
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.3

Д.А. Кудряшов, Е.В. Рошин

ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ МОЩНЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С СЕТЬЮ СОБСТВЕННЫХ НУЖД АЭС

АО «ОКБМ Африкантов»

Проанализированы аспекты влияния и способы обеспечения электромагнитной совместимости мощных регулируемых асинхронных электроприводов с сетью собственных нужд атомных электростанций.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, электропривод, атомная электростанция, преобразователь частоты, фильтродемпфирующий компенсатор.

В последние десятилетия мощный регулируемый электропривод находит все большее применение в системах регулирования расхода теплоносителей главных контуров АЭС. В дальнейшем возможно использование преобразователей частоты (ПЧ) для сетевых, питаемых и конденсатных насосов. С ростом суммарной мощности электроприводов главных циркуляционных насосов (ГЦН), а она составляет в среднем 2-2,5% от выходной мощности блока, растут единичные мощности электроприводов ГЦН, которые достигают 5 МВт (для блока БН-800). Это ставит на один из первых планов проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) электроприводов в системе собственных нужд (СН) АЭС [1].

В данной статье рассматривается влияние низкочастотных кондуктивных помех на сеть СН блока АЭС БН-800 при подключении к ней мощных регулируемых электроприводов ГЦН.

В нормальном режиме работы потребители СН блока АЭС БН-800 получают питание от двух-трех обмоточных трансформаторов собственных нужд (ТСН). От каждой вторичной обмотки ТСН запитаны два мощных регулируемых электропривода ГЦН первого и второго контура. Суммарная мощность асинхронных двигателей регулируемых электроприводов, подключенных к одной полуобмотке ТСН, составляет порядка 25% мощности этой полуобмотки.

В качестве регулируемых электроприводов ГЦН выбраны преобразователи частоты PowerFlex 7000 фирмы Allen-Bradley, обеспечивающие близкую к синусоидальной форме кривых тока и напряжения двигателя, что исключает заметный дополнительный нагрев двигателя, а также нагрузку на его изоляцию. Преобразователи частоты регулируемых электроприводов ГЦН выполнены по схеме автономного инвертора тока (АИТ) с 18-ти пульсным выпрямителем и широтно-импульсным инвертором. Производителем заявлено, что коэффициент искажения синусоидальности кривой потребляемого тока преобразователем частоты составляет 6,6 % (до 49 гармоник). Температура двигателя при работе от частотно-регулируемого привода возрастает примерно на 3 °С по сравнению с работой двигателя от сети. Значение du/dt в кривой напряжения не превышает 10 В/мкс. Амплитуда напряжения, приложенного к изоляции двигателя, соответствует величине действующего напряжения, деленной на 0,707.

Проблемы отраженной волны и du/dt , часто связываемые с приводами на основе инвертора напряжения, не являются актуальными для АИТ. Благоприятные для двигателя формы тока и напряжения получены за счет использования метода селективного подавления гармоник в инверторе. Этот метод позволяет устранить высшие гармоники главного порядка и в сочетании с выходным конденсатором (в составе привода) фильтровать гармоники при работе на высоких скоростях. Также к достоинствам ПЧ на основе АИТ с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) относится то, что на длину соединительного кабеля между инвертором и двигателем не накладывается никаких ограничений (до 15 км) и его можно сопрягать со стандартными асинхронными двигателями без снижения их номинальной мощности.

Иначе обстоит дело при применении ПЧ на основе автономного инвертора напряжения (АИН) с ШИМ. В этих преобразователях при высоковольтном исполнении применяются модули IGBT или последовательно соединенные IGCT. Такие преобразователи получили широкое распространение в мощных частотно-регулируемых асинхронных электроприводах, но при их применении необходимо обеспечить снижение воздействий импульсов выходного напряжения АИН на изоляцию обмотки статора и локализацию волновых процессов в соединительном кабеле между инвертором и двигателем, сопровождающихся перенапряжениями (проблема «длинного кабеля»).

