

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НЕПРЕРЫВНЫХ ПРОИЗВОДСТВ ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ*

*Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, Д.С. Крубцов,
А.А. Николаев, О.И. Карандаева, П.Ю. Журавлев*

Кратковременные провалы напряжения приводят к отключениям электроприводов, нарушению технологических режимов. В результате исследований, проведенных на металлургических предприятиях, показано, что распределение глубины провалов напряжений носит случайный характер. При этом наиболее частыми являются провалы, вызванные однофазными короткими замыканиями. Рассмотрены технические решения, способствующие уменьшению вероятности возникновения провалов напряжения, реализованные на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»). Это деление замкнутых сетей 110 кВ внутризаводского электроснабжения на независимые контуры, непосредственное подключение ответственных потребителей на генераторное напряжение 6–10 кВ собственных станций малой мощности, использование автономного генератора как независимого источника электроэнергии. Выполнен анализ работы синхронных электроприводов стана холодной прокатки 2000 ОАО «ММК» с преобразователями частоты, построенными на базе AFE. Рассмотрены варианты управления активным выпрямителем с адаптацией к несимметрии питающего напряжения. При этом напряжение обратной последовательности используется в качестве корректирующего сигнала для формирования трех фазных напряжений на его входных зажимах. Представлены векторные диаграммы линейных и фазных напряжений при снижении напряжения фазы на 50 %. Приведены результаты расчетов коэффициентов модуляции, необходимых для отработки провалов питающего напряжения при сохранении устойчивой работы активного выпрямителя. Определены границы устойчивого режима работы при снижениях напряжения для случаев однофазного, двухфазных симметричных и несимметричных коротких замыканий. Рассмотрен вариант повышения устойчивости активных выпрямителей за счет обеспечения равенства коэффициентов модуляции по фазам. Показано, что диапазон остаточных напряжений, при котором активный выпрямитель сохраняет устойчивость, при этом расширяется. В целом, при реализации рассмотренных методов электропривод сохраняет устойчивость при значительно меньшем уровне остаточных напряжений.

Ключевые слова: провал напряжения, коэффициент модуляции, активный выпрямитель, широтно-импульсная модуляция.

Введение

На предприятиях с непрерывным технологическим производством (ПНТП) металлургической, топливно-энергетической, химической промышленности кратковременные провалы напряжения (ПН), даже малой длительности, приводят к отключениям электроприводов, нарушению технологических режимов и длительным простоям оборудования.

Статистика показывает увеличение числа аварийных отключений оборудования, технологические механизмы которого оснащены частотно-регулируемыми приводами переменного тока [1]. Причиной этого является увеличение длительности перерывов в работе электродвигателей, питаемых от преобразователей частоты, при кратковременных (1–2 с) нарушениях электроснабжения [2, 3]. Автоматическое включение резерва на период паузы не является рациональным решением, а создание собственного быстродействующего АВР проблематично как с точки зрения усложнения схемы электроснабжения, так и внесения проблем по селективности и равномерности загрузки вводов электропитания [4].

Технические требования к электроприводам определяются особенностями работы каждого электропривода, его взаимосвязью с другими агрегатами, эксплуатирующимися на объекте, и степенью их технологической значимости в производственном цикле.

С позиции системного подхода электротехнический объект любой сложности по отношению к системе заводского электроснабжения рассматривают как отдельный элемент – электроприемник с определенным набором электротехнических параметров. С другой стороны, этот же объект – сложная мехатронная система, включающая в себя элементы электропривода, гидравлики, силовой электроники, релейной защиты.

В такой постановке представляет интерес рассмотрение объекта и его восприимчивости к провалам напряжения с двух позиций: во-первых, со стороны системы электроснабжения – «сверху», в точке присоединения ответственного потребителя оценить частоту и сезонность появления провалов напряжения, их глубину и длительность, а главное – определить причины ПН и возможности их локализации. Во-вторых, рассматривая и анали-

* Работа выполнялась в рамках госзадания № 2014/80.

