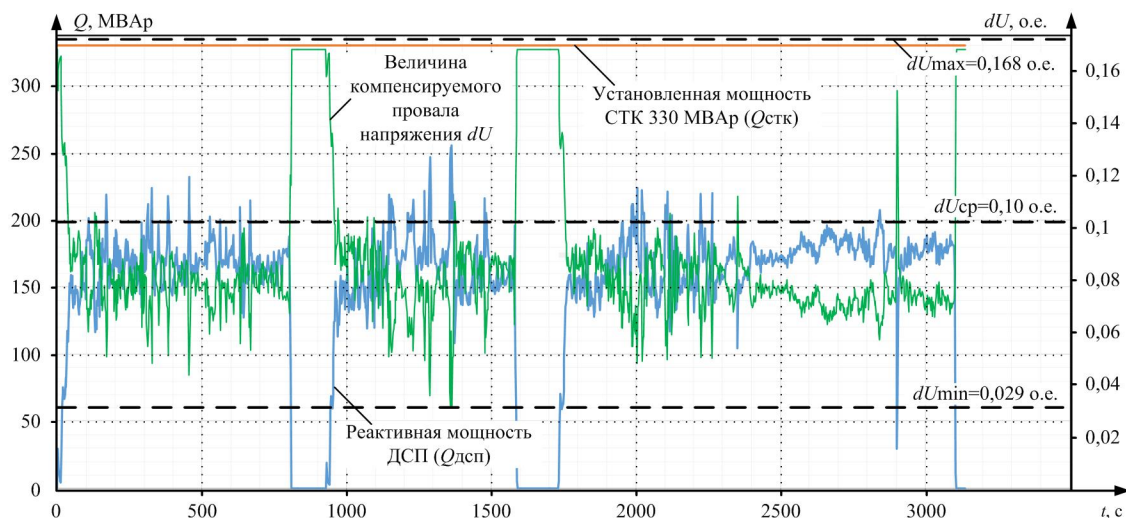


Рис. 13. Графики изменения мгновенных значений реактивной мощности ДСП-250 и максимальной компенсируемой величины трехфазного провала напряжения за цикл плавки



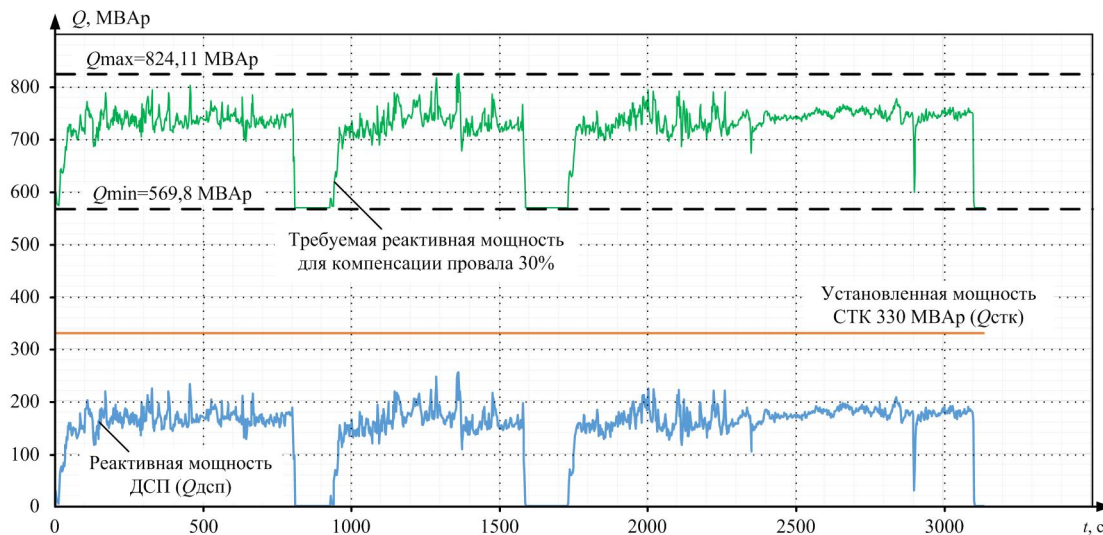


Рис. 14. График изменения требуемой реактивной мощности СТК при действующей ДСП-250 при трехфазном провале напряжения глубиной 30%

