

УДК 621.311

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В. С. Иванов, к.т.н., доцент кафедры ПЭЛ РГРТУ; Vladimir.s.ivanoff@gmail.com

В. А. Пономарев, магистрант кафедры ПЭЛ РГРТУ; vovanap@mail.ru

Рассматриваются особенности методов повышения эффективности работы систем энерго-снабжения. Особое внимание уделяется вопросам подавления высших гармоник в системе электро-снабжения и внедрению активно-адаптивных сетей. Приведены причины, вызывающие значитель-ные технологические потери, снижающие эффективность функционирования, развития системы электроснабжения промышленных предприятий. Осуществление модернизации и реконструкции действующих систем электроснабжения является необходимым решением данной проблемы в усло-виях растущей конкуренции национальной промышленности для обеспечения надежного и беспере-бойного выпуска конечной продукции на рынок.

Целью работы является комплексный анализ технико-экономических показателей и доступных способов улучшения энергоснабжения промышленных предприятий, проведение энергоаудита суще-ствующих сетей для сбережения электроэнергии.

Ключевые слова: энергоэффективность, электроснабжение, компенсация реактивной мощно-сти, фильтры гармоник, трансформаторы, фильтрокомпенсирующие устройства, потери электро-энергии, тиристорный регулятор, силовые кабели.

DOI: 10.21667/1995-4565-2017-59-1-158-169

Введение

Повышение эффективности систем энерго-снабжения (СЭС) – одна из приоритетных задач в энергетике. Внимание к этой теме вызвано не-обходимостью сбережения электроэнергии, ис-ключения её потерь, снижения аварийных си-туаций на производстве. Все эти проблемы яв-ляются крайне важными в современных услови-ях развития российской экономики. От правиль-ности и оперативности их решения во многом зависит конкурентоспособность того или иного предприятия на рынке.

В настоящее время существует целый ряд методов повышения эффективности электро-снабжения промышленных предприятий. В дан-ной статье рассматриваются наиболее актуаль-ные и перспективные из них.

Теоретическая часть

Энергетическая эффективность – это со-вокупность характеристик, которые отражают отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетиче-ских ресурсов, произведенным в целях получе-ния такого эффекта. Основным критерием оцен-ки эффективности функционирования и разви-тия СЭС предприятий, в том числе мероприятий по снижению потерь электрической энергии

(ЭЭ), является надежное и экономичное снабже-ние потребителей ЭЭ требуемого качества [1].

Класс энергетической эффективности – характеристика продукции, отражающая ее энергетическую эффективность [2, 7].

Вложение инвестиций непосредственно в энергоэффективность промышленных предпри-ятий действительно является экономически вы-годным мероприятием.

Как известно, период окупаемости капита-ловложений в энергоэффективность колеблется в зависимости от типа проекта, однако в целом составляет от 0,5 до 6 лет, что является хорошим показателем по сравнению с традиционными инвестициями. И это не удивительно, так как при росте цен на энергоносители и соответственно росте сбережений на этом, благодаря осуществ-ленным инвестициям, период финансовой отдачи сокращается. Как правило, внутренняя норма прибыли на инвестиции в проекты по энергоэф-фективности выше, чем процентная ставка по кредитам. Это означает, что любой дополнитель-ный кредит, который компания берет, имеет ог-раниченное влияние на финансовые показатели компании, а конечный финансовый эффект от инвестиций является положительным [3].

Заинтересованность руководства предпри-ятий в повышении энергоэффективности должна

быть высокой, так как она приводит к следующим результатам:

- снижению затрат на энергоносители;
- повышению рентабельности;
- улучшению качества продукции;
- позитивному имиджу предприятия;
- повышению конкурентоспособности и стоимости предприятия.

Однако анализ систем электроснабжения и энергетической эффективности промышленных предприятий часто выявляет нерациональные затраты энергоресурсов и неоправданные потери электрической энергии.

Потери электроэнергии происходят непосредственно во время процесса ее передачи в элементах системы электроснабжения (трансформаторных подстанциях, распределительных устройствах, линиях электропередач).

В национальных сетях электроэнергия передается по высоковольтным линиям в виде синусоидальных волн напряжения и силы тока с частотой 50 Гц, причем одновременно передаются три волны (фазы), сдвинутые относительно друг друга на 120° .

С целью минимизации потерь электроэнергии при её передаче применяется высокое напряжение, а при входе на объект потребителя или вблизи конкретной установки осуществляется понижение напряжения в зависимости от используемого оборудования. Как правило, напряжение для промышленных потребителей понижается до 440 В, а для домохозяйств, офисов и т. п. – до 240 В.

Качество электроснабжения и условия использования энергии зависят от различных факторов, включая сопротивление электрических сетей, а также влияние некоторых видов оборудования и использования энергии на характеристики энергоснабжения. В энергетических системах крайне желательны стабильность напряжения, а также отсутствие искажений формы волн [4].

Рассчитать потери ЭЭ в промышленной сети можно в соответствии с инструкцией Минэнерго по расчету потерь ЭЭ [5, 6].

Для того чтобы устранить потери ЭЭ, следует предпринять поиск источников и причин их возникновения. Высокая доля потерь в СЭС промышленных предприятий возникает в основном из-за эксплуатации устаревшего и изношенного оборудования, состояние которого требует срочного ремонта, а также из-за отсутствия внедрения контрольных автоматизированных систем слежения и регулирования расходов электропотребления и несоответствия современным требованиям стандартов учета.

Существенные технологические потери ЭЭ в СЭС предприятий, как правило, вызваны следующими причинами:

- неудовлетворительным состоянием действующих электрических сетей из-за снижения объемов капитальных ремонтов, реконструкции и замены технически устаревшего и изношенного оборудования;

- вынужденной работой элементов СЭС в неоптимальных режимах при повышенном электропотреблении в часы максимальных нагрузок;

- эксплуатацией цеховых трансформаторов с низким коэффициентом загрузки;

- наличием значительных перетоков реактивной мощности в электрических сетях, которые приводят не только к увеличению потерь электроэнергии, но и к снижению их пропускной способности, увеличению потерь напряжения;

- наличием на предприятии нагрузок, вызывающих несинусоидальность и несимметрию фаз при отсутствии мероприятий по их устранению. Перекос фаз вызывает несимметрию токов, которые, в свою очередь, вызывают несимметрию напряжений и оказывает негативное воздействие на работу всех электроприемников. Негативные последствия: повреждения, отказы, увеличение износа, уменьшение периода эксплуатации, ускоренное старение изоляции электрооборудования, увеличение энергопотребления [1];

- нерациональными режимами работы основного электрооборудования;

- устаревшими схемами питающих и распределительных сетей;

- стабильной неравномерностью суточных графиков нагрузок;

- существенными отклонениями показателей качества электроэнергии ПКЭЭ от нормируемых;

- ростом числа нелинейных и резкопеременных электроприемников [9].