зируя объект «изнутри», как совокупность входящих в него подсистем, выделить элементы, наиболее чувствительные к провалам напряжения, действия которых вызывают необратимые последствия для всего объекта в целом.

Анализ способов уменьшения воздействия ПН на электроприемники

Результаты исследований, проведенных на металлургических предприятиях [5, 6], указывают на то, что распределение глубины провалов $\delta U_{\text{п}}$ напряжений носит случайный характер, а наиболее частыми являются однофазные провалы (табл. 1), вызванные однофазными короткими замыканиями (КЗ); их длительность определяется действием земляной защиты ЛЭП 110 кВ.

В настоящее время можно выделить несколько эффективных технических решений, способствующих уменьшению вероятности возникновения ПН и их последствий. Рассмотрим их подробнее.

1. Деление замкнутых сетей 110 кВ внутриводского электроснабжения на независимые контуры, связь между которыми сохраняется через сети напряжением 220, 500 кВ внешней энергосистемы. Такое преобразование выполнено в сетях 110 кВ ОАО «ММК» [7], в результате чего ПН стали более локализованными, а их последствия менее разрушительными для ПНТП.

2. Непосредственное подключение ответственных потребителей на генераторное напряжение 6–10 кВ собственных станций малой мощности. Подобное решение реализовано на коксохимическом производстве ОАО «ММК» [7], для которого

перерыв в электроснабжении недопустим из-за чрезвычайных экологических последствий. На общие шины 6 кВ с асинхронной двигательной нагрузкой подключены два генератора мини-ТЭЦ мощностью по 4 МВт (рис. 1).

3. Автономный генератор как независимый источник также обеспечивает электроэнергией потребителей «особой группы, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства» (п. 1.2.18) [8].

Анализ объекта «изнутри» как единого системообразующего комплекса проведем на примере непрерывного стана холодной прокатки 2000 ОАО «ММК». Главные привода стана выполнены на базе синхронных двигателей с преобразователями частоты, построенными по двенадцатипульсной схеме с последовательным соединением первичных обмоток трансформаторов (рис. 2). В преобразователях используются запираемые тиристоры IGCT с идентичной структурой активного выпрямителя (АВ) и автономного инвертора напряжения [9].

В методе широтно-импульсной модуляции (ШИМ) используется принцип удаления выделенных гармоник с пятью переключениями за четверть периода (рис. 3, а). Зависимость углов переключения α_1 – α_5 от коэффициента модуляции μ приведена на рис. 3, б [10]. Для рассматриваемого типа преобразователей диапазон изменения коэффициента модуляции составляет 0,65–0,90, при этом номинальному напряжению сети соответствует $\mu = 0,83$. Это значит, что обеспечивается необходимый запас в случае снижения напряжения сети на 22 %. В динамических режимах, связанных

Таблица 1

Распределение провалов напряжений

Вид ПН	$\delta U_{\text{п}}, \%$	Длительность, с	Количество, %
Однофазные	25–35	0,1–0,3	60–70
Двухфазные	40–60	0,1–0,3	35–25
Трехфазные	до 100	0,1–0,5	15–5

