

# КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ИСКАЖАЮЩИМИ ПОТРЕБИТЕЛЯМИ

АВТОРЫ:

ДОЛГОВ А. П.,  
К.Т.Н.,

РОГОВ Г. В.  
К.Т.Н.,  
ФИЛИАЛ  
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» –  
СИБНИИЭ

**Р**азвитие рыночных отношений в энергетике вынуждает относиться к электроэнергии не только как к физической сущности, но и как к товару, который должен обладать определенным качеством.

Под качеством электроэнергии (КЭ) понимается степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей КЭ.

**Ключевые слова:** качество электроэнергии, электрифицированные железные дороги, электровоз, тяговые подстанции, активные фильтры гармоник.



Электрифицированные железные дороги существенно влияют на качество электроэнергии электрических сетей

## ВВЕДЕНИЕ

Качество электроэнергии, поставляемой потребителю, зависит не только от качества вырабатываемой и передаваемой энергии, но и от особенностей самого потребителя и специфики электрической сети. Доля потребителей, понижающих основные показатели КЭ, постоянно растет, а большая протяженность электрических сетей, связанная с необходимостью передавать энергию на значительные расстояния, способствует еще большему ухудшению КЭ. Примером потребителей, существенно влияющих на КЭ, могут служить электрифицированные железные дороги с электроподвижным составом значительной единичной мощности. Протяженность электрических сетей, снабжающих электроэнергией российские железные дороги, определяется огромными расстояниями нашей страны и составляет тысячи километров. Повышение показателей КЭ и приведение их в соответствие с существующими стандартами возможно путем применения специальных устройств,

расположенных как можно ближе к источникам искажений – либо на самих электровозах и тяговых подстанциях, либо на крупных узловых подстанциях питающих сетей. Первое предложение связано с реконструкцией и заменой значительного количества единиц оборудования (электровозов, тяговых подстанций). В данной статье обсуждается второе предложение – применение специальных устройств на узловых подстанциях. Этот подход дает возможность одновременно улучшать отдельные показатели качества электроэнергии и решать всю проблему комплексно

## ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

Низкое КЭ ухудшает условия работы электрических сетей и приводит к значительному ущербу на всех уровнях – от генерации до потре-

## ФРАГМЕНТ ТИПИЧНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

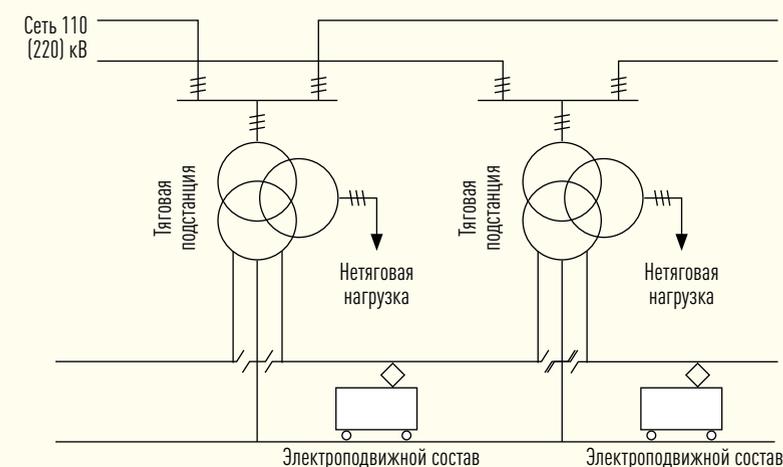
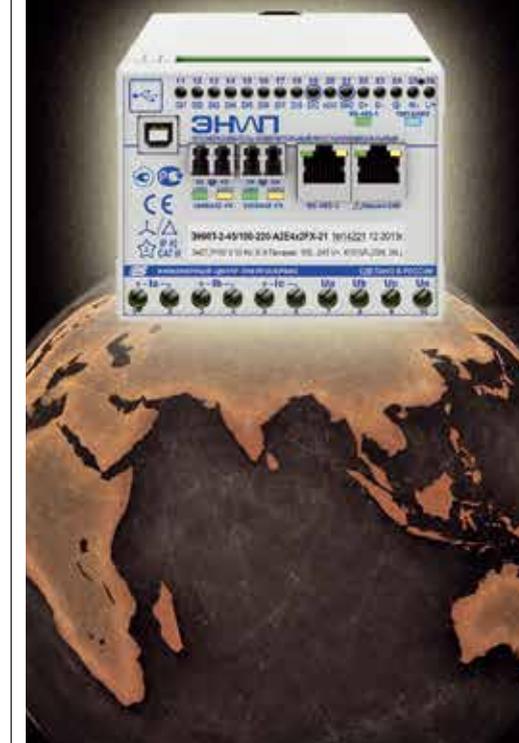


