

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Николаев А.А.<sup>1</sup>, Корнилов Г.П.<sup>1</sup>, Храмшин Т.Р.<sup>1</sup>, Никифоров Г.<sup>2</sup>, Муталлапова Ф.Ф.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup> ЗАО «Магнитогорскгазстрой», Магнитогорск, Россия; Земмеринг, Австрия

### Аннотация

**Постановка задачи (актуальность работы):** современные мощные электроприводы прокатных станов выполняются на базе синхронных и асинхронных двигателей и преобразователей частоты (ПЧ), построенных по симметричной схеме с активными выпрямителями (АВ) и инверторами напряжения. Характерной особенностью АВ является генерирование высокочастотных гармоник напряжения и тока с номерами выше 40-й, что обусловлено применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для управления силовыми ключами. В системах внутризаводского электропитания металлургических заводов со средним объемом производства (1–2 млн тонн стали в год) используется протяженные распределительные сети среднего напряжения 6–35 кВ. При большой длине кабельных линий суммарное значение распределенной емкости кабелей может достигать нескольких микрофарад. В результате взаимодействия индуктивности сетевого трансформатора и емкостей кабелей в частотной характеристике сети возникает резонанс токов, амплитуда которого при большой величине емкости кабелей может располагаться в области частот высших гармоник, генерируемых АВ. В этом случае возникают сильные высокочастотные искажения напряжения на общих секциях распределительных устройств, что может приводить к выходам из строя преобразователей частоты из-за появления ошибок в работе блоков формирования управляющих импульсов силовых ключей АВ. По этой причине актуальной задачей является исследование различных способов обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) мощных ПЧ с АВ в условиях наличия резонансов токов в частотной характеристике питающей сети. **Цель работы:** в работе исследуются причины возникновения сильных искажений напряжения в сети 10 кВ внутризаводского электропитания металлургического предприятия, где установлены мощные электроприводы клетей прокатного стана, построенные на базе многоуровневых преобразователей частоты с активными выпрямителями. На основании экспериментальных исследований и результатов математического моделирования предложены способы обеспечения электромагнитной совместимости ПЧ с питающей сетью. **Используемые методы:** обработка экспериментальных данных осуществлялась в математическом пакете Matlab с приложением Simulink, где с помощью методов спектрального анализа и разработанных алгоритмов обработки сигналов осуществлялся расчет основных коэффициентов гармонических составляющих напряжения сети 10 кВ. Для исследования способов коррекции частотной характеристики сети 10 кВ использовалось математическое моделирование системы внутризаводского электропитания. **Новизна.** В настоящее время проблема обеспечения ЭМС мощных ПЧ с АВ является малоизученной и слабо освещена в отечественной и зарубежной литературе. В связи с этим результаты исследования, представленные в работе, обладают новизной, теоретической и практической значимостью. **Результат:** основным результатом исследований является рекомендация по использованию специализированного корректирующего фильтра для обеспечения сдвига резонанса токов в безопасную область частотной характеристики 10 кВ, где отсутствуют значимые гармоники силовых преобразователей. **Практическая значимость:** результаты исследований могут быть использованы при проектировании систем электропитания промышленных предприятий для осуществления правильного выбора конфигурации электрических сетей среднего напряжения, а также при решении проблем качества электроэнергии на действующих предприятиях, где при работе мощных ПЧ с АВ возникают сильные высокочастотные искажения напряжения.

**Ключевые слова:** преобразователь частоты, активный выпрямитель, высшие гармоники, качество электроэнергии, электромагнитная совместимость, резонанс токов, фильтр высших гармоник.

### Введение

Современные регулируемые электроприводы выполняют, как правило, на переменном токе с

преобразователями частоты на полностью управляемых ключах – IGBT-транзисторах или запираемых тиристорах.

Применение широтно-импульсной модуляции и интеллектуальных систем управления обеспечивает регулирование напряжения по величине, фазе и частоте в широких пределах. Бла-

© Николаев А.А., Корнилов Г.П., Храмшин Т.Р., Никифоров Г., Муталлапова Ф.Ф., 2016

годаря этому такой электроприемник, как элемент системы электроснабжения, работает в четырех квадрантах комплексной плоскости с коэффициентом мощности, близким к единице.

В нормативных документах и ГОСТ на качество электроэнергии воздействие мощных преобразователей на сеть обычно оценивают по изменениям величины и формы (синусоидальности) питающего напряжения, используя следующие показатели:

- отклонение и колебание напряжения (фликер);
- общее содержание высших гармоник напряжения, характеризуемое суммарным коэффициентом гармонических составляющих напряжения (Total Harmonic Distortion):

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

- значения отдельных коэффициентов гармонических составляющих напряжения:

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100\% \text{ при } n \leq 40, \quad (2)$$

где  $n$  – номер гармоники;  $U_1$  – действующее значение напряжения основной гармоники.

С точки зрения электромагнитной совместимости преобразователь частоты с ШИМ имеет несколько принципиальных отличий от тиристорных преобразователей (ТП) постоянного тока, широко применявшихся ранее [1–3].

Ввиду отсутствия изменений реактивной мощности в переходных режимах величина питающего напряжения в точке подключения преобразователя частоты практически не зависит от его режима работы, т.е. отклонения и колебания напряжения обычно не учитывают.

Преобразователь с ШИМ, как источник напряжения, в отличие от ТП постоянного тока создает искажения питающего напряжения независимо от режима работы, это значит, на холостом ходу и под нагрузкой суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения  $K_U$  остается практически одинаковым. При этом в составе токов и напряжений со стороны питающей сети наряду с низкочастотными гармониками (5, 7, 11, 13) присутствуют гармоники средних частот (53–55, 71, 73).

С учетом значительной протяженности кабельных линий, обладающих распределенной емкостью, последнее обстоятельство нередко приводит к возникновению резонансных явле-

ний в указанном диапазоне средних частот даже при отсутствии конденсаторных батарей. Резонанс токов создает значительные искажения напряжения и, как следствие, нарушается работоспособность электроприемников с недостаточной помехоустойчивостью, что приводит в итоге к аварийным отключениям и простоям оборудования [4–6, 16].