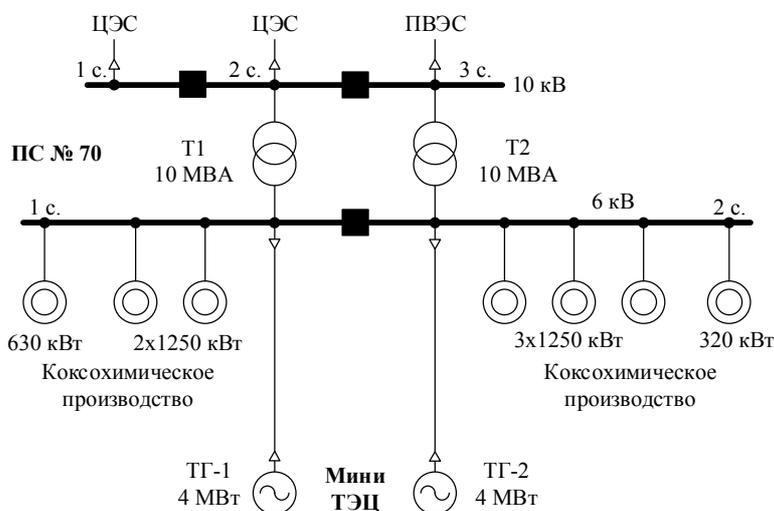


Рис. 1. Непосредственное подключение ответственных потребителей на генераторное напряжение 6 кВ собственных станций малой мощности

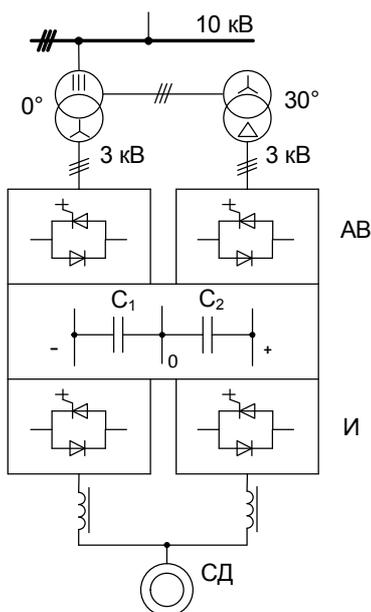


Рис. 2. Схема подключения активного выпрямителя

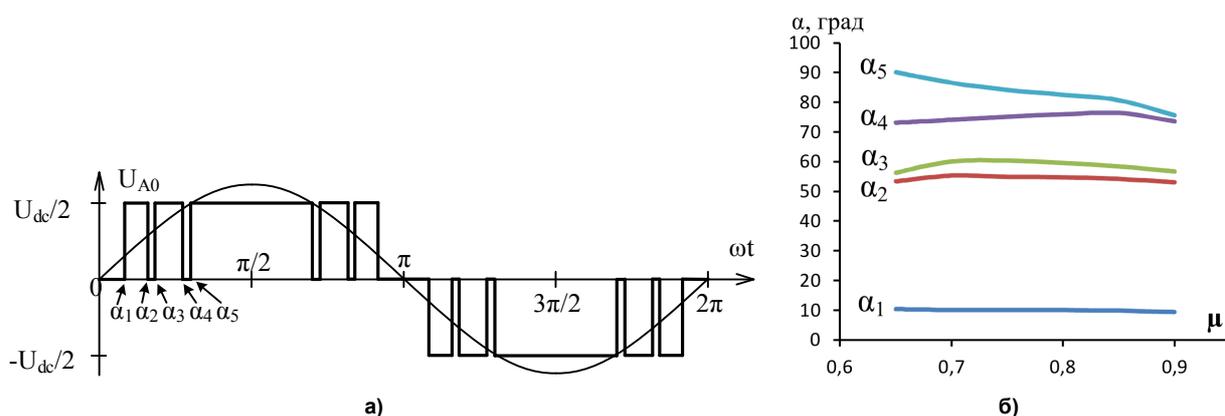


Рис. 3. Формирование фазного напряжения активного выпрямителя (а), зависимость углов переключения α_1 – α_5 от коэффициента модуляции μ (б)

с ускорением привода, создается требуемый запас по напряжению величиной порядка 8 %.

Функция активного выпрямителя – преобразование трехфазного переменного напряжения сети в постоянное напряжение на конденсаторе в звене постоянного тока и поддержание этого напряжения при изменениях нагрузки со стороны привода и напряжения питающей сети. Это достигается путем формирования основной гармоники напряжения $U_{п1}$ на входных зажимах выпрямителя из постоянного напряжения на конденсаторе методом ШИМ таким образом, чтобы активная мощность, потребляемая из сети, соответствовала мощности, отдаваемой конденсатором в цепь нагрузки. Нулевое потребление реактивной мощности выпрямителем обеспечивается путем изменения коэффициента модуляции μ .