Рассмотрим методы, которые наиболее практичны и экономически рациональны для повышения эффективности СЭС промышленных предприятий.

1. Модернизация и реконструкция действующих СЭС предприятий, распределительных схем питания цеховых трансформаторных подстанций (ТП) и электроустановок.

Это осуществляется путем замены устаревшего электрооборудования на новое с повышением КПД и степени надежности, внедрения энергосберегающих технологий. Такой метод является самым распространенным [12].

2. Выравнивание неравномерных суточных графиков электрических нагрузок.

Этот метод позволяет существенно уменьшить пиковый максимум нагрузки, что способ-

ствуется снижению потерь и экономии электрической энергии в сети, так как на производстве могут использовать одновременно сталеплавильные печи различного рода, прокатные станы, сварочные установки и т.д. Если предприятие работает в две смены (утренняя и вечерняя), то можно ввести третью – ночную, за счет которой разгрузить «пик» осветительной нагрузки второй смены, тем самым заполнив ночной провал суточного графика потребления. Введение интервала между рабочими сменами в период резко выраженного максимума нагрузки энергосистемы также решает проблему энергосбережения.

Для обеспечения стабильной работы промышленного предприятия необходимо проектировать графики ограничения потребления мощности электроэнергии при перерывах электропотребления на основании данных об удельных ущербах, комплексных схем технологического процесса и системы электроснабжения [5].

Недостатки этого метода приводят к нарушению нормальных производственных режимов работы предприятий и ухудшению условий труда рабочих.

3. Энергоэффективная эксплуатация трансформаторов цеховых подстанций.

Потери в трансформаторах бывают двух типов – потери в обмотках и потери в сердечнике. Потери в обмотках непосредственно имеют связь с сопротивлением медных обмоток и выделением тепла, величина этих потерь пропорциональна квадрату тока и составляет 1 – 3 % номинальной мощности при 100 % загрузки трансформатора.

На трансформаторных подстанциях имеется избыток установленных мощностей, вследствие чего среднее значение загрузки относительно низкое. Этот избыток мощностей необходим для обеспечения надежной и бесперебойной работы трансформаторов в аварийной ситуации, при выходе из строя одного из них. Методы оптимизации применимы ко всем ТП, согласно оценкам оптимизация загрузки возможна в 25 % случаев.

В реальных условиях среднее значение коэффициента загрузки всегда меньше 100 %, а максимальный КПД трансформатора, независимо от мощности, достигается при его загрузке в среднем на уровне 45 – 75 % от номинальной загрузки. Такой метод позволяет определить оптимальные варианты повышения эффективности для трансформаторной подстанции:

– если общая нагрузка ниже 40 – 50 % номинальной мощности ТП, то в качестве меры энергосбережения логично повысить энергоэффективность подстанции за счет отключения одного или нескольких трансформаторов, доведя

значение коэффициента загрузки оставшегося или оставшихся в работе трансформаторов до оптимальной величины;

– если общая нагрузка превышает 75 % номинальной мощности ТП, то для достижения максимального КПД трансформаторов необходимо установить дополнительные мощности;

– если трансформаторы исчерпали свой ресурс в ходе эксплуатации и необходима модернизация устаревших ТП, целесообразно их заменить на трансформаторы с пониженным уровнем потерь, что позволяет снизить потери на 20 – 60 % [10].

4. Установка компенсирующих устройств.

Нагрузка на предприятиях обычно бывает активная, емкостная и индуктивная в зависимости от типа электрооборудования. Реактивная энергия отрицательно воздействует на внутренние электросети цеха, создавая электромагнитные поля в электроустановках. Реактивный ток приводит к снижению качества электроэнергии. Компенсирующие устройства предназначены для компенсации емкостной или индуктивной составляющей переменного тока. Используются для компенсации реактивной мощности в узлах электроэнергетической системы и компенсации реактивных параметров линий. Установка компенсации реактивной мощности (УКРМ) обеспечивает увеличение и поддержание на нормативном уровне величины коэффициента мощности трехфазной распределительной сети. Основной задачей УКРМ является аккумуляция в конденсаторах реактивной мощности.

УКРМ способствует снижению:

- перетоков реактивной мощности;
- потерь электроэнергии в распределительных питающих электросетях и увеличения их пропускной способности для подключения новых нагрузок без увеличения стоимости сетей;
- общих расходов на электроэнергию;
- нагрузки трансформаторных подстанций, электроустановок и силовых линий;
- тепловых потерь электрического тока;
- воздействия высших гармоник и несимметричности фаз [1, 11].

В устройстве УКРМ применяются конденсаторы, обеспечивающие надежность и долговечность. Наличие в конденсаторной установке УКРМ специализированных тиристорных быстродействующих пускателей, работающих с опережением по времени для коммутации фазовых конденсаторов, срабатывающих при изменении $\cos\phi$, продлевает время их безотказной работы.

Существующий метод расчета компенсирующих устройств по формуле (1) с учетом несинусоидальности позволяет определить ком-

пенсирующую емкость C по величине мощности реактивных составляющих гармоник токов нагрузки и средневзвешенных напряжений:

$$C = \frac{\sum_{v=1}^{\infty} v \times U_v \times I_v \times \sin \phi_v}{\omega \sum_{U=1}^{\infty} v^2 U_v^2} = \frac{Q_{P.T.}}{\omega \times U_{CB}^2}, \quad (1)$$

где $Q_{P.T.}$, U_{CB} – мощность реактивных составляющих гармоник токов нагрузки и средневзвешенное напряжение.

Использование тиристорного регулирования компенсирующих устройств (КУ) производит плавное и непрерывное регулирование емкости компенсирующего устройства по заданному закону регулирования [9].

5. Устранение перекоса фазных напряжений.

Обычно при несимметрии напряжений в трехфазной сети появляется дополнительная, пульсирующая с двойной частотой мощность. Наличие такой мощности ведет к непроизводительной нагрузке сетей и электроустановок промышленного предприятия, в результате чего снижается эффективность их использования.