В зависимости от длины кабеля возможно появление отраженной волны напряжения на выводах статора двигателя, достигающего в худшем случае практически двукратного значения, как результат несогласованности волнового сопротивления кабеля с входным сопротивлением двигателя, определяемым индуктивностью рассеяния статора и эквивалентной частотой фронта импульса. Вероятность повреждения изоляции тем выше, чем меньше время нарастания импульсов выходного напряжения АИН, т.е. чем выше du/dt .

Для устранения негативных последствий, связанных с формой выходного напряжения, на практике в высоковольтных ПЧ применяют резонансные (LC) фильтры, подключаемые к выходу АИН. [1]

При проведении пуско-наладочных работ (ПНР) регулируемых электроприводов ГЦН было обнаружено, что при их подключении к системе СН АЭС происходит искажение напряжения на питающих шинах СН (рис. 1). По результатам полученных данных были проведены работы по исследованию причин возникновения искажений напряжения и принятию мер, улучшающих качество питающего напряжения на шинах 6 кВ СН АЭС.

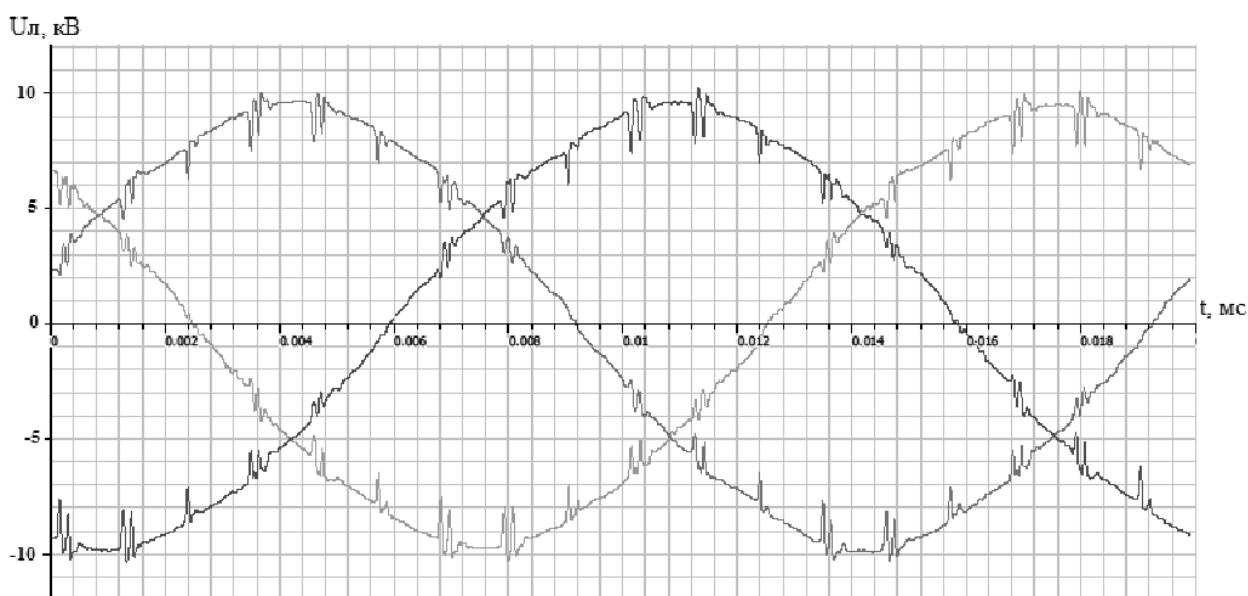


Рис. 1. Оциллограмма линейного напряжения на шинах СН АЭС при работе электроприводов ГЦН

Основной причиной появления гармонических помех является оборудование с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Такое оборудование может рассматриваться как источник гармоник тока, вызывающих гармоническое падение напряжения на полном сопротивлении сети. Гармоники тока от различных источников складываются геометрически. Из-за влияния емкостных нагрузок и емкостной проводимости кабелей в сети может возникнуть последовательный и параллельный резонанс и вызвать увеличение гармоник напряжения даже в точках, удаленных от искажающей нагрузки.