При симметричном напряжении питающей сети на входных зажимах выпрямителя формируется трехфазная система напряжений, которая на основной гармонике является также симметричной. Это

означает, что коэффициенты модуляции по трем фазам одинаковые. При провалах напряжения возникает несимметрия питающей сети, характеризующаяся появлением напряжения обратной последовательности. В результате в контуре, образованном двумя источниками напряжения – сетью и активным выпрямителем, создаются условия для протекания токов обратной последовательности, величина которых ограничена сопротивлением трансформатора, установленного на входе выпрямителя.

Известны системы управления АВ с адаптацией к несимметрии питающего напряжения [11]. В таких системах напряжение питающей сети раскладывается на прямую и обратную последовательности. Напряжение обратной последовательности используется в качестве корректирующего сигнала прямого действия, так называемого предуправления, для формирования трех фазных напряжений на входных зажимах выпрямителя. Это позволяет ограничить токи обратной последовательности практически до нуля, тем самым сни-

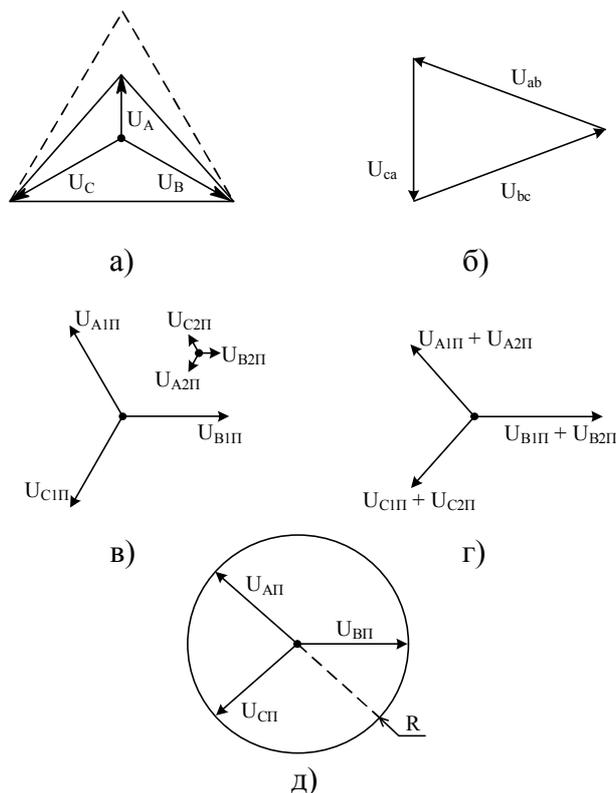


Рис. 4. Векторные диаграммы напряжений на стороне 110 кВ (а), на стороне 10 кВ (б), прямая и обратная последовательности фазных напряжений активного выпрямителя (в), их сумма (г), то же с учетом корректирующего сигнала (д)

зить нагрев силовых ключей, связанный с их протеканием. С другой стороны, подобное решение приводит к неравенству фазных напряжений со стороны активного выпрямителя, и, как следствие, к возможному выходу коэффициентов модуляции на ограничение. Такой режим опасен размыканием контура регулирования тока и потерей управляемости преобразователем.

Расчет коэффициентов модуляции АВ при провалах напряжения

Представляет интерес оценить минимальный уровень остаточного напряжения, при котором коэффициент модуляции достигает критического значения. Как было отмечено ранее, наиболее часто причиной провалов напряжений на шинах 10 кВ являются короткие замыкания на стороне 110 кВ. На практике средствами микропроцессорной релейной защиты обычно фиксируют провалы напряжений на вводах подстанции глубокого ввода 110 кВ. С учетом того, что соединения обмоток трансформаторов 110/10 кВ выполняют по схеме Y/Δ , соотношения между величинами остаточных напряжений на стороне высокого и низкого напряжений не имеют пропорциональной зависимости. В настоящей работе, используя известную методику [12], рассчитывают напряжения на стороне 10 кВ при различных сочетаниях остаточных напряжений на стороне 110 кВ.