Все способы по симметрированию направлены на компенсацию пульсирующей мощности, чтобы уменьшить симметричные составляющие нулевой и обратной последовательностей. Существует внутреннее и внешнее симметрирование. При внутреннем симметрировании несимметричная (однофазная) нагрузка естественно распределяется между фазами по возможности равномерно таким образом, чтобы в наибольшей степени снизить несимметрию. Также применение данного метода необходимо для понижения несимметрии тяговых нагрузок железных дорог. Достигнуть полной симметрии методом внутреннего симметрирования удается чрезвычайно редко, поскольку суммарная нагрузка в общем случае все же остается несимметричной и непрерывно в течение суток изменяется состав нагрузок в каждой из фаз [8].

Под внешним понимают искусственное симметрирование с применением различных устройств, подключенных к трехфазной сети так, чтобы суммарные токи в трехфазном источнике и сети создавали систему прямой последовательности. Внешнее симметрирование получило широкое распространение в производстве:

1. Применение многофазной схемы выпрямления (например, схемы Ларионова); используется для питания электроприемников постоянного тока, недостатком является генерация ВГ, возникающая при выпрямлении;

2. Симметрирование с помощью фазовых уравнивателей – синхронных машин, создающих уравнивающую систему ЭДС обратной последовательности; недостатком является сложная конструкция уравнивателей;

3. Использование симметрирующего эффекта трехфазных асинхронных двигателей (АД); недостатком является то, что АД должны работать со значительной недогрузкой, поскольку иначе они могут выйти из строя вследствие перегрева;

4. Введение системы добавочных ЭДС;

5. Компенсация пульсирующей мощности с помощью статических симметрирующих устройств (СУ); в зависимости от технической необходимости и экономической целесообразности СУ могут быть регулируемы и нерегулируемы, при реализации метода используется сочетание регулируемых или нерегулируемых конденсаторных батарей (КБ), реакторов и мощных активных сопротивлений.

Применение симметрирующих устройств (СУ), позволяющих устранить токи нулевой и обратной последовательности. СУ подразделяются:

– на конденсаторные и электромагнитные шунтосимметрирующие устройства – за счет подключения в сеть реакторов и конденсаторных батарей, основанных на минимальном сопротивлении токам нулевой последовательности, за счет шунтирования замыкания на себя этих токов;

– преобразующие СУ – за счет использования преобразующих статических устройств: выпрямители, тиристорные регуляторы, высокочастотные преобразователи электромашины постоянного тока, использование электронных балластов в осветительных газоразрядных приборах;

– компенсационные СУ – за счет включения в рассечку нулевого провода трансформатора симметрирующего трехфазного (ТСТ) компенсационной обмотки симметрирующих устройств.

Этот метод является эффективным, так как применяемый ТСТ позволяет получить высокие энергетические показатели симметрирования, а именно: улучшить качество электроэнергии, повысить коэффициент мощности, подавить высшие гармоники, регулировать напряжение [5].

При несимметрии напряжения возникает ущерб, обусловленный появлением дополнительных потерь в элементах электросетей, сокращением срока службы электрооборудования и снижением экономичности его работы. Имеющаяся в сети несимметрия напряжений обуславливает несимметрию токов потребления даже для симметричных электроприемников. В результате одна из фаз линии электропередачи (ЛЭП) работает с перегрузкой. Поскольку возникающие в каждой фазе ЛЭП потери пропорциональны квад-

рату тока, то в линии при несимметрии напряжений появляются дополнительные потери по сравнению с симметричным режимом.

У АД токи обратной последовательности, возникающие при несимметрии напряжения, создают тормозящий электромагнитный момент, а также дополнительный нагрев стали ротора за счет токов двойной частоты. Уменьшение вращающего момента приближенно пропорционально квадрату коэффициента обратной последовательности напряжения K_{2U} . Из-за нагрева резко сокращается срок службы изоляции АД. Установлено, что срок службы полностью загруженного АД, работающего при $K_{2U} = 4\%$, сокращается в два раза.

Несимметрия напряжения приводит к нагреву трансформаторов и, следовательно, сокращению срока его службы. Например, при номинальной нагрузке трансформатора и $K_{2U} = 10\%$ срок службы изоляции трансформатора сокращается на 16%. Токи, обусловленные напряжением нулевой последовательности U_0 , создают в стали трансформаторов и электродвигателей поток нулевой последовательности Φ_0 , который не выполняет никакой полезной работы, но обеспечивает дополнительный нагрев стали. Это также снижает нагрузочную способность трансформаторов и электродвигателей [8].

6. Учет показателей качества электроэнергии (ПКЭ) при анализе режимов СЭС.

К электросетям общего назначения относятся сети переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц промышленных предприятий, энергосистем и электростанций.

Нормы качества электроэнергии являются уровнями электромагнитной совместимости (ЭМС) для кондуктивных электромагнитных помех в СЭС общего назначения. При соблюдении указанных норм обеспечивается ЭМС электросетей СЭС общего назначения и электросетей потребителей.

Нормативный стандарт не устанавливает требования к качеству электроэнергии в электрических сетях специального назначения (например, контактных тяговых сетях, сетях связи), в автономных системах электроснабжения (например, буровой установки, поездов). Он также не устанавливает нормы ПКЭ для режимов, вызванных непредвиденными обстоятельствами (исключительными погодными условиями, стихийными бедствиями и т.п.), а также на время ликвидации последствий непредвиденных обстоятельств.

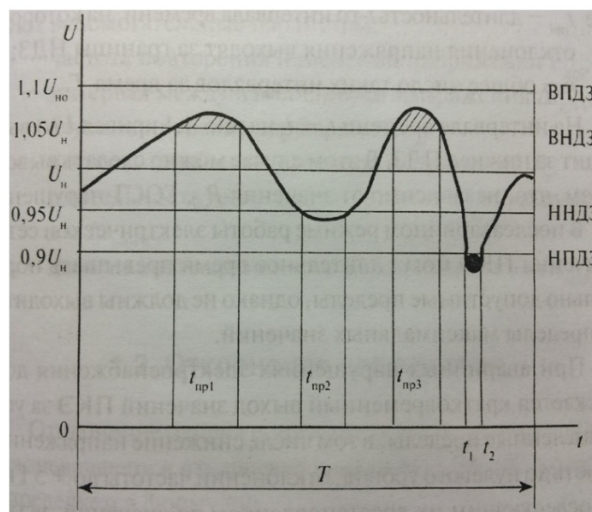
Нормы ПКЭ подлежат включению в технические условия на присоединение потребителей и в договоры энергоснабжения между организа-

цией, осуществляющей энергоснабжение, и потребителем.