Рис. 1

ПРИШЕЛ. УВИДЕЛ.  
ПОБЕДИЛ.

\* от Калининграда до Сахалина,  
от Новой Земли до Сочи



ЗНИП-2

реклама  
многофункциональные  
измерительные  
преобразователи

enip2.ru  
+7 (8182) 65-75-65



**ES** ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР  
ЭНЕРГОСЕРВИС  
РАЗРАБОТАНО И СДЕЛАНО В РОССИИ

## УПРОЩЕННАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ БАЙКАЛО-АМУРСКОЙ МАГИСТРАЛИ УРОВНЯ 2015 ГОДА

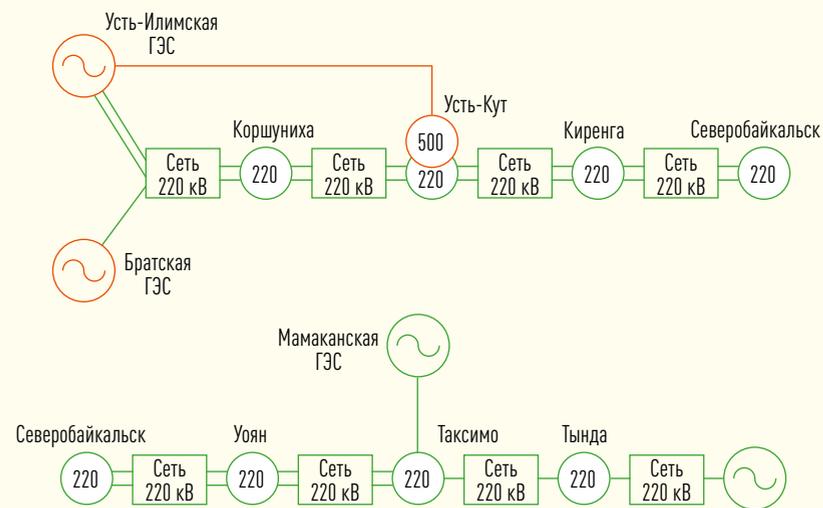


Рис. 2

## КОЭФФИЦИЕНТ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ ПО ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В ТЕЧЕНИЕ СУТОК ПО ПОДСТАНЦИИ КИРЕНГА