Значительные токи гармоник генерирует оборудование с фазовым управлением и большой мощностью; неуправляемые выпрямители, особенно со сглаживающими конденсаторами (например, используемыми в преобразователях частоты и газоразрядных лампах со встроенными электронными пуско-регулирующими устройствами). Генерируемые ими гармоники совпадают по фазе, поэтому гармоники от разных выпрямителей складываются друг с другом, приводя к увеличению их общего уровня. В зависимости от режима работы оборудования гармоники могут быть относительно стабильными или изменяющимися во времени [2].

ГОСТ Р 51317.2.5 «Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств» в общем случае характеризует виды электромагнитных помех, создаваемых техническим средством и (или) воздействующих на техническое средство. ГОСТ Р 51317.2.5 определена следующая номенклатура видов электромагнитных помех:

- кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи;
- излучаемые низкочастотные электромагнитные помехи;
- кондуктивные высокочастотные электромагнитные помехи;
- излучаемые высокочастотные электромагнитные помехи;
- электростатические разряды.

Нас интересуют кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи, к которым относятся:

- гармоники, интергармоники напряжения электропитания;
- напряжения сигналов, передаваемых в системах электропитания;
- колебания напряжения электропитания;
- провалы, кратковременные прерывания и выбросы напряжения электропитания;
- отклонения напряжения электропитания;
- несимметрия напряжений в трехфазных системах электроснабжения;
- изменения частоты питающего напряжения;
- наведенные низкочастотные напряжения;
- постоянные составляющие в сетях электропитания переменного тока [3].

Дополнительно было произведено осциллографирование напряжения и замеры гармонических составляющих напряжения на шинах собственных нужд при работающих и отключенных регулируемых электроприводах ГЦН.

Значение коэффициента n -й гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)i}$ в процентах как результат i -го наблюдения вычисляется по формуле

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_{1(i)}} 100, \quad (1)$$

где $U_{(n)i}$ - действующее значение n -й гармонической составляющей напряжения, В; $U_{1(i)}$ - действующее значение напряжения основной частоты на i -м наблюдении, В.

Значение коэффициента искажения синусоидальности кривой междуфазного напряжения K_{U_i} в процентах как результат i -го наблюдения вычисляется по формуле

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_{1(i)}} 100, \quad (2)$$

где $\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2}$ - действующее значение всех высших гармоник, В.

При работающих электроприводах ГЦН суммарный коэффициент нелинейных искажений напряжения составил 6,1 % на шинах 6 кВ СН АЭС. Коэффициенты нелинейных искажений напряжения по гармоникам приведены на рис. 2, а. На осциллограммах были зафиксированы значительные резонансные возмущения в напряжении (перепад напряжения относительно амплитудного значения составляет 28,6 %) с частотой коммутации 18-пульсного выпрямителя электропривода (период возмущений 1,111 мс).

Очевидной причиной резонансного переходного процесса при коммутации тиристорov выпрямителя электропривода является наличие колебательного контура, образуемого эквивалентной емкостью сети (кабельные линии и мощные электродвигатели) присоединенной к секциям шин 6 кВ и индуктивностью сети. При анализе осциллограмм была определена эквивалентная емкость сети ~ 1,5 мкФ.

Возникновение резонансных колебаний при взаимодействии статических преобразователей частоты PowerFlex 7000 с проектируемой сетью СН до настоящего времени не имело precedентов, и поэтому не могло быть учтено на стадии проектирования, осуществляемого по существующим нормативным документам. В дальнейшем возможность возникновения подобных режимов должна быть учтена в методических указаниях по проектированию, используемых в проектных организациях.