С целью обеспечения норм стандарта в точках общего присоединения потребителям, виновным в ухудшении качества электроэнергии, допускается устанавливать в технических условиях на присоединение и в договорах на энергоснабжение более жесткие нормы (с меньшим диапазоном допустимых значений ПКЭ), чем установленные в стандарте.

Нормы ПКЭ в электрических сетях, находящихся в собственности потребителей электрической энергии, которые регламентируются отраслевыми стандартами и иными нормативными документами, не должны быть ниже норм, установленных в ГОСТ 13109-97 в точках общего присоединения. Нормы стандарта применяют при проектировании и эксплуатации электрических сетей, а также при установлении уровней ЭМС между электрическими сетями и приемниками электрической энергии. Установлены два вида норм ПКЭ: нормально допустимые значения (НДЗ) и предельно допустимые значения (ПДЗ).

Оценка соответствия ПКЭ указанным нормам проводится в течение расчетного периода T , равного 24 часам. Значения ПКЭ в нормальном режиме работы электрической сети могут выходить за границы НДЗ с суммарной вероятностью $P_{нд}$ недопустимых ПКЭ не более 0,05. Это означает, что за сутки суммарное время выхода ПКЭ за границы НДЗ может составлять 1 ч 12 мин.



Превышение допустимых пределов изменяющимся во времени ПКЭ (на примере отклонений напряжения)

При $P_{нд} > 0,05$ ГОСТ 13109-97 считается нарушенным. В нормальном режиме работы электрической сети ПКЭ не могут выходить за границы ПДЗ. На рисунке приведена реализация изменяющегося во времени напряжения сети

$U(t)$ на интервале времени T . Также показаны нормальные (ВНДЗ и ННДЗ) и предельные (ВПДЗ и НПДЗ) допустимые значения для отклонений напряжения.

Вероятность недопустимых отклонений напряжения для реализации $U(t)$ на рисунке может быть определена по формуле

$$P_{\text{нд}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{\text{нpi}}}{T}, \quad (2)$$

где $t_{\text{нpi}}$ – длительность i -го интервала времени, на котором отклонения напряжения выходят за границы НДЗ; n – общее число таких интервалов за время T .

На интервале времени $t_1 - t_2$ кривая $U(t)$ выходит за нижнее ПДЗ. В этом случае можно сделать вывод о том, что, независимо от значения $P_{\text{нд}}$, ГОСТ нарушен [8].

Учет качества электроэнергии представляет собой ряд мероприятий, обеспечивающих объективную оценку ПКЭ. Такой контроль осуществляется соответствующим технологическим оборудованием.

Качество электроэнергии – одно из ключевых понятий в электроснабжении. Снижение показателей качества электроэнергии отрицательно влияет на электрооборудование:

- увеличиваются потери энергии в сетях;
- происходит перегрев электродвигателей и вращающихся машин, приводящий к ускоренному старению изоляции и возможной аварийности в результате однофазных КЗ и их перехода в многофазные замыкания;
- увеличивается потребление ЭЭ и требуемой мощности оборудования;
- происходят сбой и ложные срабатывания автоматических устройств релейной защиты;
- нестабильность работы электроники и вычислительной техники;
- некорректная работа электросчетчиков.

КЭ характеризуется показателями различного типа. Одна часть ПКЭ характеризует помехи, связанные с особенностями технологии генерации, передачи, распределения и потребления энергии. К таким ПКЭ относят отклонения напряжения и частоты, несимметрию и колебания напряжения, отклонения от синусоидальной формы кривой напряжения.

Другой тип показателей характеризует кратковременные помехи, которые возникают в результате коммутационных процессов, атмосферных и грозных явлений, работы защитного оборудования и автоматики, а также послеаварийных режимов. К числу этих ПКЭ относят прова-

лы, импульсы напряжения, кратковременные перерывы электроснабжения.

Анализ качества электроэнергии осуществляется путем измерения ПКЭ и соотнесения их с допустимыми значениями. Для этих целей используются системы мониторинга управления качеством электроэнергии (СМиУКЭ). Основными элементами таких систем являются анализаторы качества электроэнергии.

Система учета КЭ обеспечивает измерение нормируемых ПКЭ, обрабатывает результаты измерений, накапливает и систематизирует данные. Также осуществляются контроль за формированием отчетов и предоставление аналитической информации, на основе которых разрабатываются мероприятия по повышению КЭ [13].

7. Устранение высших гармоник СЭС и использование соответствующих фильтров.

Источниками высших гармоник (ВГ) могут быть: а) силовые электронные аппараты: приводы постоянного тока с частотным регулированием, бесперебойники, выпрямители, устройства плавного пуска двигателя, импульсные ИП, индукционные печи с тиристорным управлением и различные полупроводники; б) электродуговые аппараты: дуговые печи, оборудование сварки, ртутные и люминесцентные лампы; в) аппараты, работающие в режиме насыщения: электродвигатели, электрогенераторы, трансформаторы и реакторы.

Влияние ВГ на напряжение.

Наличие высших гармоник в СЭС обуславливает следующие нежелательные проявления:

- затруднение компенсации реактивной мощности с помощью конденсаторных батарей;
- появление дополнительных потерь в электрических машинах, трансформаторах и сетях;
- сокращение срока службы изоляции электрических машин и аппаратов;
- ухудшение работы устройств автоматики, релейной защиты, телемеханики и связи;
- появление значительной дополнительной погрешности счетчиков электроэнергии и других измерительных приборов.

Основными формами воздействия ВГ на СЭС являются:

- увеличение токов и напряжений гармоник вследствие параллельного и последовательного резонансов;
- снижение процессов генерации, передачи и использования электроэнергии;
- старение изоляции электрооборудования и сокращение вследствие этого срока его службы;
- ложная работа оборудования.

Наличие в сетях конденсаторов, используемых для компенсации реактивной мощности, может привести к местным резонансам, которые, в

свою очередь, могут вызвать чрезмерное увеличение тока в конденсаторах и выход их из строя.

Следует отметить, что и при отсутствии резонанса наличие высших гармоник в кривой питающего напряжения приводит к возрастанию потерь в конденсаторах по следующей причине.

Емкостное сопротивление конденсатора $x_{(n)}$ для n -й ВГ равно

$$x_{(n)} = \frac{1}{n\omega C} = \frac{1}{n} x_{(1)}, \quad (3)$$

т. е. сопротивление конденсатора для n -й ВГ в n раз меньше его сопротивления $x_{(1)}$ для напряжения основной частоты.