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика оценки резервов реактивной мощности СТК промышленных предприятий для компенсации внешних провалов напряжения, позволяющая на основе имеющихся исходных данных о СЭС и параметрах электрических нагрузок электроприемников определить среднестатистическую величину компенсируемого провала напряжения. Для рассматриваемого комплекса «ДСП-СТК» она равна 10%.

2. Проведен анализ зависимости требуемой реактивной мощности для компенсации провалов напряжения. Выведена формула для расчета  $Q_{СТК}$  с эмпирическими коэффициентами, зависящими от мощности короткого замыкания сети  $S_{кз}$ , активного сопротивления сети  $R_s$ , уровня напряжения сети  $U_s$ , а также от глубины провала напряжения  $\delta U$ . По данному выражению были построены графики и получены уравнения регрессии для случая с однофазными и трехфазными провалами напряжения. Введено понятие коэффициента демпфирования, равному среднему относительному отклонению между требуемой реактивной мощностью при однофазном и трехфазном провалах. Как показали исследования, средняя величина относительного отклонения между требуемой реактивной мощностью при однофазном и трехфазном провалах напряжения отличается на 4,45%. Данная разница обусловлена несимметричным режимом работы СТК.

3. Для случая комплекса «ДСП-СТК» ЗАО «ММК Metalurji» показано, что в зависимости от того находится ДСП в работе или нет, посредством СТК можно скомпенсировать провалы напряжения глубиной от 3 до 17 %. Также с помощью разработанного подхода были получены требуемые значения реактивной мощности СТК для компенсации провала напряжения 30 % с учетом того, что печь функционирует. Анализ коэффициента включения позволил оценить, с какой вероятностью СТК сможет восстановить необходимый уровень напряжения на шинах 34,5 кВ ЗАО «ММК Metalurji».

*Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых (МК-3230.2018.8).*

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.
- Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khrumshin T.R., I. Ackay, Y. Gok. Application of static var compensator of ultra-high power electric arc furnace for voltage drops compensation in factory power supply system of metallurgical enterprises // Proceedings of the Electrical Power and Energy Conference EPEC-2014 – Calgary, Canada. 12-14 November 2014. P. 235-241.
- Исследование влияния провалов напряжения в системе электроснабжения завода ММК METALURJI на работу главных электроприводов стана горячей прокатки / А.А. Николаев, А.С. Денисевич, И.А. Ложкин, М.М. Тухватуллин // Электротехнические системы и комплексы. 2015. №3(28). С. 8-14.
- Николаев А.А., Денисевич А.С., Буланов М.В. Исследование параллельной работы автоматизированных электроприводов прокатного стана и дуговой сталеплавильной печи // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2017. №3. С. 59-69.
- Николаев А.А., Ложкин И.А., Ивекеев В.С. Улучшение динамических показателей статического тиристорного компенсатора мощной дуговой сталеплавильной печи в режиме демпфирования провалов напряжения, возникающих во внешней питающей сети // Материалы XLV международной научно-практической конференции «Фёдоровские чтения». М.: Изд-во Московского энергет. ун-та, 2015. С. 198-201.
- Николаев А.А., Ивекеев В.С., Ложкин И.А. Анализ провалов напряжения в районных электрических сетях 380 кВ провинций Хатай и Адана Турецкой республики // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. №1. С. 61-70.
- Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутривзаводского электроснабжения / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.С. Ивекеев, Ложкин И.А., Котышев В.Е. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №1. С. 1-11.
- Тельный С.И. К теории трехфазной дуговой печи с непроводящей подиной // Электричество. 1954. №12. С. 38-42.
- Patent 6114841 United States of America, Int. Cl. G05F 1/70. Method and a device for compensation of reactive power [Text] / Hasler J-P, Johansson T., Angquist L; As-