В качестве примера рассмотрен случай снижения напряжения 110 кВ фазы А на 50 %, векторные диаграммы линейных и фазных напряжений приведены на рис. 4, а. Линейные напряжения питающей сети на стороне 10 кВ, как видно из рис. 4, б, составляют при этом соответственно 0,93; 0,93 и 0,67 от первоначальных значений. Фазные напряжения на входных зажимах активного выпрямителя формируются методом ШИМ (рис. 3) как сумма прямой и обратной последовательностей по первой гармонике (рис. 4, в), в относительных величинах они составляют 0,83 и 0,17. Результирующие фазные напряжения на входе активного выпрямителя, приведенные на рис. 4, г, образуют несимметричную систему с различными значениями коэффициентов модуляции 0,63; 0,63 и 0,83.

В табл. 2 приведены результаты расчетов коэффициентов модуляции, необходимых для обработки провалов питающего напряжения при сохранении устойчивой работы активного выпрямителя. Рассматривались три варианта провалов напряжения на стороне 110 кВ при следующих аварийных ситуациях: однофазные КЗ, двухфазные симметричные КЗ и двухфазные несимметричные КЗ. Для однофазного КЗ указаны остаточные напряжения $U_{ост}$ только для одной фазы, в которой наблюдается ПН; для двухфазных симметричных КЗ имеют место одинаковые провалы напряжения в

Таблица 2

Значения коэффициентов модуляции μ в исходной схеме при различных вариантах провалов напряжений, вызванных короткими замыканиями на стороне 110 кВ

Однофазное КЗ				Двухфазное КЗ								
				симметричное					несимметричное			
$U_{ост},$ о.е.	μ по фазам			$U_{ост},$ о.е.	μ по фазам			$U_{ост1},$ о.е.	$U_{ост2},$ о.е.	μ по фазам		
	1	2	3		1	2	3			1	2	3
0,8	0,75	0,83	0,75	0,8	0,66	0,75	0,75	0,8	0,90	0,71	0,79	0,75
0,7	0,71	0,83	0,71	0,7	0,58	0,71	0,71	0,7	0,85	0,65	0,77	0,71
0,6	0,67	0,83	0,67	0,6	0,50	0,67	0,67	0,6	0,80	0,58	0,75	0,67
0,5	0,63	0,83	0,63	0,5	0,42	0,63	0,63	0,5	0,75	0,52	0,73	0,63
0,4	0,60	0,83	0,60	0,4	0,33	0,60	0,60	0,4	0,70	0,46	0,71	0,60
0,3	0,56	0,83	0,56	0,3	0,25	0,56	0,56	0,3	0,65	0,41	0,69	0,56
0,2	0,53	0,83	0,53	0,2	0,17	0,53	0,53	0,2	0,60	0,35	0,67	0,53

Таблица 3

Значения коэффициентов модуляции μ с учетом корректирующего сигнала при различных вариантах провалов напряжений, вызванных короткими замыканиями на стороне 110 кВ