Для выполнения установленных норм необходимы специальные меры обеспечения ЭМС, эти меры должны быть четко установлены. С учетом условий применения эти меры могут включать:

- значение минимального и максимального допустимого полного сопротивления сети электропитания;
- использование экранированных и специальных кабелей (силовых и/или управления);
- требования к соединению экранов кабелей;
- значение максимальной допустимой длины кабелей;
- разделение кабелей;
- использование внешних устройств (например, фильтров);
- правильное присоединение к функциональному заземлению [4].

Для приведения питающего напряжения на шинах СН АЭС к требованиям ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (класс электромагнитной обстановки 2) и ГОСТ 32144-2013 было принято решение применить фильтродемпфирующие компенсаторы (ФДК).

Для определения оптимальных параметров ФДК было произведено компьютерное моделирование сети СН АЭС с работающими регулируруемыми электроприводами ГЦН и подключенными фильтрами к тем же шинам 6 кВ СН АЭС, что и электропривода. Параметры фильтра подбирались таким образом, чтобы питающее напряжение на шинах СН АЭС соответствовало требованиям по содержанию гармоник, а с другой стороны, необходимо подавить резонансные возмущения, возникающие при коммутации тиристорov. Высокочастотные (резонансные) возмущения не могут влиять на уровень канонических гармоник (17, 19, 35, 37 и т.д.), кратных частоте сети. Фильтры, содержащие звенья, каждое из которых настроено в резонанс на каноническую гармонику, которая должна быть подавлена, не могут эффективно воздействовать на высокочастотные возмущения и сами могут являться источниками коле-

баний напряжения при динамических воздействиях. Таким образом, высокочастотные возмущения, возникающие при коммутации тиристоров, должны быть подавлены широкополосным демпфированным фильтром.