### 1. Результаты экспериментальных исследований гармонического состава напряжения в сети 10 кВ металлургического предприятия с мощными электроприводами клеток сортового стана, выполненных на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями

Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований ЭМС преобразователей различных классов, работающих в составе непрерывного металлургического агрегата – прокатно-проволочного стана. Такие станы, в комплексе с мощными ДСП, введены в эксплуатацию в различных режимах РФ за последнее время.

Стан включает от 10 до 18 клеток с приводными двигателями мощностью 500–1500 кВт. Каждый из них управляется индивидуальным инвертором, а со стороны постоянного тока несколько инверторов подключают к групповому выпрямителю. Обычно групповой выпрямитель выполняют на диодах, и такое исполнение является вполне оправданным с точки зрения помехоустойчивости и функциональной надежности. Наряду с этим встречаются модифицированные, более усовершенствованные конструкции, в которых параллельно диодам включены IGBT-транзисторы для рекуперации энергии в тормозных режимах, как это сделано, например, по технологии SMART в преобразователях фирмы Siemens [7]. В двигательном режиме работы электропривода ток протекает только по диодам, транзисторы закрыты, поскольку напряжение в звене постоянного тока меньше мгновенных значений напряжения сети. В тормозных режимах напряжение звена постоянного тока вырастает и оказывается больше напряжения сети, как следствие, диоды мостовой схемы закрываются, а ток протекает через транзисторы. На холостом ходу ток протекает попеременно – часть периода времени через диоды, часть – через транзисторы, в зависимости от соотношения двух указанных напряжений. Такое исполнение, как показывает практика, является менее помехоустойчивым.

Ниже на конкретном примере построения схемы электроснабжения одного из проволочных станков показано взаимодействие групповых диодно-

транзисторных выпрямителей и мощного преобразователя, выполненного по схеме «трансформатор – двухзвенный преобразователь частоты с трехуровневым инвертором напряжения – асинхронный двигатель», т.е. по классической схеме активного выпрямителя (рис. 1) [8, 9, 12]. Стан включает 18 клеток с приводными двигателями мощностью 630–1300 кВт и скоростной прокатный блок с асинхронным двигателем мощностью 6300 кВт, управляемый активным выпрямителем. На общие шины 10 кВ подключены восемь трансформаторов мощностью  $S = 3,5$  МВА, питающие групповые диодно-транзисторные выпрямители и трансформатор  $S = 7,2$  МВА активного выпрямителя фирмы Toshiba Mitsubishi – Electric Industrial Corporation (TMEIC).

Преобразовательные трансформаторы диодных выпрямителей разбиты на две группы и выполнены с различными схемами (группами) соединения обмоток: у одной половины – «треугольник-звезда»  $\Delta/Y-11$ , у другой – «треугольник-треугольник»  $\Delta/\Delta - 0$ . Благодаря этому частично скомпенсированы гармоники, характерные для 6-пульсных схем выпрямления – 5, 7...17, 19 (рис. 2). Содержание высших гармоник в линейном напряжении на шинах 10 кВ находится на уровне 2%.

Ситуация существенно меняется при включении активного выпрямителя – преобразователя TMEIC. Общее содержание высших гармоник

$K_{U\Sigma} = (\sqrt{U^2 - U_1^2}) \cdot 100\% / U_1$  на шинах 10 кВ приближается к 10%, а это весьма отрицательно отражается на устойчивости систем управления диодно-транзисторных выпрямителей и другого оборудования, подключенного к общим шинам 10 кВ. Здесь следует отметить, что действующие в России стандарты на качество электроэнергии (ГОСТ 54149-2010, ГОСТ 32144-2013), а также международные стандарты (EN 50160 и EN 61000-2-2) при расчете суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения учитывают гармоники до 40-го порядка в соответствии с формулой (1).

По характеру изменения линейного напряжения и его гармоническому составу (рис. 3) следует предположить, что в диапазоне частот, кратном 53–65 гармоникам, имеет место резонанс токов [10, 11]. Он создается в контуре, образованном индуктивным сопротивлением рассеяния сетевого трансформатора 110/10 кВ и совокупной емкостью кабельных линий на 10 кВ.