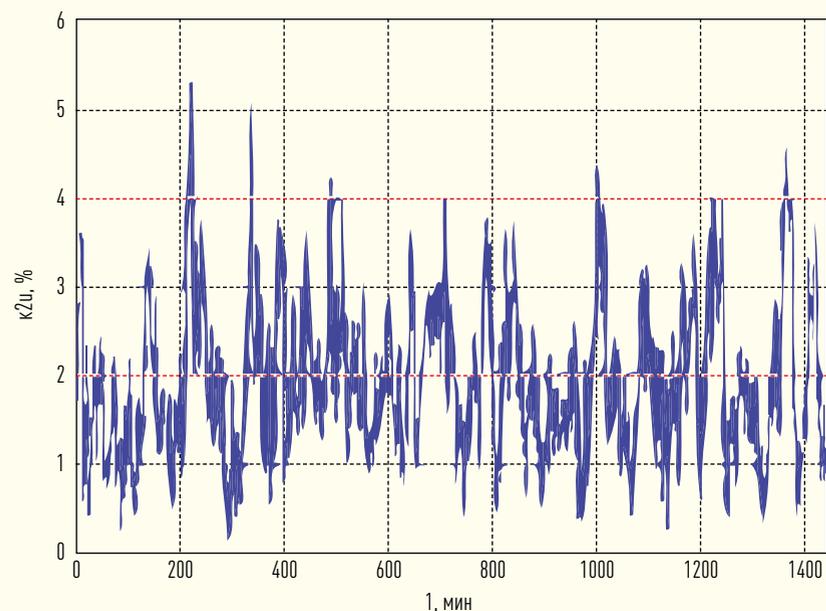


Рис. 3

бления [1]. В настоящее время в электрических сетях России КЭ не в полной мере отвечает требованиям существующих стандартов [2]. Особенно выражены проблемы КЭ в системах электроснабжения железных дорог (рис. 1).

Перемещение электровозов и изменение потребляемой ими мощности вызывает значительные резкие отклонения напряжения на шинах тяговых подстанций от номинального значения. Электровозы являются однофазными потребителями и питаются от сети переменного тока через выпрямители, а, значит, представляют собой источники несимметрии и несинусоидальности. Натурные измерения, выполненные в 2010 г. в системах внешнего электроснабжения Байкало-Амурской магистрали (рис. 2) и Забайкальской железной дороги, показали, что на большинстве подстанций коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности превышают значения, допустимые по действовавшему в то время ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [3]. Так, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения превышал допустимые значения практически в течение всего времени наблюдения на всех подстанциях. Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности превышал допустимые значения на ПС Киренга, Лена и Таксимо в течение 40,63%, 8,82% и 35,35% времени наблюдения соответственно. В качестве примера на рисунке 3 приведены значения коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности для подстанции Киренга. На рисунке 4 приведены

## КОЭФФИЦИЕНТ ИСКАЖЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОСТИ КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ В ТЕЧЕНИЕ СУТОК ПО ПС КУАНДА

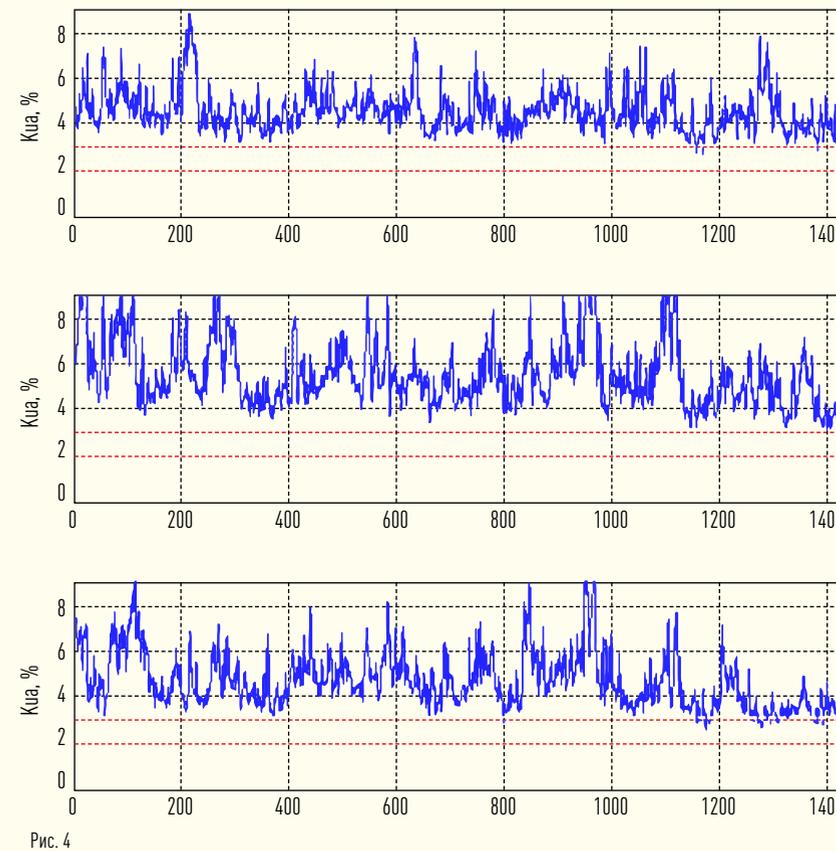


Рис. 4

значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения для фаз А, В, С подстанции Куанда.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Численные эксперименты подтвердили факт ухудшения в системах внешнего электроснабжения железных дорог Восточной Сибири