Соответственно n -я ВГ тока через конденсатор приближенно равна

$$I_{(n)} = \frac{U_{(n)}}{x_{(n)}} = \frac{nU_{(n)}}{x_{(1)}}. \quad (4)$$

Потери в конденсаторе при отсутствии ВГ приближенно равны

$$\Delta P = I_{ном}^2 r = \left[\frac{U_{ном}}{x_{(1)}} \right]^2 r, \quad (5)$$

где $I_{ном}$ – номинальный ток конденсатора; r – сопротивление конденсатора.

Потери в конденсаторе при наличии ВГ можно определить по формуле

$$\Delta P_{HC} = I_{HC}^2 r = \left[\frac{\sum_{n=1}^N nU_{(n)}}{x_{(1)}} \right]^2 r. \quad (6)$$

Увеличение потерь электроэнергии на нагрев конденсаторов при наличии ВГ по отношению к номинальному режиму без них равно

$$\Delta P = \frac{\Delta P - \Delta P_{HC}}{\Delta P} = \sum_{n=2}^N n \left[\frac{U_{(n)}}{U_{ном}} \right]^2. \quad (7)$$

Конденсаторы допускают определенную токовую перегрузку. Конденсаторы, выпускаемые в Великобритании, допускают перегрузку 15 %, в Европе и Австралии – 30 %, в США – 80 %, в РФ – 30 %. Если превышаются значения этих перегрузок из-за наличия высших гармоник, то конденсаторы перегреваются и выходят из строя.

При наличии в системах электроснабжения ВГ достаточно высокого уровня (при $K_{НСУ} = 10 - 15$ %) потери в синхронных и асинхронных двигателях увеличиваются на несколько процентов. Если $K_{НСУ} = 5$ %, то потери в трансформаторе увеличиваются на 5 %, а при $K_{НСУ} = 10$ % эти потери возрастают уже до 20 %.

Увеличение потерь в АД, синхронных двигателях (СД) и трансформаторах объясняется повышением активного сопротивления обмоток из-за поверхностного эффекта, а также возрастанием потерь в стали из-за вихревых токов.

Наличие ВГ приводит к ускорению старения изоляции как из-за более интенсивного нагрева, так и вследствие усиления ионизационных процессов.

Ухудшение работы устройств автоматики, релейной защиты, телемеханики и связи при наличии ВГ происходит из-за изменения формы синусоиды, что, в свою очередь, приводит к изменению ее характеристик амплитуды (может быть резкое пикообразное возрастание или глубокий «вырез» в области амплитуды); переход через нулевое или определенное заданное значение (например, при управлении углом открывания тиристорных) происходит в другой момент (или при другом угле), чем у «чистой» синусоиды; еще хуже, если переходов через ноль становится несколько за один полупериод (что имеет место при резонансных явлениях или большой суммарной мощности источников ВГ).

Измерительные приборы и счетчики электроэнергии калибруются при чисто синусоидальном напряжении и токе, поэтому их использование при наличии ВГ может сопровождаться значительной дополнительной погрешностью.

Снижение высших гармоник.

Основным способом снижения высших гармоник напряжения и тока в СЭС является использование мощных силовых фильтров. Фильтры могут быть типа режекторных, т. е. настроенных на одну частоту (при резонансных явлениях в СЭС, когда амплитуда одной из гармоник резко превышает амплитуду остальных ВГ) или представляют собой полосовые фильтры низких частот (ФНЧ).

Для снижения уровня ВГ напряжения используется параллельное включение фильтров, с помощью которых осуществляется шунтирование (поглощение) ВГ токов.

Для полного разделения линейной и нелинейной нагрузки используется последовательное включение фильтра (так называемого «фильтра-пробки»), создающего большое сопротивление протеканию тока на частоте (частотах) ВГ.

Для снижения уровня ВГ наиболее эффективно использование в качестве фильтра многофункционального устройства, которое, наряду со снижением уровня ВГ, выполняет роль компенсатора реактивной мощности. Такие устройства называются фильтро-компенсирующими устройствами (ФКУ). Схема ФКУ проста, она содержит конденсаторную батарею (соединенную в звезду или в треугольник), подключаемую к

фазам СЭС через реакторы. Вначале рассчитывают мощность КБ, необходимую для компенсации реактивной мощности, а затем определяют параметры реакторов из условий фильтрации высших гармоник, имеющих место в СЭС.

В фильтрах и ФКУ необходимо использовать фильтровые конденсаторы (в их обозначении используется буква Ф), которые могут работать при частоте до 10 кГц. Если использовать в этом случае силовые конденсаторы, применяемые в другой области, то за короткое время они выйдут из строя из-за перегрузки токами ВГ и перегрева.

Одним из мероприятий по снижению уровня ВГ при использовании в СЭС большого количества выпрямителей является способ увеличения числа фаз преобразователей. Наиболее распространенным является шестикратное увеличение числа фаз. Достигается такое увеличение числа фаз путем использования трансформаторов со специально выполненными обмотками. Применение многофазных трансформаторов обычно ограничивается 12-фазными схемами; в зарубежной практике известны случаи использования трансформаторов с большим числом фаз [8].

8. Использование силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Практически любое эксплуатирующее электрические сети предприятие на напряжение 6, 10 кВ и выше использует силовые кабельные линии. Кабельные линии имеют немало достоинств по сравнению с воздушными линиями (ВЛ). Это меньшие габариты, безопаснее и надежнее. Кабели с пропитанной бумажной изоляцией часто повреждаются, устарели и пришли в непригодность. Такую проблему могло решить существенное изменение устройства кабеля, тем самым придя к изготовлению кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Кабели с СПЭ изоляцией исключают многие недостатки, характерные для кабелей с бумажной изоляцией, особенно их применение решает многие проблемы по надежности электроснабжения.

Предприятия, изготавливающие кабели СПЭ, используют технологии сшивки или вулканизации непосредственно в среде нейтрального газа под высоким давлением и температурой. Такой метод вулканизации обеспечивает качественную и равномерную сшивку по всей толщине изоляции и отсутствие воздушных включений. Поперечные связи, которые образуются в процессе сшивки между молекулами полиэтилена, в основном и определяют характеристики нового материала. Кабели СПЭ имеют высокие механические, диэлектрические свойства и широкий температурный рабочий диапазон в отличие от других кабельных изоляционных материалов.

Известно, что для сшитого полиэтилена в нормальных условиях допускается температура 90°C, при кратковременном протекании токов короткого замыкания температура допускается 250°C, прокладка и монтаж кабелей осуществляются с радиусом изгиба до 7,5 наружных диаметров при температуре до – 20°C [14].

9. Размещение оборудования, требующего значительной мощности, ближе к источнику питающей высоковольтной линии.