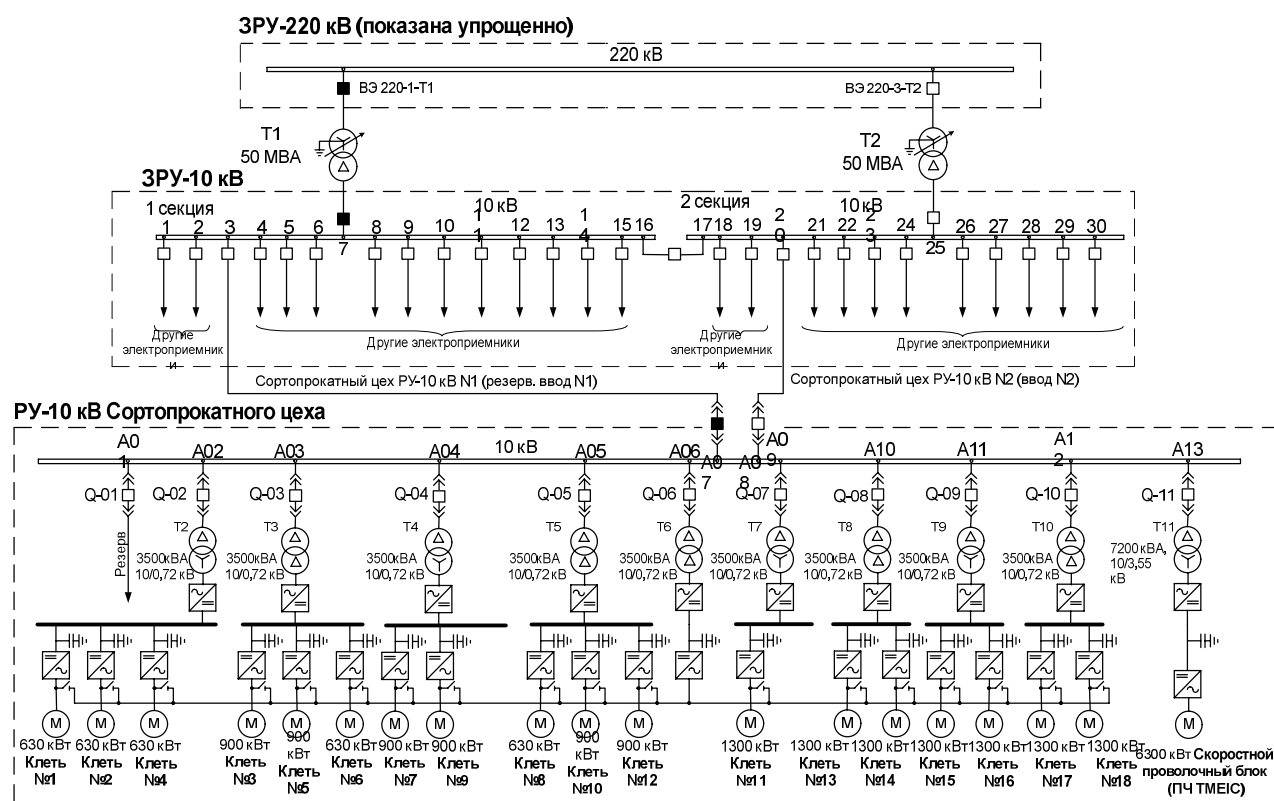


Рис. 1. Схема электроснабжения главных приводов сортового стана

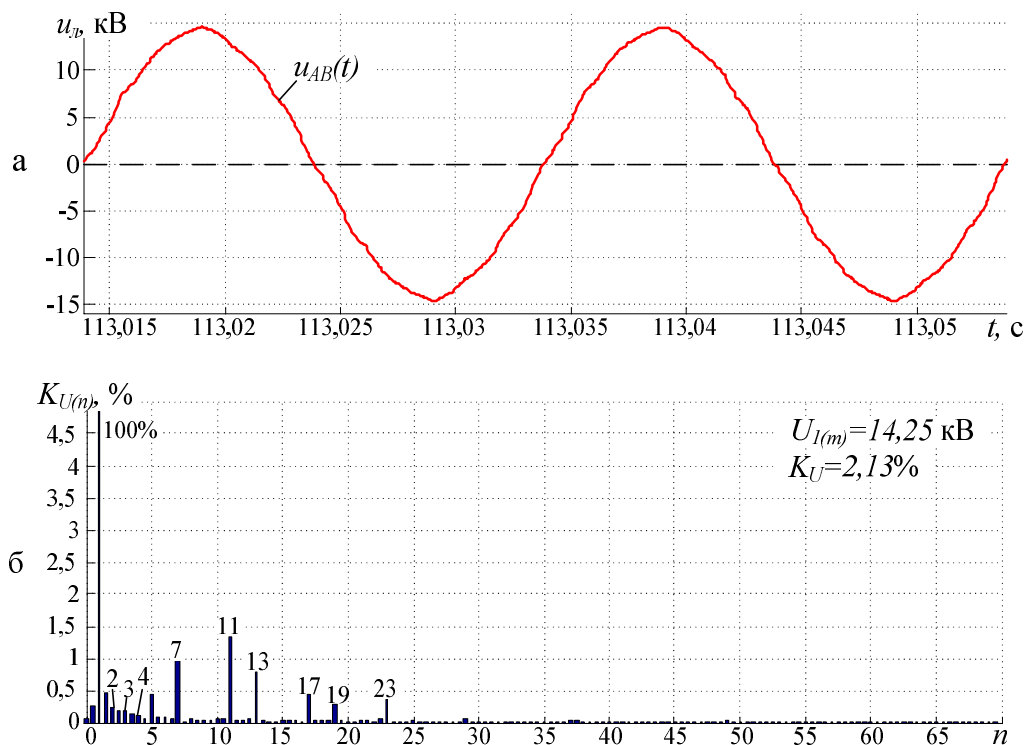


Рис. 2. Мгновенные значения линейного напряжения на шинах 10 кВ (а) и его гармонический состав (б) при работе групповых диодных выпрямителей