основных показателей качества электроэнергии, которые нормируются ныне действующим ГОСТ Р 54149-2010. Нарушения сохраняются, несмотря на развитие питающей сети в ближайшей перспективе (до 2020 г.), и объясняются увеличением интенсивности движения по железным дорогам Восточной Сибири, повышением массы составов, наличием горных участков с уклонами и подъемами.

Существующие в настоящий момент методы (применение пофазно регулируемых средств компенсации реактивной мощности или пассивных фильтров) способны повысить

качество электрической энергии, однако ряд недостатков не позволяет перейти к их широкому применению. Например, пассивные фильтры не обеспечивают полное поглощение токов высших гармоник в электрических системах с резкопеременными нагрузками, а также сами образуют резонансные контуры с реактивными элементами сети, что может привести к возрастанию токов гармоник высоких частот. Применение таких фильтров осложняется возможностью непредусмотренного повышения напряжения вследствие того, что резонансная цепь пассивного фильтра, имеющая нулевое сопротивление для высшей гармоники, представляет собой емкость для первой гармоники.

В то же время известны методы (успешно применяемые за рубежом [4, 5]), основанные на достижениях силовой электроники, дающие возможность эффективно решить задачу повышения качества электрической энергии. Реализация подобных предложений в России позволит, помимо решения основной задачи управления качеством электрической энергии, перейти к решению и других достаточно важных проблем. К числу последних можно отнести освоение отечественной промышленностью передовых технических решений, формирование соответствующего опыта в проектировании и эксплуатации, создание технической базы активно-адаптивной сети.

Предложения по повышению качества электроэнергии, основанные на достижениях силовой электроники, – активные фильтры гармоник (АФГ) – содержат в своей основе преобразователь напряжения (ПН). АФГ способны осуществлять регулирование напряжения и компенсацию реактивной мощности, симметрирование и исключение высших гармоник тока или напряжения. АФГ обладают высоким быстродействием,

## ПОДКЛЮЧЕНИЕ АФГ

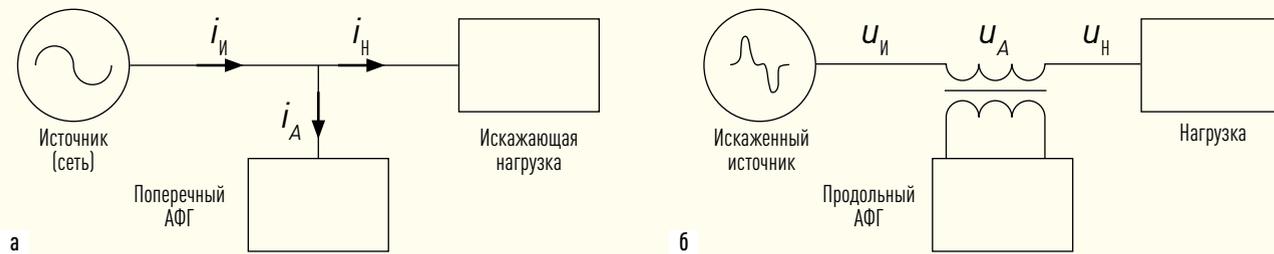


Рис. 5 а) поперечного; б) продольного

позволяющим практически мгновенно реагировать на изменения режима нагрузки или сети. Существуют поперечные АФГ и продольные АФГ. Поперечные АФГ подключаются параллельно искажающей нагрузке и создают такой несимметричный несинусоидальный ток  $i_A$ , который в сумме с током нагрузки  $i_{н}$  дает симметричный синусоидальный

ток в ветви источника  $i_{и}$  (рис. 5а). Продольные АФГ подключаются последовательно между источником (сетью) и нагрузкой через последовательный трансформатор (рис. 5б) и предназначены для защиты нагрузки от искажений, существующих в сети. Продольные АФГ создают несимметричную несинусоидальную добавку напряжения  $u_A$ , которая в сумме с напряжением источника  $u_{и}$  дает симметричное синусоидальное напряжение на шинах нагрузки  $u_{н}$ .