Однофазное КЗ				Двухфазное КЗ								
				симметричное					несимметричное			
$U_{ост},$ о.е.	μ по фазам			$U_{ост},$ о.е.	μ по фазам			$U_{ост1},$ о.е.	$U_{ост2},$ о.е.	μ по фазам		
	1	2	3		1	2	3			1	2	3
0,8	0,78	0,78	0,78	0,8	0,72	0,72	0,72	0,8	0,90	0,75	0,75	0,75
0,7	0,76	0,76	0,76	0,7	0,67	0,67	0,67	0,7	0,85	0,71	0,71	0,71
0,6	0,73	0,73	0,73	0,6	0,63	0,63	0,63	0,6	0,80	0,68	0,68	0,68
0,5	0,71	0,71	0,71	0,5	0,60	0,60	0,60	0,5	0,75	0,65	0,65	0,65
0,4	0,70	0,70	0,70	0,4	0,58	0,58	0,58	0,4	0,70	0,62	0,62	0,62
0,3	0,68	0,68	0,68	0,3	0,59	0,59	0,59	0,3	0,65	0,60	0,60	0,60
0,2	0,66	0,66	0,66	0,2	0,68	0,68	0,68	0,2	0,60	0,59	0,59	0,59

двух фазах, характеризующиеся величиной остаточного напряжения $U_{ост}$, приведенного в табл. 2. Для двухфазных несимметричных КЗ приняты величины провалов напряжения по фазам в соответствии с соотношением $\delta U_{п1} = 2\delta U_{п2}$, поэтому в таблице указаны различные величины остаточных напряжений $U_{ост1}$, $U_{ост2}$.

Как видно из приведенных результатов, устойчивый режим работы АВ сохраняется при снижении напряжения до величины 0,6 о.е. для случая однофазного короткого замыкания, и соответственно до 0,8 и 0,7 о.е. при двухфазных симметричных и несимметричных коротких замыканиях. Соответствующие строки выделены в табл. 2 серым цветом.

Одним из вариантов повышения устойчивости работы активных выпрямителей является обеспечение равенства коэффициентов модуляции по фазам. Это достигается тем, что помимо фазных напряжений прямой и обратной последовательностей на входе активного выпрямителя дополнительно формируется корректирующий сигнал, одинаковый для всех трех фаз – напряжение нулевой последовательности. Результирующая система векторов трехфазных напряжений на входе активного выпрямителя приведена на рис. 4, д.

Для расчета коэффициента модуляции с учетом корректирующего сигнала, обеспечивающего

равенство фазных напряжений, воспользуемся известными геометрическими соотношениями, связывающими площадь треугольника S с его сторонами a, b, c и радиусом описанной окружности R :

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)};$$

$$S = \frac{abc}{4R},$$

где $p = (a + b + c)/2$.

Как следует из рис. 4, д, радиус описанной окружности R в относительных единицах соответствует искомому коэффициенту модуляции, одинаковому для всех трех фаз. Для его расчета в вышеприведенных формулах стороны треугольника принимают равными линейным напряжениям U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} (рис. 4, б) на стороне 10 кВ, выраженным в относительных единицах.

Результаты расчета коэффициентов модуляции с учетом корректирующего сигнала, приведенные в табл. 3, показывают, что диапазон остаточных напряжений, при котором активный выпрямитель сохраняет устойчивость, существенно расширился: для однофазных провалов напряжения до 0,2; для двухфазных – до 0,7 (симметричное КЗ) и до 0,5 (несимметричное КЗ).

Заключение

1. На основе системного подхода проведен анализ различных способов повышения устойчи-

ности электроприводов непрерывного производства при провалах напряжения.

2. Показано, что поставленная задача может быть решена за счет введения дополнительного корректирующего сигнала на входе активного выпрямителя и формирования трёхфазной системы напряжений с амплитудами и коэффициентами модуляции, одинаковыми по трем фазам. В результате электропривод сохраняет устойчивость при различных провалах напряжения питающей сети и значительно меньшем уровне остаточных напряжений.

Литература

1. Энергосбережение в теплоэнергетическом хозяйстве города средствами регулируемого электропривода: моногр. / Ю.А. Крылов, В.Н. Медведев, А.С. Карандаев, Г.П. Корнилов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогор. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. – 202 с.

2. Способы повышения устойчивости частотно-регулируемых электроприводов при нарушениях электроснабжения / А.С. Карандаев, Р.Р. Храмшин, Т.Р. Храмшин и др. // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2013. – № 1. – С. 12–21.