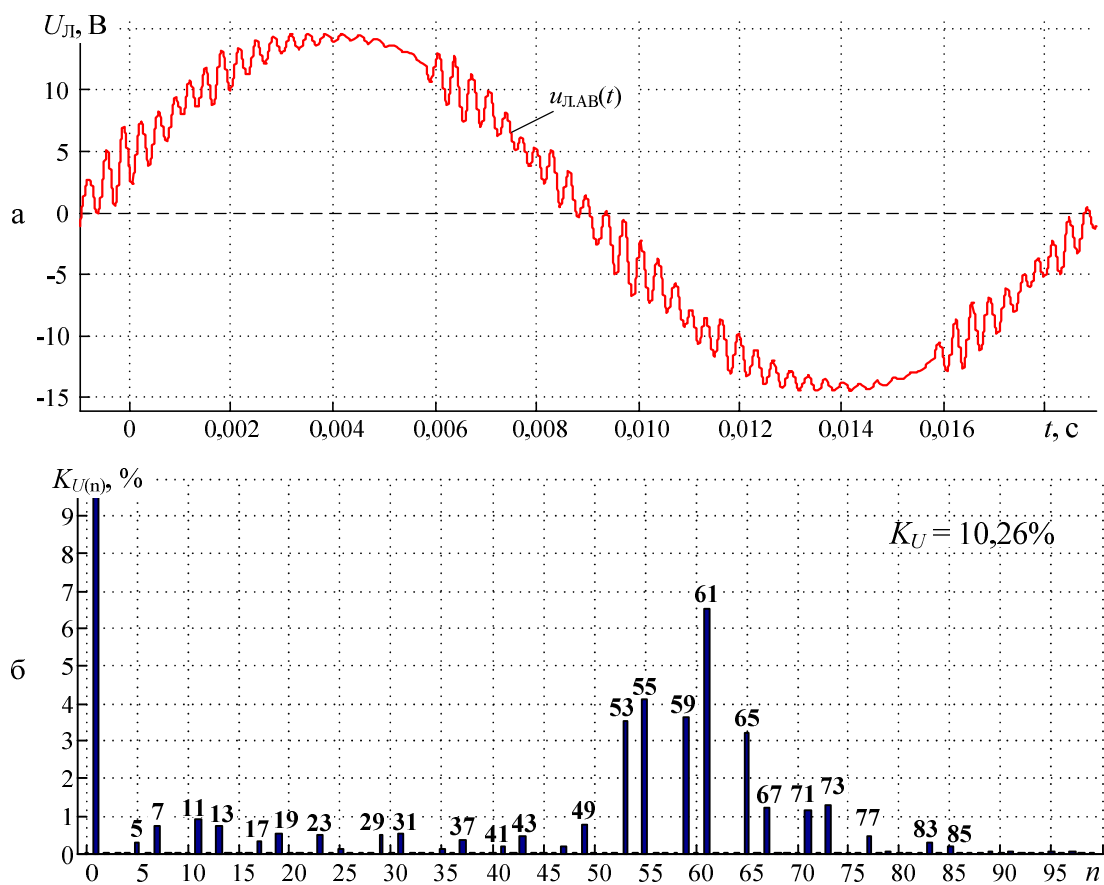


Рис. 3. Мгновенные значения линейного напряжения на шинах 10 кВ (а) и его гармонический состав (б) при работе ТМЕИСЗ

## 2. Экспериментальное исследование частотной характеристики сети 10 кВ внутризаводского электроснабжения

Для подтверждения выдвинутой гипотезы выполнен пассивный эксперимент с целью получения частотной характеристики сети – зависимости полного сопротивления (импеданса) от частоты  $Z(f)$  (рис. 4). В качестве генератора сигналов успешно использован активный выпрямитель преобразователя ТМЕИС, частотный диапазон которого намного превышает область резонанса, а для записи мгновенных значений токов и напряжений установлены быстродействующие регистраторы сигналов Elspec G 4720 и Flash-Recorder с достаточным объемом памяти.

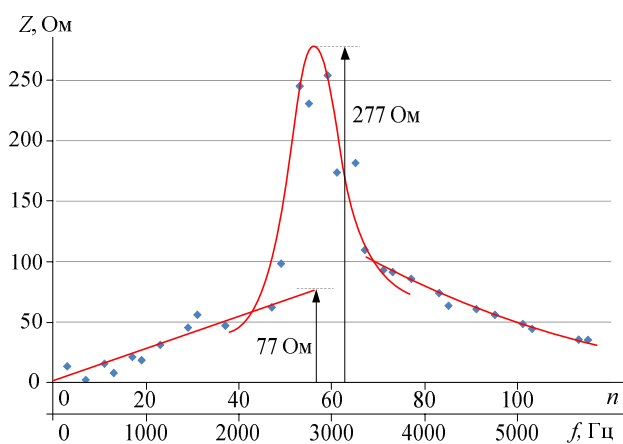


Рис. 4. Частотная характеристика сети – зависимость полного сопротивления (импеданса) от частоты (номера гармоники), точками показаны экспериментальные данные, сплошными линиями – их аппроксимация

Несложные расчеты позволяют ориентировочно оценить резонансную частоту  $\nu$ , зная параметры сетевого трансформатора, а также общую длину и емкость  $C_{\text{КЛ}}$  кабельных линий на стороне 10 кВ:

$$\nu \cdot X_T = \frac{X_{\text{КЛ}}}{\nu}; \quad (3)$$

$$\nu = \sqrt{\frac{X_{\text{КЛ}}}{X_T}}; \quad (4)$$

$$X_T = u_{\text{к}} \cdot \frac{U^2}{S_{\text{НТ}}}; \quad (5)$$

$$X_{\text{КЛ}} = \frac{1}{\omega \cdot C_{\text{КЛ}}}, \quad (6)$$

где  $X_T$ ,  $X_{\text{КЛ}}$  – индуктивное сопротивление транс-

форматора и емкостное сопротивление кабельных линий;  $U$ ,  $\omega$  – напряжение и частота питающей сети;  $u_{\text{к}}$ ,  $S_{\text{НТ}}$  – напряжение короткого замыкания и мощность сетевого трансформатора 110/10 кВ;

$$\nu = \sqrt{\frac{S_{\text{НТ}}}{u_{\text{к}} \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C_{\text{КЛ}}}} = \sqrt{\frac{S_{\text{НТ}}}{u_{\text{к}} \cdot Q_{\text{КЛ}}}}, \quad (7)$$

где  $Q_{\text{КЛ}} = U^2 \cdot \omega \cdot C_{\text{КЛ}}$  – реактивная мощность кабельных линий.

Метод частотных характеристик становится более универсальным и эффективным при использовании математических моделей систем электроснабжения. В этом случае он позволяет анализировать различные варианты схем и выявлять возможные резонансы как на стадии проектирования, так и эксплуатации действующего оборудования [12, 14].

## 3. Исследование возможных способов коррекции частотной характеристики сети 10 кВ для исключения сильных искажений синусоидальности кривой напряжения при работе мощных ПЧ с АВ

Проблема обеспечения ЭМС в широком плане для проектируемых и реконструируемых объектов заслуживает отдельного рассмотрения. В данной работе для уменьшения воздействия активного выпрямителя в существующей схеме электроснабжения принято наиболее простое и реализуемое решение – коррекция частотной характеристики, т.е. смещение резонансного максимума в ту область, где отсутствуют гармоники, генерируемые ТП и активным выпрямителем. [13, 14–16]. На рис. 5 приведена частотная характеристика существующей схемы электроснабжения проволочного стана, полученная с помощью пакета Matlab с приложением Simulink. При создании модели приняты следующие допущения:

- активный выпрямитель ТМЕИС представлен источником напряжения, у которого гармонический состав тока близок к реальному;
- групповые диодные выпрямители реализованы в виде источников тока, параметры которых определены в результате эксперимента;
- кабельные линии на модели представлены с помощью П-образных схем замещения с учетом активного сопротивления, индуктивности и емкостей в начале линии и конце в виде так называемых «П-секций», параметры которых рассчитывают на основе известных удельных величин  $r_0$ ,  $l_0$ ,  $C_0$  в соответствии с маркой кабеля и его длиной;
- остальные электроприемники представлены эквивалентными линейными моделями в виде активно-индуктивных сопротивлений с фик-



сированными параметрами.