Этот метод целесообразен ввиду омических потерь мощности питающей сети, которые (при заданной мощности) тем выше, чем ниже напряжение.

10. Внедрение активно-адаптивных и нейронных сетей с целью управления потреблением электроэнергии.

Управление потреблением электроэнергии (УПЭ) включает в себя такие мероприятия:

- планировать оптимальное потребление электроэнергии;
- планировать и проводить оперативный ремонт силовых установок;
- изменять режимы нагрузки;
- иметь полный контроль над потерями электроэнергии;
- компенсировать реактивную мощность.

На данный момент ученые активно разрабатывают концепцию так называемых «умных», или активно-адаптивных, сетей – Smart Grid, позволяющих эффективным образом реализовать процессы УПЭ. «Умные» сети Smart Grid представляют собой модернизированные каналы электроснабжения, работающие с использованием коммуникационных и информационных технологий. Основной задачей внедрения подобных систем является обеспечение надежной работы электрооборудования посредством внедрения дистанционного контроля за исправностью отдельных компонентов.

В нашей стране изучением этой концепции занимаются Московский энергетический институт (МЭИ), Институт комплексных исследований в энергетике, Федеральная сетевая компания, Холдинг МРСК, НТЦ Электроэнергетики. Система собирает информацию о производстве и потреблении электроэнергии, что позволяет корректно распределять энергоресурсы, обеспечивать надежность их потребления. Классические сети Smart Grid в электроэнергетике обладают следующими характеристиками:

- способность управлять работой потребителей;
- самостоятельное восстановление после сбоев;
- защищенность от физического и кибернетического внешнего вмешательства;

– обеспечение электроснабжения требуемого качества;

– синхронная работа генерирующих источников и центров хранения электроэнергии;

– способность существенно повышать эффективность работы энергосистемы в целом.

Smart Grid в электроэнергетике должны отвечать критериям гибкости, доступности, надёжности и экономичности. Также концепция Smart Grid содержит ещё один важный аспект – катализацию экономического подъёма. Развёртывание подобных проектов способствует развитию инновационных технологий, стимулирует производство высокоинтеллектуальной продукции, расширяет возможности использования электрической тяги в транспортной инфраструктуре. Потребители становятся активными участниками рынка, поскольку получают возможность продавать электроэнергию, выработанную на локальных генерирующих источниках. Для передачи информации между элементами Smart Grid могут использоваться различные типы связи: низкочастотные контрольные кабели, коаксиальные высокочастотные кабели, провода высоковольтных линий электропередач, оптические кабели, направленные защищённые радиоканалы и др.

В систему Smart Grid входят программно-аппаратные комплексы, включающие в себя следующие подсистемы.

1. Smart Metering – интеллектуальные счетчики.

2. Dynamic Grid Management – динамическое управление системой электроснабжения.

3. Demand Response – регулирование нагрузки.

Система Smart Grid позволяет накапливать и обрабатывать информацию о работе СЭС предприятия. Одними из низкоуровневых звеньев этой системы являются интеллектуальные счетчики, которые осуществляют технический учет электропотребления в реальном времени с высокой точностью и передают данные учета в центральный модуль системы. На основании собранной информации о фактическом режиме работы СЭС можно осуществлять планирование (прогнозирование) электропотребления, а также управление электропотреблением в реальном времени: регулирование нагрузки, подключение и отключение электрооборудования, управление УКРМ, включение собственных генерирующих установок [15].

Мероприятия по управлению потреблением электроэнергии должны происходить с учетом ограничений, накладываемых технологическим процессом предприятия. Эти мероприятия могут производиться как в автоматическом режиме

самой системой Smart Grid, так и в автоматизированном режиме диспетчером.

Для надёжного функционирования сети Smart Grid важно свести к минимуму количество отдельных обрабатываемых модулей. От многочисленных компонентов информация должна подаваться на мощные серверы, обрабатываться и пересылаться на исполнительные элементы. Чтобы избежать потерь эффективности, основная функциональность системы должна обеспечиваться на программном уровне.

Концепция Smart Grid предполагает совмещение релейной защиты с информационно-измерительными функциями. Микропроцессорные устройства релейной защиты измеряют токи и напряжение в векторной форме, накапливают данные о срабатываниях и аварийных режимах в специальных блоках памяти. Таким образом, релейная защита превращается в своеобразный центр обработки информации, элемент системы диагностики и мониторинга электрооборудования.

Проблема прогнозирования потребления электроэнергии является актуальной, и ей посвящено множество работ отечественных и зарубежных ученых [16, 17]. В качестве методов прогнозирования электропотребления предлагаются математико-статистические, вероятностные методы, методы регрессионного анализа, методы, основанные на искусственных нейронных сетях и др.

Многие исследователи в своих работах отмечают хорошие прогнозные способности искусственных нейронных сетей (ИНС) при прогнозировании электропотребления [18].

Существенным достоинством нейронных сетей является их адаптивность – способность динамически подстраиваться к изменяющимся условиям, что является одним из ключевых факторов при построении модуля прогнозирования в составе Smart Grid. Кроме того, ИНС обладают хорошими обобщающими способностями и способны выявлять и учитывать сложные нелинейные зависимости одних величин от других. Вместе с тем интеллектуальными методами управления системой электроснабжения следует пользоваться с осторожностью, так как не всегда они способны обеспечить стабильные и адекватные сигналы управляющих воздействий.

Опыт реализации проектов Smart Grid на практике.

Проект Flexible Electricity Networks To Integrate The Expected Energy Evolution (FENIX). Гибкая электрическая сеть, реализующая концепцию общеевропейской энергосистемы с использованием виртуальных электростанций (VPP), возобнов-

ляемых источников энергоресурсов (RES) и распределённых источников генерации (DER).

Проект Active Distribution Network With Full Integration Of Demand And Distributed Energy ResourceS (ADDRESS). Составная часть европейской концепции сетей будущего Smart Grids European Technology Platform, объединяющая работу 25 энергокомпаний из 11 европейских стран.

Проекты Microgrids – отдельные энергосетевые структуры, размещённые на небольших территориях (реализованы в США, Европе, Японии и Канаде). Такие системы обладают локальными генерирующими источниками, поэтому способны взаимодействовать с центральными сетями при необходимости покрытия максимума пиковых нагрузок.

Проект интеллектуальной энергетической инфраструктуры компании Mitsubishi Electric. Предполагает распределённую генерацию, использование возобновляемых источников энергии, диспетчерских центров и средств аккумуляции энергии [19].