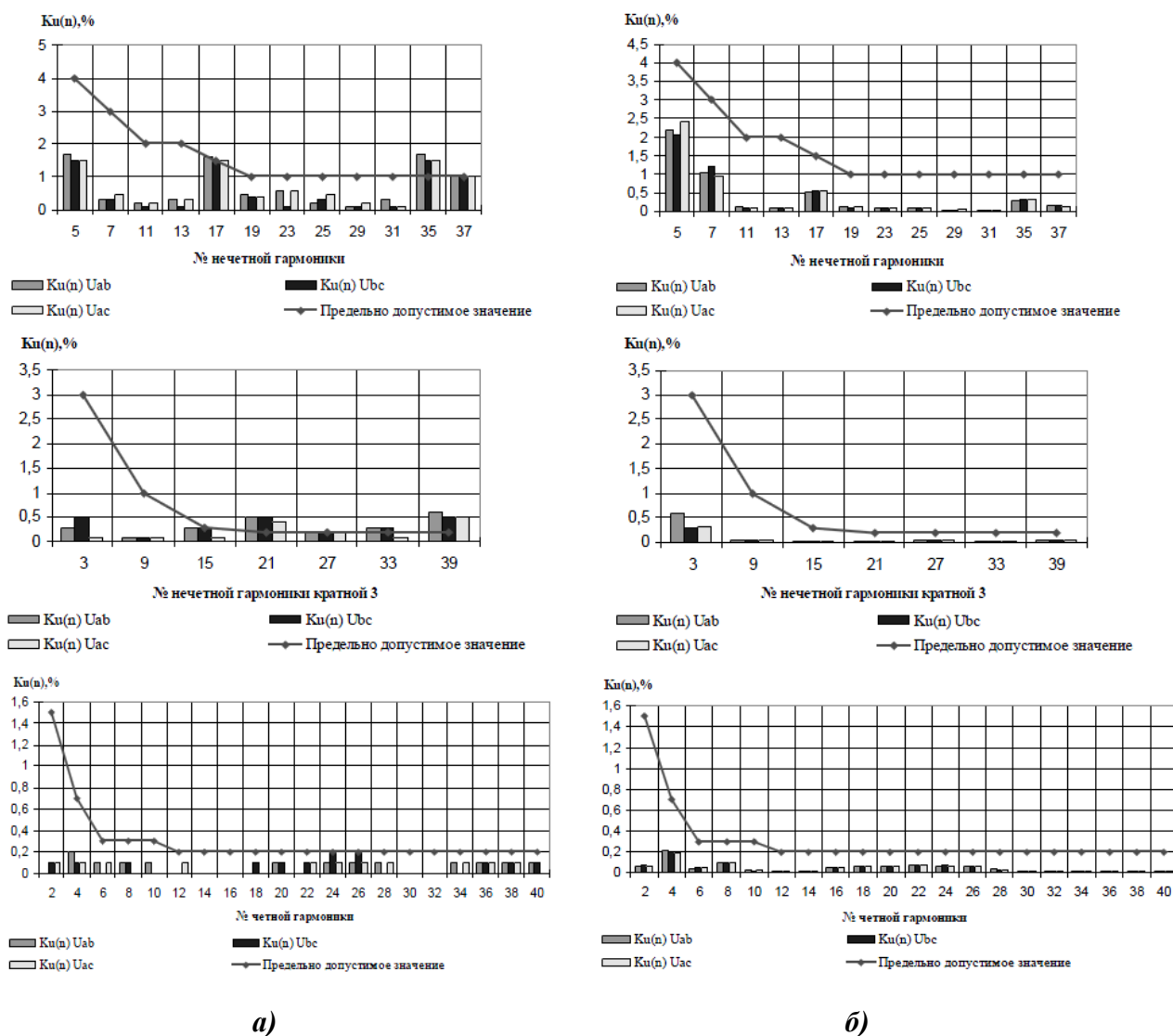


Рис. 2. Коэффициенты нелинейных искажений напряжения по гармоникам:

a – при работе электроприводов ГЦН без ФДК;

б – с подключенным ФДК

На первом этапе выбора типа фильтрующей установки были определены параметры сети СН АЭС (индуктивность и эквивалентная «паразитная» емкость сети и активное сопротивление, учитывающее затухание колебаний в соответствии с характером резонансных возмущений). В качестве исходных данных были взяты переходные процессы, заснятые на осциллограмме рис. 1, и параметры нагрузок сети СН АЭС: параметры потребителей, тип и длина кабельных трасс, по которым запитаны потребители.

На втором этапе было произведено компьютерное моделирование сети СН АЭС с работающими регулируемыми электроприводами ГЦН и подключенными фильтрами к тем же шинам 6 кВ СН АЭС, что и электропривода. Параметры фильтра подбирались таким образом, чтобы питающее напряжение на шинах СН АЭС соответствовало требованиям ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (класс электромагнитной обстановки 2) и ГОСТ 32144-2013.

Сравнение результатов, полученных при наладке на объекте электроприводов ГЦН без ФДК, и с подключенным ФДК, представлено на рис. 2 и рис. 3.