Для рассматриваемой схемы электроснабжения емкость кабельных линий находится в пределах  $C_{\text{кл}} = 2,8\text{--}3$  мкФ, что соответствует изменению резонансной частоты в диапазоне  $\nu = 57\text{--}61$ .

На частотной характеристике (см. **рис. 5**) заштрихованы области, в которых появление резонансов недопустимо – это низкочастотная область  $f = 250\text{--}650$  Гц ( $n = 5\text{--}13$ ) и диапазон средних частот  $f = 2450\text{--}3850$  Гц ( $n = 49\text{--}77$ ).

Для коррекции частотной характеристики, т.е. исключения резонанса токов в указанных диапазонах, обоснованы рекомендации включения на шины 10 кВ дополнительной емкости в составе УКРМ-750 (устройство компенсации реактивной мощности 750 кВАр). При этом важным моментом является значение индуктивности реактора УКРМ. Эффект значительного сдвига резонанса тока возможен только при низких значениях  $L_p$ , не превышающих нескольких сотен микрогенри.

При использовании УКРМ-750 резонансная частота будет составлять

$$\nu = \sqrt{\frac{S_{\text{HT}}}{u_k(Q_{\text{КБ}} + Q_{\text{КЛ}})}} = \sqrt{\frac{50 \cdot 10^6}{0,155(750 + 94,2) \cdot 10^3}} = 19,5, \quad (8)$$

где  $S_{\text{HT}} = 50$  МВА,  $u_k = 15,5\%$ ,  $Q_{\text{КБ}} = 750$  кВАр,  $Q_{\text{КЛ}} = U^2 \cdot \omega \cdot C_{\text{КЛ}} = 94,2$  кВАр.

Скорректированная частотная характеристика с включенной конденсаторной установкой приведена на **рис. 6**. Кривая мгновенных значений напряжения близка по форме к синусоиду (**рис. 7**). Суммарный коэффициент высших гармонических составляющих в данном случае не превышает 3%.

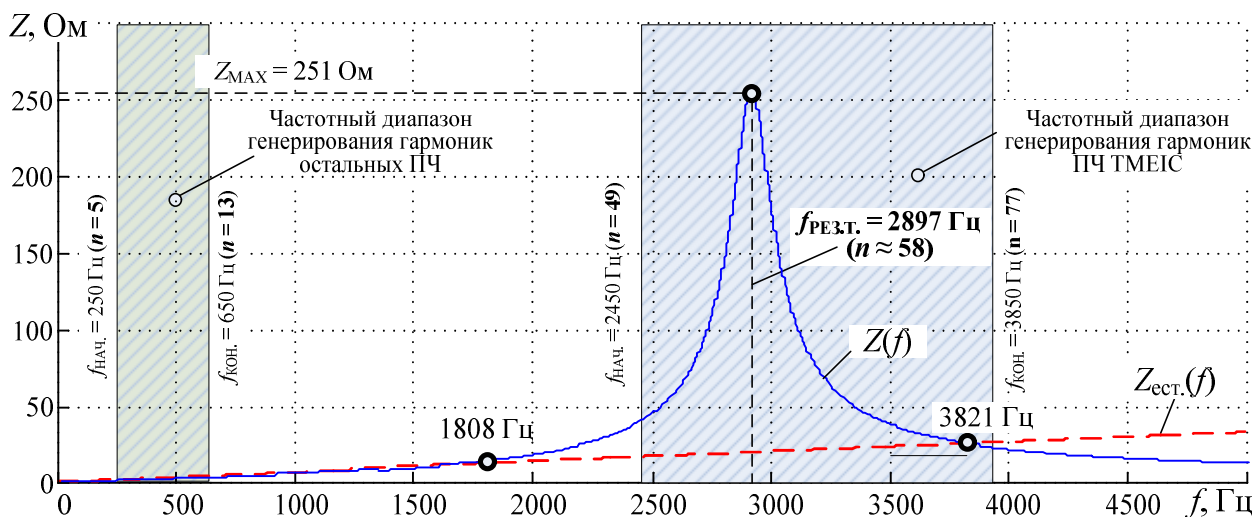


Рис. 5. Исходная частотная характеристика сети 10 кВ при существующей конфигурации