11. Применение возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Еще одним способом повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов и СЭС предприятий является развитие распределения генерации за счет возобновляемых источников энергии (солнечных, ветровых энергетических установок, малых ГЭС, биогазовых установок).

Эффективность электроснабжения при этом будет зависеть от технико-экономических и экологических показателей используемых энергоустановок на ВИЭ, а также от режимов их работы.

Значительный вклад в развитие теории и практики применения ВИЭ для СЭС внесли отечественные ученые Стребков Д. С., Безруких П. П., Виссарионов В. И., Попель О. С., Соломин Е. В., Саплин Л. А., Амерханов Р. А., Воронин С. М., Шерьязов С. К., Лукутин Б. В. и др.

При использовании ВИЭ эффективность электроснабжения потребителей повышается за счет снижения их зависимости:

- от централизованной электрической сети (ЦЭС);
- снижения потерь в ЦЭС;
- снижения объемов восстановления изношенных электросетей;
- снижения потребления углеводородных энергоресурсов; повышения надежности и качества электроснабжения потребителей.

Применение комбинированных источников питания (ВИЭ и централизованной электрической сети) в системах электроснабжения предприятий позволяет снизить потери в энергоуста-

новках, тем самым снижая потери в распределительной сети и электроприводах, повысить качество электроэнергии, влияющее на экономичность работы электроприемников, обеспечить бесперебойность электроснабжения. Развитие ВИЭ является одним из приоритетных направлений энергетической стратегии России [20].

Заключение

Среди целого ряда методов повышения эффективности энергоснабжения рассмотрены следующие:

- модернизация и реконструкция действующих СЭС предприятий, распределительных схем питания цеховых ТП и электроустановок;
- выравнивание суточных графиков электрических нагрузок с помощью регулирования электропотреблением;
- энергоэффективная эксплуатация трансформаторов цеховых подстанций;
- установка компенсирующих устройств для компенсации реактивной мощности;
- устранение перекоса фазных напряжений через применение симметрирующих устройств;
- учет показателей качества электрической энергии при анализе эффективности режимов СЭС;
- обеспечение достаточного сечения силовых кабелей, соответствующих мощности потребителей электроэнергии.

Особое внимание следует уделять управлению потреблением электроэнергии. В этом направлении вся возрастающая роль принадлежит использованию так называемых «умных», активно-адаптивных сетей.

Основным способом повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов и СЭС предприятий является развитие распределения генерации за счет возобновляемых источников энергии. Именно это является одним из приоритетных направлений энергетической стратегии России.

На каждом промышленном предприятии должен осуществляться индивидуальный подход к имеющимся методам решения данной проблемы с квалифицированной оценкой объемов затрат, сбережения и срока окупаемости их внедрения.

Для высокой конкурентоспособности промышленного производства следует рационально эксплуатировать его системы энергоснабжения и своевременно проводить комплексную оценку их эффективности.

Библиографический список

1. Железко Ю. С., Артербев А. В., Савченко О. В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнер-

гии в электрических сетях. Руководство для практических расчетов. М.: НЦ ЭНАС, 2003. – С. 20–29.

2. **Яруллина Г. Р.** Управление энергосбережением на промышленном предприятии. – Казань: Изд-во КГФЭИ, 2009. – 111 с.

3. **Ольшанский А. И., Ольшанский В. И., Беляков Н. В.** Основы энергосбережения: курс лекций // УО «ВГТУ». – Витебск. 2007. – 223 с.

4. **Золотых С. Ф., Рожков С. В., Лобанова С. В.** Оценка методов повышения энергоэффективности электроснабжения предприятий // Известия ТулГУ, 2013. – № 12–1. – С. 135–141.

5. **Ефременко В. М., Беляевский Р. В.** О влиянии перетоков реактивной мощности на параметры систем электроснабжения промышленных предприятий // Вестник КузГТУ. 2011. – № 3. – С. 60–63.

6. **Соснина Е. Н., Филатов Д. А.** Применение возобновляемых источников энергии для повышения эффективности электроснабжения сельскохозяйственных предприятий // Дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н. Нижний Новгород, 2015. 154 с.

7. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р.

8. **Ермаков В. Ф.** Качество электроэнергии: учеб. пособие (конспект лекций; справочные материалы). – М.: Вузовская книга, 2012. – 192 с.

9. **Овчаренко Т. И., Васюченко П. В., Кирисов И. Г.** Анализ существующих систем электроснабжения предприятий как фактор повышения их эффективности // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2012. – № 7. – С. 17–22.

10. **Данилов О. Л.** Основы энергосбережения. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 424 с.

11. **Кузнецов А. В.** Повышение качества электроэнергии и снижение потоков реактивной мощности в электроэнергетической системе за счет стимулирующих тарифов // Сб. докладов междунаrodn. научно-практической конф. «Электрические аппара-

ты и электротехнические комплексы и системы». – Ульяновск, УлГТУ, Т.2. 2012. – С. 332–339.

12. Указания по проектированию электроснабжения промышленных предприятий (СН-174-75). – М.: Стройиздат, 1975. (Госстрой СССР).

13. **Амирова С. С., Михтахова Л. Х., Кандаков С. Н., Исаев А. А.** Разработка энергосберегающих мероприятий для цементного завода // Вестник КНИТУ. 2013. – №17. – Т.16. – С. 287–288.

14. **Бустром Дж, Кампус А., Хэмптон Р., Хейккала П., Ягер К., Смедберг А., Валд Д.** Сополимерные композиции шитого полиэтилена (SuperCopro) для высоконадежных силовых кабелей среднего напряжения // Кабели и провода. – 2010. – № 5. – С. 7–12.

15. **Воронов И. В., Политов Е. А.** Повышение эффективности эксплуатации систем электроснабжения предприятий путем комплексного использования SMART GRID и нейронных сетей // Вестник КузГТУ. 2012. – № 2. – С. 63–66.

16. **Авдеева Н. Л., Коган Ю. М., Романов А. Е.** О прогнозах потребления электроэнергии в условиях рыночной экономики России // Энергетик, 2003. – №7. – С. 9–12.

17. **Белан А. В., Гордеев В. И., Демур А. В., Надтока И. И.** Пути и результаты совершенствования методов прогнозирования электропотребления // Промышленная энергетика, 1993. – № 9–10. – С. 23–26.

18. **Воронов, И. В., Политов Е. А., Ефременко В. М.** Использование нейронной сети для краткосрочного прогнозирования электропотребления промышленного предприятия // Вестник КузГТУ. 2006. – № 6. – С. 71–73.