3. Системы бесперебойного электропитания особо ответственных потребителей с частотно-регулируемым электроприводом / В.В. Ровнейко, Р.Р. Галлямов, Г.П. Корнилов и др. // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2011. – № 4. – С. 51–53.

4. Способы повышения устойчивости частотно-регулируемых электроприводов при нарушениях электроснабжения / Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, О.И. Карандаева и др. // *Вестник МГТУ. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ»*, 2011. – № 4. – С. 79–84.

5. Особенности электроснабжения металлургического завода «ММК-МЕТАЛУРЛ» / Г.П. Корни-

лов, А.А. Николаев, А.В. Ануфриев и др. // *Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ*, 2012. – Вып. 20. – С. 235–239.

6. Проблемы внедрения частотно-регулируемых электроприводов на ответственных механизмах тепловой электростанции / Ю.А. Крылов, И.А. Селиванов, А.С. Карандаев и др. // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2011. – № 4. – С. 19–25.

7. Проблемы качества внутриводского электроснабжения и их решение на примере ОАО «ММК» / Ю.П. Журавлев, А.Ю. Коваленко, Г.П. Корнилов и др. // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2011. – № 4. – С. 26–30.

8. Библия электрика: ПУЭ, МПОТ, ПТЭ. – М.: Эксмо, 2010. – 752 с.

9. Исследование воздействия активных выпрямителей большой мощности на питающую сеть / Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев и др. // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета*. – 2013. – № 1. – С. 80–83.

10. Храмшин, Т.Р. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов / Т.Р. Храмшин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2013. – № 2. – С. 48–53.

11. Haijun, T. Study of Control Strategy Based Dual-PWM Converter under Unbalanced Input Voltage Condition / T. Haijun, H. Di // *Advances in Electronic Engineering, Communication and Management Vol. 1, Lecture Notes in Electrical Engineering*. – 2012. – Vol. 139. – P. 267–272.

12. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А. Ульянов. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.

Храмшин Тимур Рифхатович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и электротехнические системы», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; timur.hramshin@mail.ru.

Корнилов Геннадий Петрович, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; korn_mgn@mail.ru.

Крубцов Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры «Электротехника и электротехнические системы», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; vozburk@mail.ru.

Николаев Александр Аркадьевич, канд. техн. наук, докторант, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; alexniko@inbox.ru.

Карандаева Ольга Ивановна, канд. техн. наук, кафедра «Электротехника и электротехнические системы», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; oikagan@mail.ru.

Журавлев Петр Юрьевич, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; korn_mgn@mail.ru.

Поступила в редакцию 15 апреля 2014 г.

**ENHANCES THE STABILITY OF ELECTRIC DRIVES
OF CONTINUOUS PRODUCTION IN VOLTAGE SAGS**

T.R. Khramshin, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk,
Russian Federation, timur.hramshin@mail.ru,

G.P. Kornilov, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk,
Russian Federation, korn_mgn@mail.ru,

D.S. Krubtsov, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk,
Russian Federation, vozburk@mail.ru,

A.A. Nikolaev, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk,
Russian Federation, alexniko@inbox.ru,

O.I. Karandaeva, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk,
Russian Federation, oikaran@mail.ru,

P.Yu. Zhuravlev, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk,
Russian Federation, korn_mgn@mail.ru