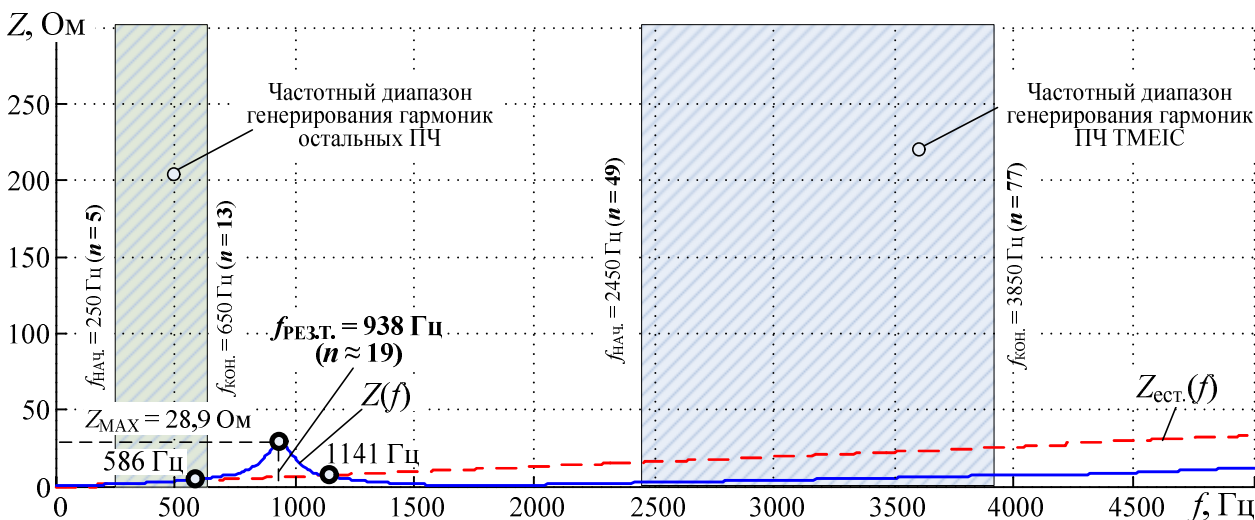


Рис. 6. Частотная характеристика сети 10 кВ после включения УКРМ-750

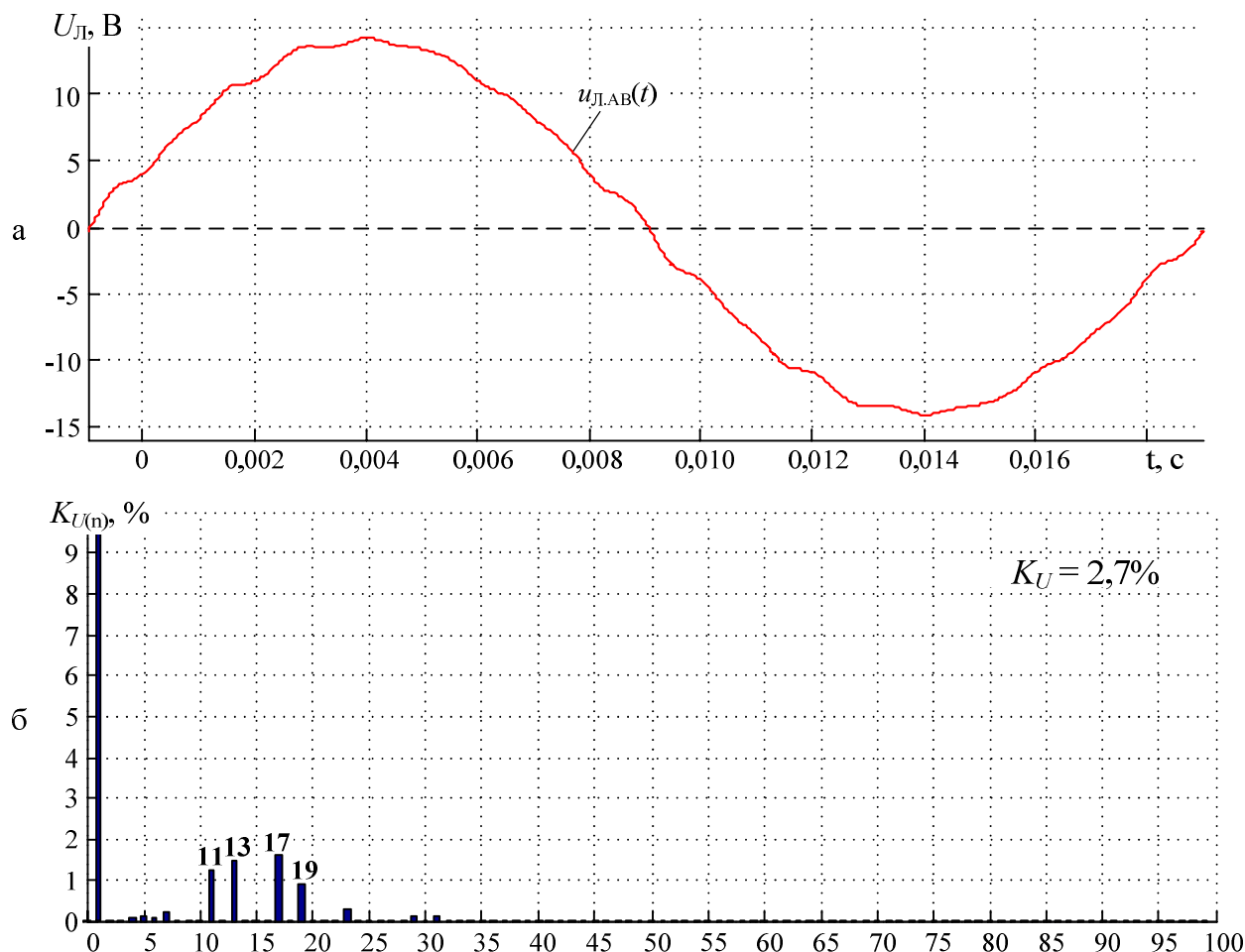


Рис. 7. Мгновенные значения линейного напряжения на шинах 10 кВ (а) и гармонический состав (б) напряжения при включении УКРМ-750

### Выводы

1. При выборе схем электроснабжения с мощными электроприводами, имеющими в своем составе преобразователи частоты с активными выпрямителями, следует учитывать частотный диапазон генерируемых гармоник и частотную характеристику сети. При неправильном выборе конфигурации внутривзаводского электроснабжения может возникнуть наложение частотного диапазона гармоник, генерируемых активными выпрямителями, на частотную область характеристики питающей сети, где имеет место резонанс тока, образованный взаимным влиянием индуктивности понизительного трансформатора, установленного на главной понизительной подстанции предприятия, и распределенной емкости протяженных кабельных линий. В результате этого возникают сильные искажения синусоидальности кривой напряжения, что в свою очередь может привести к выходу из строя других силовых преобразователей, получающих питание от общих секций среднего напряжения.

2. Сложность выявления резонансных явлений в условиях действующего производства вызвана периодическим изменением схемы электроснабжения электроприемников за счет проведения оперативных переключений на электрической подстанции. В зависимости от количества подключенных кабельных линий создаются условия для появления резонанса, совпадающего с частотной областью высших гармоник, генерируемых мощными активными выпрямителями преобразователей частоты. Отсутствие четкого понимания условий возникновения сильных искажений напряжения является серьезной проблемой для электротехнического персонала заводской подстанции и цехов предприятия, поскольку аварийные выходы из строя силовых преобразователей электроприводов могут происходить при неудачном сочетании включенных ячеек на главной понизительной подстанции.