- signee Asea Brown Boveri AB (Vasteras, Sweden). – Appl. No. 08/874,035; filed 12.06.1997; date of patent 5.09.2000.
10. Пупин В.М., Куфтин Д.С., Сафонов Д.О. Анализ провалов напряжений в питающих сетях предприятий и способы защиты электрооборудования // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2011. №4. С. 35-41.
  11. Карташев И.И., Плакида А.В., Хромышев Н.К. Анализ провалов напряжения в электрических сетях 100/220 кВ // Электричество. 2005. №4. С. 2-8.
  12. Шпиганович А.Н., Муров И.С. Провалы напряжения в электрических системах предприятий // Национальная Ассоциация Ученых. 2015. № 2-4(7). С. 6-7.
  13. Simulation of voltage sag events in distribution networks and utility-side mitigation methods / Mustafa S.S., Önder P., Kahraman Y., Ömer G., Necip E.A. // 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). IEEE Conferences. Year: 2017. Pages: 211–215.
  14. Mei Fei. Classification and recognition of voltage sags based on KFCM – SVM / Mei Fei, Zhang Chenyu, Sha Haoyuan, Zheng Jianyong // 2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). IEEE Conferences Year: 2017. Pages: 432–437.
  15. Исследование взаимосвязи показателей качества электроэнергии и надёжности электроснабжения / Ю.В. Шаров, И.И. Карташев, В.Н. Тульский, О.В. Большаков // Энерго-эксперт. 2011. №6. С. 78-83.

Поступила в редакцию 23 июля 2019 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### DEVELOPMENT OF METHODS FOR ASSESSING RESERVES OF INDUSTRIAL STATIC VAR COMPENSATORS REACTIVE POWER FOR BALANCING OF VOLTAGE SAGS

Alexander A. Nikolaev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: alexniko@inbox.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5014-4852>.

Vladimir S. Ivekeev

Post-graduate student, the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: vivekeev@yandex.ru.

Igor A. Lozhkin

Post-graduate student, the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: igor-yoha@ya.ru.

The industrial static var compensator reacting power reserve assessment methodology for balancing internal voltage sags is developed in this paper. This methodology makes it possible to determine the average value of the compensated voltage sag based on the available source data on the power supply system (PSS) and the parameters of the electrical receiver loads. The experimental data on voltage sags at the metallurgical enterprise CJSC «MMK Metalurji» in Iskenderun, Turkey, is used as initial information. The effect of voltage sags on the sensitive electric receivers, such as frequency converters (FC) with active rectifiers (AR) reliability, is examined on the basis of this enterprise. The methodology for voltage sags compensation through the use of powerful SVC reserves of electric arc furnaces (EAF) is proposed. The results obtained allowed us to introduce the concept of damping coefficient, which is defined as the average relative deviation between the required reactive power at single-phase and three-phase voltage sags. A mathematical analysis of the SVC required reactive power on the magnitude of the voltage sags dependence is carried out. This analysis makes it possible to develop a new approach in the design of intra-shop power supply systems. The results obtained are of great practical importance for compact metallurgical enterprises, including electric steelmaking and rolling production.