19. Умные сети Smart Grid в электроэнергетике. – URL: <http://slgaz.com/2016/03/smart-grid.html>. Дата обращения 15.11.2016.

20. **Безруких П. П.** Научно-техническое и методологическое обоснование ресурсов и направлений использования возобновляемых источников энергии // Дисс. на соиск. уч. степ. д. т. н. М., 2003. – 268 с.

UDC 621.311

METHODS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF ENERGY SUPPLY OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

V. S. Ivanov, Ph.D. (technical sciences), associate professor, Department of industrial electronics, RSREU; Vladimir.s.ivanoff@gmail.com

V. A. Ponomarev, master student, Department of industrial electronics, RSREU; vovanap@mail.ru

Methods of increasing the efficiency of energy supply systems are considered. Particular attention is paid to the suppression of higher harmonics in a power supply system and the introduction of active-adaptive networks. The reasons causing significant technological losses that reduce the efficiency of functioning of industrial enterprises of power system development are given. The modernization and reconstruction of existing power systems is a necessary solution to this problem in terms of the national industry of increasing competition for a reliable and uninterrupted production of end product on the market.

The aim is a comprehensive analysis of technical and economic indicators and affordable ways to improve energy industries, energy audits of existing networks for electricity savings.

Key words: energy efficiency, power, reactive power compensation, harmonic filters, transformers, filter-devices, power loss, thyristor, power cables.

DOI: 10.21667/1995-4565-2017-59-1-158-169

References

1. **Zhelezko Ju. S., Arterbev A. V., Savchenko O. V.** Raschet, analiz i normirovanie poter' jelektrojenergii v jelektricheskikh setjah. Rukovodstvo dlja prakticheskikh raschetov. M.: NC JeNAS, 2003. pp. 20–29.
2. **Jarullina G. R.** Upravlenie jenergosberezheniem na promyshlennom predpriyatii. Kazan: Issue KGFJeI, 2009. 111 p.
3. **Ol'shanskij A. I., Ol'shanskij V. I., Beljakov N. V.** Osnovy jenergosberezhenija: kurs lekcij. UO VGTU. Vitebsk. 2007. 223 p.
4. **Zolotyh S. F., Rozhkov S. V., Lobanova S. V.** Ocenka metodov povyshenija jenergojeffektivnosti jelektrosnabzhenija predpriyatij Izvestija TulGU, 2013. no 12–1. pp. 135–141.
5. **Efremenko V. M., Beljaevskij R. V.** O vlijanii peretokov reaktivnoj moshhnosti na parametry sistem jelektrosnabzhenija promyshlennyh predpriyatij. Vestnik KuzGTU, 2011. no 3. pp. 60–63.
6. **Sosnina E. N., Filatov D. A.** Primenenie vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии dlja povyshenija jeffektivnosti jelektrosnabzhenija sel'skohoz'jajstvennyh predpriyatij. Diss. na soisk. uch. step. k.t.n. Nizhnij Novgorod, 2015. 154 p.
7. Jenergeticheskaja strategija Rossii na period do 2030 goda. Rasporjazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 13 nojabrja 2009 g. no 1715-r.
8. **Ermakov V. F.** Kachestvo jelektrojenergii: uceb. posobie (konspekt lekcij; spravochnye materialy). M.: Vuzovskaja kniga, 2012. 192 p.
9. **Ovcharenko T. I., Vasjuchenko P. V., Kirisov I. G.** Analiz sushhestvujushchih sistem jelektrosnabzhenija predpriyatij kak faktor povyshenija ih jeffektivnosti. Jenergosberezhenie. Jenergetika. Jenergoaudit, 2012. no 7. pp. 17–22.
10. **Danilov O. L.** Osnovy jenergosberezhenija. M.: Issue dom MJeI, 2010. 424 p.
11. **Kuznecov A. V.** Povysenie kachestva jelektrojenergii i snizhenie potokov reaktivnoj moshhnosti v jelektrojenergeticheskoj sisteme za schet stimu-liruju-shhij tarifov. Sb. dokladov mezhdunarodn. nauchno-prakticheskoy konf. «Jelektricheskie apparaty i jelektrotehnicheskie komplekxy i sistemy». Ul'janovsk, UIGTU, Vol.2. 2012. pp. 332–339.
12. Ukazaniya po proektirovaniju jelektrosnabzhenija promyshlennyh predpriyatij (SN-174-75). M.: Strojizdat, 1975. (Gosstroj SSSR).
13. **Amirova S. S., Mihtahova L. H., Kandakov S. N., Isaev A. A.** Razrabotka jenergosberegajushhijh meroprijatij dlja cementnogo zavoda. Vestnik KNITU. 2013. no 17. Vol.16. pp. 287–288.
14. **Bustrom Dzh., Kampus A., Hjempton P., Hejkkala P., Jager K., Smedberg A., Vald D.** Sopolimernye kompozicii sshitogo polijetilena (SuperSoro) dlja vysokonadezhnyh silovyh kabelej srednego naprjazhenija. Kabeli i provoda. 2010. no 5. pp. 7–12.
15. **Voronov I. V., Politov E. A.** Povysenie jeffektivnosti jekspluatacii sistem jelektrosnabzhenija predpriyatij putem kompleksnogo ispol'zovanija SMART GRID i nejronnyh setej. Vestnik KuzGTU. 2012. no 2. pp. 63–66.
16. **Avdeeva N. L., Kogan Ju. M., Romanov A. E.** O prognozah potreblenija jelektrojenergii v uslovijah ry-nochnoj jekonomiki Rossii. Jenergetik, 2003. no 7. pp. 9–12.
17. **Belan A. V., Gordeev V. I., Demura A. V., Nadtoka I. I.** Puti i rezul'taty sovershenstvovanija metodov prognozirovanija jelektropotreblenija. Promyshlennaja jenergetika, 1993. No 9–10. pp. 23–26.
18. **Voronov, I. V., Politov E. A., Efremenko V. M.** Ispol'zovanie nejronnoj seti dlja kratkosrochnogo prognozirovanija jelektropotreblenija promyshlennogo predpriyatija. Vestnik KuzGTU. 2006. no 6. pp. 71–73.
19. Umnye seti Smart Grid v jelektrojenergetike. URL: <http://slgaz.com/2016/03/smart-grid.html>. Data obrashhenija 15.11.2016.
20. **Bezrukih P. P.** Nauchno-tehnicheskoe i metodologicheskoe obosnovanie resursov i napravlenij ispol'zovanija vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии. Diss. na soisk. uch. step. d. t. n. Moskva, 2003. 268 p.