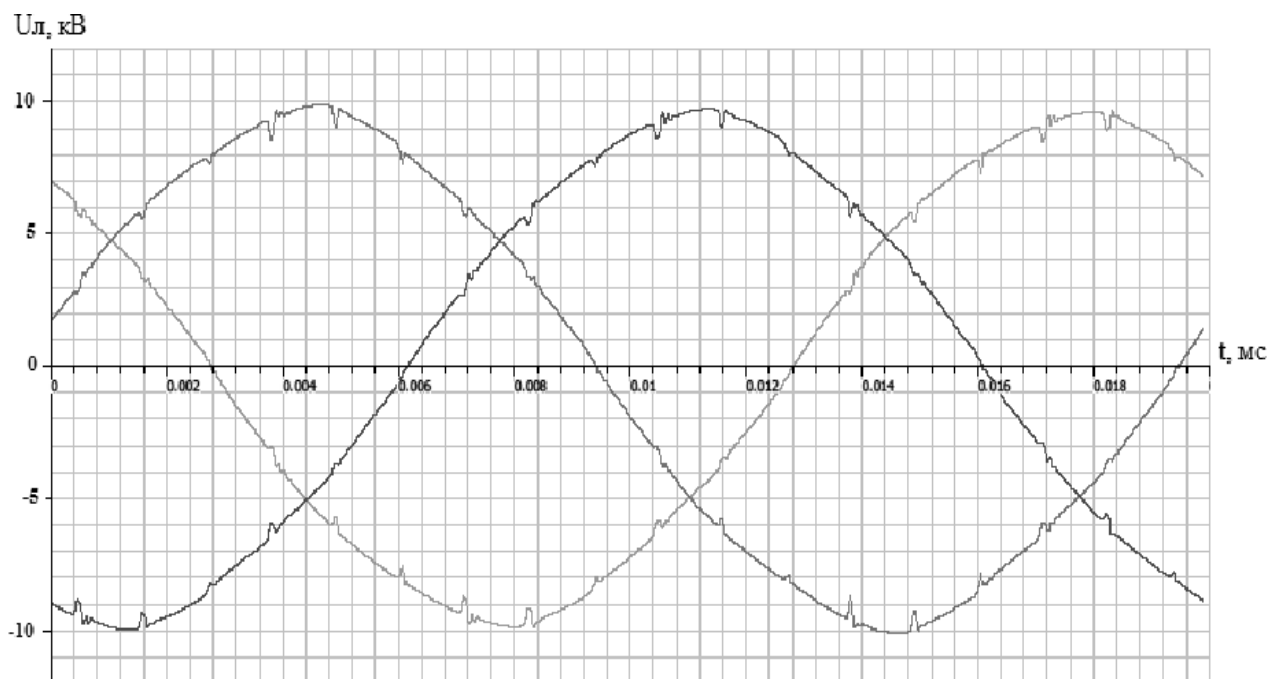


Рис. 3. Оциллограмма линейного напряжения на шинах СН АЭС при работе электроприводов ГЦН с подключенным ФДК

Из полученных результатов следует, что фильтродемпфирующие компенсаторы позволили решить основную задачу – обеспечить соответствие питающего напряжения на шинах 6 кВ СН АЭС требованиям ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (класс электромагнитной обстановки 2) и ГОСТ 32144-2013 по содержанию гармоник, а также задачу подавления резонансных возмущений, возникающих при коммутации тиристоров в 18-пульсных выпрямителях преобразователей частоты PowerFlex 7000.

Библиографический список

1. **Анишев, Е.Ю.** Проблемы электромагнитной совместимости регулируемых электроприводов главных циркуляционных насосов АЭС / Е.Ю. Анишев, Е.В. Рощин // Труды Нижегородского технического университета им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2010. № 4 (83).
2. **РД 50-713-92 (МЭК 1000-2-1).** Руководящий нормативный документ. Методические указания. Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Виды низкочастотных кондуктивных помех и сигналов, передаваемых по силовым линиям, в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 1993.
3. **ГОСТ Р 51317.2.5-2000 (МЭК 61000-2-5-95).** Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств. – М.: Госстандарт России, 2000.
4. **ГОСТ Р 51524-2012 (МЭК 61800-3:2012).** Совместимость технических средств электромагнитная. Системы электрического привода с регулируемой скоростью. Ч. 3. Требования ЭМС и специальные методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2014.

Дата поступления
в редакцию 25.01.2016

D.A. Kudriashov, E.V. Roschin

PROBLEMS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF VARIABLE ELECTRIC DRIVES WITH IN-HOUSE POWER SUPPLY SYSTEM OF NPP

Joint stock company «OKBM Afrikantov»

The technical treatments of overcoming the low-frequency conductive interferences that originate in interaction between static frequency converters and in-house power supply system of NPP are described in this article.

The results of measuring distortion voltage in-house power supply system of NPP under operating the electric drives of the main circulation pump without filter-damping complex and with it are presented.

At the expense of application of filter-damping complex a task in correspondence of supply voltage on the bus bar 6 kV in-house power supply system of NPP to requirements of the standard documents is performed.

Key words: electromagnetic compatibility, electric drives, nuclear power plant, frequency converter, filter-damping complex.