**Keywords:** electric arc furnace, static var compensator, voltage sag, reactive power compensation, power quality.

#### REFERENCES

1. GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow: Standartinform, 2014. (In Russian)
2. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khrumshin T.R., Ackay I., Gok Y. Application of static var compensator of ultra-high power electric arc furnace for voltage drops compensation in factory power supply system of metallurgical enterprises // Proceedings of the Electrical Power and Energy Conference EPEC-2014 – Calgary, Canada, 12-14 November 2014. pp. 235-241.
3. Nikolaev A.A., Denisevich A.S., Lozhkin I.A., Tikhvatullin M.M. Investigation of Voltage Drops Influence in the Power Supply System of the "MMK Metalurji" Ironworks on the Main Electric Drives of the Hot Strip Mill // *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2015. No 3(28). P. 8-14. (In Russian)
4. Nikolaev A.A., Denisevich A.S., Bulanov M.V. Investigation of the parallel operation of automated electric drives of a rolling mill and an electric arc furnace // *Vestnik IGJeU* [Journal of ISPU], 2017. No 3. P. 59-69. (In Russian)
5. Nikolaev A.A., Lozhkin I.A., Ivekeev V.S. Improvement of dynamic indicators Static Var Compensator of the Ultra-High Power Electric Arc Furnace in the mode of damping of the voltage drops arising in an external power line // *Materialy XLV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Fedorovskiye chteniya»* [Materials of the XLV International Scientific and Practical Conference "Fedorov Readings"]. 2015. P. 198-201. (In Russian)
6. Nikolaev A.A., Ivekeev V.S., Lozhkin I.A. Analysis of voltage fall in 380 kV regional electrical power networks of Hatay and Adana provinces, Turkey // *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Journal of MSTU], 2018. No 1. P. 61-70.
7. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Ivekeev V.S., Lozhkin I.A., Kotyishev V.E. Using of the Static Var Compensator of the Ultra-High Power Electric Arc Furnace for Supporting of Electrical Power System's Stability and Increasing Reliability of Factory Power Supply. *Mashinostroenie setevoy ehlektromyjnay nauchny zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014. No.1, P. 1-11. (In Russian)

8. Telny S.I. To the theory of a three-phase arc furnace with a non-conductive hearth // *Electricity*. 1954. No. 12. P. 38–42.
9. Patent 6114841 United States of America, Int. Cl. G05F 1/70. Method and a device for compensation of reactive power [Text] / Hasler J-P, Johansson T., Angquist L; Assignee Asea Brown Boveri AB (Vasteras, Sweden). Appl. No. 08/874,035; filed 12.06.1997; date of patent 5.09.2000.
10. Pupin V.M., Kuftin D.S., Safonov D.O. Analysis of voltage failures in the supply networks of enterprises and methods of protecting electrical equipment // *Elektrooborudovanie: ehk-spluatatsiya i remont*. [Electrical equipment: operation and repair.] 2011. No. 4. pp. 35-41. (In Russian.).
11. Kartashev I.I., Plakida A.V., Khromyshev N.K. Analysis of voltage dips in electrical networks 100/220 kV // *Elektrichestvo* [Electricity.] 2005. No. 4. pp. 2-8. (In Russian)
12. Shpiganovich A.N., Murov I.S. Voltage dips in the electrical systems of enterprises // *Nacionalnaya Associatsiya Uchenykh* [National Association of Scientists.] 2015. No. 2-4(7). P. 6-7. (In Russian)
13. Mustafa Selim Sezgin, Önder Polat, Kahraman Yumak, Ömer Gul, Necip Erman Atilla. Simulation of voltage sag events in distribution networks and utility-side mitigation methods // 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). IEEE Conferences. Year: 2017. Pages: 211–215.
14. Mei Fei, Zhang Chenyu, Sha Haoyuan, Zheng Jianyong. Classification and recognition of voltage sags based on KFCM – SVM // 2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). IEEE Conferences Year: 2017. Pages: 432–437.
15. Sharov Yu.V., Kartashev I.I., Tulsy V.N., Bolshakov O.V. The study of the relationship of indicators of quality of electric energy and reliability of power supply // *Energoekspert* [Energy Expert]. 2011. No. 6. P. 78-83. (In Russian)

Николаев А.А., Ивекеев В.С., Ложкин И.А. Разработка методики оценки резервов реактивной мощности статических тиристорных компенсаторов промышленных предприятий для компенсации провалов напряжения // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 3(44). С. 16-26. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-16-26](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-16-26)

Nikolaev A.A., Ivekeev V.S., Lozhkin I.A. Development of Methods for Assessing Reserves of Industrial Static Var Compensators Reactive Power for Balancing of Voltage Sags. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electro-technical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 16-26. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-16-26](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-16-26)