3. Экспериментальное исследование искажений синусоидальности кривой напряжения при работе

мощных преобразователей частоты с активными выпрямителями усложняется из-за того, что область значимых гармоник, определяемая используемыми алгоритмами широтно-импульсной модуляции, как правило, располагается за пределом диапазона частот, учитываемыми анализаторами качества электроэнергии, функционирующими в соответствии в ГОСТ 32144-2013. В данном случае при анализе коэффициента суммарного искажения синусоидальности кривой напряжения нужно принимать во внимание высокочастотные гармоники напряжения с  $n \geq 40$ .

4. Электромагнитная совместимость преобразователей частоты с активными выпрямителями в системе электроснабжения может быть обеспечена при выполнении главного условия, а именно: частотный диапазон гармоник, генерируемых активным выпрямителем, не должен совпадать с резонансным максимумом частотной характеристики сети. Для выполнения этого условия существует несколько способов: 1) выбор частоты и метода широтно-импульсной модуляции активного выпрямителя; 2) коррекция частотой характеристики сети за счет выбора безопасной конфигурации схемы электроснабжения; 3) установка дополнительных компенсирующих устройств и фильтров.

#### Список литературы

1. 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.
2. F. Endrejat and P. Pillay, "Resonance Overvoltages in Medium Voltage Multilevel Drive System," 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, Antalya, 2007, pp. 736–741.
3. K. M. Alawasa, Y. A. R. I. Mohamed and W. Xu, "Active Mitigation of Subsynchronous Interactions Between PWM Voltage-Source Converters and Power Networks," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 1, pp. 121–134, Jan. 2014.
4. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 48–52.
5. Храмшин Т.Р., Абдулвелеев И.Р., Корнилов Г.П. Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электротехнических комплексов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2015. Т. 15, № 1. С. 82–93.
6. J. Dong, L. Rixin, W. Fei, L. Fang, W. Shuo, and D. Boroyevich, "Study of conducted EMI reduction for three-phase active front-end rectifier," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 12, pp. 3823–3831, Dec. 2011.
7. B. Piepenbreier and L. Sack, "Regenerative drive converter with line-frequency switched rectifier and without DC link components," Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual, 2004, pp. 3917–3923, vol. 5.
8. Крюков О.В. Сравнение характеристик высоковольтных преобразователей частоты электроприводов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т. 3, № 2. С. 50–56.
9. V. Miskovic, V. Blasko, T. Jahns, A. Smith and C. Romenesco, "Observer based active damping of LCL resonance in grid connected voltage source converters," 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO, 2013, pp. 4850–4856.
10. G. Shen, D. Xu, L. Cao, and X. Zhu, "An improved control strategy for grid-connected voltage source inverters with an LCL-filter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 4, pp. 1899–1906, Jul. 2008.
11. J. R. Rodriguez, J. Pontt, R. Huerta, G. Alzamora, N. Becker, S. Kouro, P. Cortes, and P. Lezana, "Resonances in a high-power active-front-end rectifier system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 2, pp. 482–488, Apr. 2005.
12. K. O'Brien, R. Teichmann and S. Bernet, "Active rectifier for medium voltage drive systems," Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE, Anaheim, CA, 2001, pp. 557–562, vol. 1.
13. M. Yuquan, Z. Lihong and H. Shufen, "Calculation of the Filter Parameters for the Aluminum Electrolysis Rectifier," Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2010 International Conference on, Changsha, China, 2010, pp. 906–910.
14. S. Chaladying, A. Charlangsut and N. Rugthaichareoncheep, "Parallel resonance impact on power factor improvement in power system with harmonic distortion," TENCON 2015 – 2015 IEEE Region 10 Conference, Macao, 2015, pp. 1–5.
15. T.M. Blooming and D.J. Carnovale, "Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits," Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, Appleton, WI, 2006, pp. 1–9.
16. J. Pontt, J. Rodriguez, J. S. Martin, R. Aguilera, R. Bernal and P. Newman, "Resonance mitigation and dynamical behavior of systems with harmonic filters for improving reliability in mining plants," Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, Tampa, FL, 2006, pp. 1298–1302.

Материал поступил в редакцию 19.10.16.

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105

## EXPERIMENTAL STUDY OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF MODERN ELECTRIC DRIVES USED IN THE POWER SUPPLY SYSTEM OF A METALLURGICAL ENTERPRISE

Aleksandr A. Nikolaev – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aa.nikolaev@magtu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5014-4852>



**Gennady P. Kornilov** – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: korn\_mgn@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2451-3850>

**Timur R. Khrumshin** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: timur.hramshin@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0129-3653>

**Gennady Nikiforov** – D.Sc. (Eng.), Chairman of the Board

Magnitogorskazstroj CJSC, Magnitogorsk, Russia; Semmering, Austria. E-mail: alexxnik@hotmail.com