The short-time voltage dips cause electric drive cutoff and technological regime impairments. The researches on the different metallurgical enterprises show that a voltage dip value distribution has a random character. Generally, these voltage sags are caused by one-phase faults. The technical solutions decreasing an occurrence probability of voltage sags at the OAO "Magnitogorsky metallurgichesky kombinat" (OJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works) are described. These technical solutions imply division of 110 kV loop networks of interior plant power supply into independent circuits, essential direct connection to 6-10 kV generator voltage of house-service low-power stations, using free-running generator as independent power supply. The analysis of the cold strip mill synchronous electric drives with AFE frequency converters is performed. The different variants of active rectifier control algorithms with adaptation to asymmetrical power supply voltage are described. In this case the negative sequence voltage is used as a correction signal for forming of three-phase voltages at the input of the frequency converter. The vector diagrams of line and phase voltages for a situation of 50 % voltage drop are shown. The calculation results of the modulation indexes necessary for voltage sag compensation and saving of the frequency converter stability are given. The limits of the frequency converter stability work for one-, two- and three-phase faults are determined. The variant of the stability increasing for active rectifiers by means of modulation indexes equality for each phases are described. It is shown that range of the residual voltages in which the active rectifier preserves stability is expanding. In general, realization of these methods helps to keep converter stability with smaller value of the residual voltages.

Keywords: voltage sag, modulation index, active rectifier, pulse-width modulation.

References

1. Krylov Yu.A., Medvedev V.N., Karandaev A.S., Kornilov G.P. *Energoberezhenie v teploenergeticheskoy khozyaystve goroda sredstvami reguliruemogo elektroprivoda* [Energy saving in the heat and power facilities of the town using controlled electric drives]. Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University Publ., 2012. 202 p.

2. Karandaev A.S., Khramshin R.R., Khramshin T.R., Khramshin V.R., Gubaidullin A.R. [Methods of improving variable-frequency electric drives robustness during power supply interruptions]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Machine building: network electronic scientific journal]. 2013, no.1, pp. 12–21. (in Russ.)

3. Rovnejko V.V., Galljamov R.R., Kornilov G.P., Khramshin T.R., Slavgorodskij V.B. [Uninterruptible Power Supply Particularly Important Consumers with a Frequency-Controlled Electric]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Proceedings of the higher educational institutions. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 51–53. (in Russ.)

4. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Karandaeva O.I., Gubaidullin A.R., Galljamov R.R. [Ways to improve the stability of variable frequency drives at disturbances power supply]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Technicheskogo Universiteta* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 4, pp. 79–84. (in Russ.)

5. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Anufriyev A.V. [Features electric power supply metallurgical plant “ММК-МЕТАЛУРЖИ”], *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы [Electrical Systems and Complexes]*. Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University, 2012, vol. 20, pp. 235–239. (in Russ.)

6. Krylov Y.A., Selivanov I.A., Karandaev A.S. [Problems of implementation of variable frequency drives on the mechanisms responsible thermal power plant]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika [Sci. electromechanics]*, 2011, no. 4, pp. 19–25. (in Russ.)

7. Zhuravlev Y.P., Kovalenko A.Y., Kornilov G.P., Slavgorodsky V.B., Nikolaev A.A., Hramshin T.R. [Quality problems of intrafactory electric power supply and their solutions by the example of OJSC “ММК”]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika [Sci. electromechanics]*, 2011, no. 4, pp. 26–30. (in Russ.)

8. *Bibliya elektriķa: PUE, MPOT, PTE* [Bible of electrician: *PUE, MPOT, PTE*]. Moscow, Eksmo Publ., 2010. 752 p.

9. Khramshin T.R., Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khramshin R.R., Krubtsov D.S. [Investigation of the influence high power active front end rectifier], *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of Ivanovo State Power University], 2013, no.1, pp. 80–83. (in Russ.)

10. Hramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. Evaluation of methods PWM voltage active rectifiers rolling mills. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2013, no. 2, pp. 48–53. Available at: <http://industrial-engineering.ru/issues/2013/2013-2.pdf>.

11. Haijun T., Di H. Study of Control Strategy Based Dual-PWM Converter under Unbalanced Input Voltage Condition, *Advances in Electronic Engineering, Communication and Management. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, vol. 139, pp. 267–272. (in Russ.)

12. Ulyanov S.A. *Elektromagnitnyye perekhodnyye protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromagnetic transient processes in power systems]. Moscow, Energiya Publ., 1970. 520 p.

Received 15 April 2014