**Faina F. Mutallapova** – Master Degree Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Faina\_urmanova@mail.ru

## Abstract

**Problem Statement (Relevance):** Modern high-power electric drives used in rolling mills are made on the basis of synchronous and induction motors and frequency converters (FC), which are, in turn, designed according to the symmetrical principal and include active rectifiers (AR) and inverters. A typical feature of ARs is that they generate high frequency voltage and current with harmonic numbers higher than 40, which is due to the application of the pulse width modulation (PWM) necessary to control the power keys. The in-house power supply systems of metallurgical plants with the medium output of 1 to 2 mln tons of steel per year usually rely on 6-35 kV distributed medium voltage power networks. With high cable runs, the total distributed capacitance of the cables may reach several microfarads. The interaction between the network step-down transformer inductance and the power cables capacitance causes a current resonance to occur in the network frequency characteristic. If the cable capacitance is high, the current resonance may occur in the area of high frequency harmonics generated by the AR. This can cause a considerable high-frequency voltage distortion occurring on the shared sections of the switchgear which may lead to frequency converter failures due to faults occurring in the pulse generation blocks of the active rectifier power keys. Thus, finding ways to ensure the electromagnetic compatibility (EMC) of high-power FCs and ARs in the conditions of current resonances present in the frequency characteristic of the power network presents an important problem. **Objectives:** This article focuses on identifying the causes of high voltage distortion that can occur in the 10 kV in-house power network of a metallurgical plant which houses a rolling mill with high-power electric drives designed on the basis of multi-level frequency converters with active rectifiers. Based on the results of an experimental study and mathematical simulation, the authors offered new ways to ensure the electromagnetic compatibility between the FCs and the power network. **Methods Applied:** The experimental data were processed with the help of the Matlab package comprising the Simulink application. Using the spectral analysis methods and some original data processing algorithms the main coefficients of 10 kV network voltage harmonics were calculated. The ways to improve the frequency characteristic of a 10 kV power network were examined by simulating an in-house power supply system. **Originality:** As of today, the problem of ensuring the EMC of

high-power FCs and ARs is little studied and only limitedly covered in either Russian or foreign literature. Thus the research results presented in this paper can be described as original and theoretically and practically relevant. **Findings:** This research provides recommendations on the use of a special correction filter ensuring a current resonance shift towards the safety area of the frequency characteristic of a 10 kV power network which does not have high harmonics generated by power converters. **Practical Relevance:** This research may be applicable when designing power supply systems for industrial application as it can help choose the right configuration of medium voltage power networks. This research can also be of relevance for the existing sites which face power quality issues caused by a significant high-frequency harmonic distortion of voltage resultant from the use of high-power FCs and ARs.

**Keywords:** Frequency converter, active rectifier, upper harmonics, power quality, electromagnetic compatibility, current resonance, harmonic filter.

## References

1. Kramshin T.R., Kornilov G.P., Nikolaev A.A. et al. The study of the impact produced by high-power active rectifiers on the power supply system. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University], 2013, no. 1, pp. 80–83. (In Russ.)
2. F. Endrejat and P. Pillay. Resonance Overvoltages in Medium Voltage Multilevel Drive System. IEEE International Electric Machines & Drives Conference. Antalya. 2007, pp. 736–741.
3. K. M. Alawasa, Y. A. R. I. Mohamed and W. Xu. Active Mitigation of Subsynchronous Interactions Between PWM Voltage-Source Converters and Power Networks. IEEE Transactions on Power Electronics. Jan. 2014, vol. 29, no. 1, pp. 121–134.
4. Khrumshin T.R., Krutsov D.S., Kornilov G.P. Evaluating the pulse width modulation methods applicable to the voltage of active rectifiers used in rolling mills. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Russian Internet Journal of Mechanical Engineering], 2013, no. 2, pp. 48–52.
5. Khrumshin T.R., Abdulvelev I.R., Kornilov G.P. Ensuring electromagnetic compatibility of high-power electrotrical equipment. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Energetika"* [Vestnik of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2015, Vol. 15, no. 1, pp. 82–93. (In Russ.)
6. J. Dong, L. Rixin, W. Fei, L. Fang, W. Shuo, and D. Boroyevich. Study of conducted EMI reduction for three-phase active front-end rectifier. IEEE Trans. Power Electron. Dec. 2011, vol. 26, no. 12, pp. 3823–3831.

7. B. Piepenbreier and L. Sack. Regenerative drive converter with line-frequency switched rectifier and without DC link components. Power Electronics Specialists Conference. 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual. 2004, vol. 5, pp. 3917–3923.
8. Kryukov O.V. A comparison of high voltage frequency converters used in electric drives. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2016, vol. 3, no. 2, pp. 50–56.
9. V. Miskovic, V. Blasko, T. Jahns, A. Smith and C. Romenesko. Observer based active damping of LCL resonance in grid connected voltage source converters. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver. CO. 2013, pp. 4850–4856.
10. G. Shen, D. Xu, L. Cao, and X. Zhu. An improved control strategy for grid-connected voltage source inverters with an LCL-filter. IEEE Trans. Power Electron. Jul. 2008, vol. 23, no. 4, pp. 1899–1906.
11. J. R. Rodriguez, J. Pontt, R. Huerta, G. Alzamora, N. Becker, S. Kouro, P. Cortes, and P. Lezana. Resonances in a high-power active-front-end rectifier system. IEEE Trans. Ind. Electron. Apr. 2005, vol. 52, no. 2, pp. 482–488.
12. K. O'Brien, R. Teichmann and S. Bernet. Active rectifier for medium voltage drive systems. Applied Power Electronics Conference and Exposition 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE. Anaheim. CA. 2001, vol. 1, pp. 557–562.
13. M. Yuquan, Z. Lihong and H. Shufen, "Calculation of the Filter Parameters for the Aluminum Electrolyzation Rectifier. Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA) 2010 International Conference on Changsha. China. 2010, pp. 906–910.
14. S. Chaladying, A. Charlansut and N. Rugthaichareoncheep. Parallel resonance impact on power factor improvement in power system with harmonic distortion. TENCON 2015 – 2015 IEEE Region 10 Conference. Macao, 2015, pp. 1–5.
15. T. M. Blooming and D. J. Carnovale. Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits. Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. Appleton. WI. 2006, pp. 1–9.
16. J. Pontt, J. Rodriguez, J. S. Martin, R. Aguilera, R. Bernal and P. Newman. Resonance mitigation and dynamical behavior of systems with harmonic filters for improving reliability in mining plants. Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting. Tampa. FL. 2006, pp. 1298–1302.

Received 19/10/16

Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / Николаев А.А., Корнилов Г.П., Храмшин Т.Р., Никифоров Г., Муталлапова Ф.Ф. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 96–105. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105

Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khrumshin T.R., Nikiforov G., Mutallapova F.F. Experimental study of electromagnetic compatibility of modern electric drives used in the power supply system of a metallurgical enterprise. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 96–105. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105