АФГ хорошо проявляют свои возможности в радиальных схемах и уже нашли широкое применение в сетях низкого и среднего напряжения. Использование АФГ может быть неприемлемо в разветвленных сетях с множеством искажающих нагрузок, к каким относятся электрические сети железных дорог. Для требуемого повышения КЭ в СЭЖД необходима установка АФГ на каждой тяговой подстанции. Такое решение предполагает значительные капитальные вложения. Еще большую сложность могут представлять организационные проблемы, связанные с принадлежностью тяговых подстанций. Разные собственники могут иметь несовпадающее видение проблемы, а у некоторых может и отсутствовать заинтересованность в ее решении.

Существующие средства комплексного повышения КЭ оказывают местное воздействие: на ток одного присоединения или напряжение на шинах среднего или низкого на-

пряжения. В электрических системах с распределенными искажающими нагрузками целесообразным может быть централизованное воздействие: на напряжение на шинах высокого напряжения. Это позволит существенно повысить КЭ во всей сети при установке одного устройства.

Устройство комплексного повышения КЭ, напрямую воздействующее на напряжение высоковольтной сети, можно назвать активным кондиционером напряжения (АКН). АКН представляет собой ПН с конденсатором на стороне постоянного тока, подключенный через трансформатор к сети высокого напряжения (рис. 6). ПН построен на полностью управляемых вентилях с высокой частотой коммутации. Независимый выбор моментов коммутации вентилях фаз позволяет создавать на выводах ПН несимметричное напряжение. Использование широтно-импульсной модуляции дает возможность управлять гармоническим составом напряжения. Стратегия управления АКН заключается в том, что на выводах ПН создается такое напряжение, которое обеспечивает поддержание на шинах подстанции желаемого напряжения. Желаемое напряжение представляет собой симметричную систему синусоидального напряжения заданной величины. Напряжение на выводах ПН при этом в общем случае несимметрично и содержит высшие гармоники.

На сегодняшний день возможно создание АКН на базе IGBT (Insulated

## ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА УСТРОЙСТВА КОМПЛЕКСНОГО ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

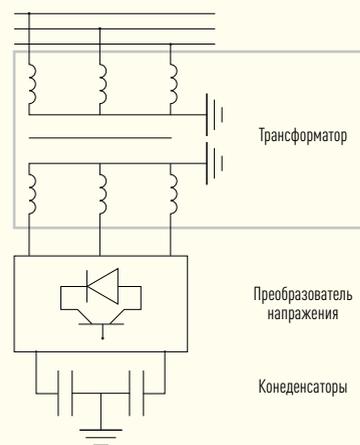


Рис. 6

# V Всероссийская кадровая конференция ТЭК «Роль человеческого капитала и социальной политики в энергетической стратегии России» Минэнерго России



20 НОЯБРЯ 2014 г.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕССНО-ВИСТАВОЧНЫЙ КОМПЛЕКС  
«МосЭкспо» (г. Москва, ВДНХ, павильон 75)

В программе конференции:

ПАНЕЛЬНАЯ  
ДИСКУССИЯ

ОБУЧАЮЩИЙ СЕМИНАР  
ДЛЯ СПЕЦИАЛИСТОВ  
КАДРОВЫХ СЛУЖБ

КРУГЛЫЙ  
СТОЛ

Подробная информация о конференции на сайте [www.epp-expo.com/ru](http://www.epp-expo.com/ru)

## ИЗМЕНЕНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПЯТОЙ ГАРМОНИКИ В ТОЧКЕ ПОДКЛЮЧЕНИЯ АКН

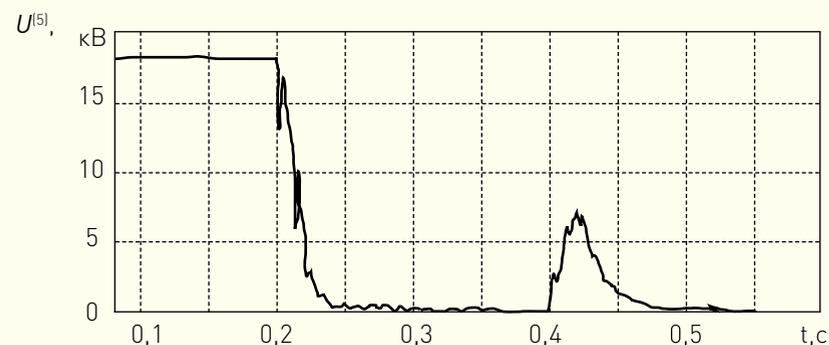


Рис. 7

## ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В ТОЧКЕ ПОДКЛЮЧЕНИЯ АКН

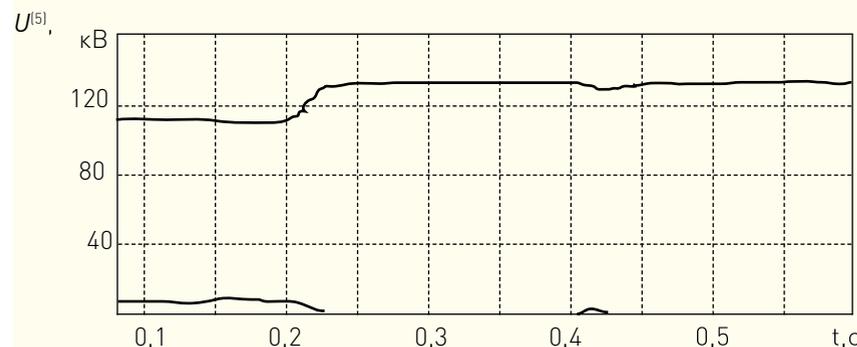


Рис. 8

Gate Bipolar Transistor – биполярный транзистор с изолированным затвором). Существуют IGBT на 3500 В, 1200 А [6] и более при предельной частоте коммутации несколько десятков кГц. С целью повышения допустимого тока плеча и мощности ПН используется параллельное соединение нескольких вентилях в одном плече. Для увеличения напряжения ПН применяется последовательное соединение не-

скольких вентилях в одном плече. Последовательное и параллельное соединение вентилях позволили построить ПН мощностью 100 МВА и выше и напряжением до 35 кВ. Создание ПН напряжением 110–220 кВ нецелесообразно. К сетям такого напряжения ПН подключают через трансформаторы.

Нами была разработана модель электрической системы с АКН

(в приложении Simulink пакета MATLAB). Результаты моделирования представлены на рисунках 7 и 8. Включение АКН происходит в момент 0,2 с. До этого можно было наблюдать исходную картину, характеризующуюся высокой степенью несинусоидальности и несимметрии. В момент 0,4 с в системе происходит изменение, в результате которого ухудшается КЭ. АКН за малое время подстраивается к изменению режима и подавляет высшие гармоники и напряжение обратной последовательности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Была рассмотрена возможность решения задачи повышения КЭ в системе внешнего электроснабжения Байкало-Амурской магистрали уровня 2015 г. К 2015 г. в сети планируется установка нескольких СКРМ, однако в обсуждаемой модели перспективные СКРМ не учитываются, так как их функции могут выполнять АКН.

Расчеты, выполненные на основе имитационного моделирования движения поездов с помощью программного комплекса Fazopord-Качество [7], показывают, что установка двух АКН ориентировочной мощностью по 40 МВА на подстанциях Киренга и Уоян позволяет добиться соответствия КЭ требованиям ГОСТ на всех подстанциях. На рисунках 9, 10 приведены максимальные за межпоездный интервал значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности на шинах 220 кВ одной из фаз всех подстанций до и после установки АКН. Нормально допустимые значения этих коэффициентов для сетей 220 кВ составляют 2 %.

## СУММАРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯ

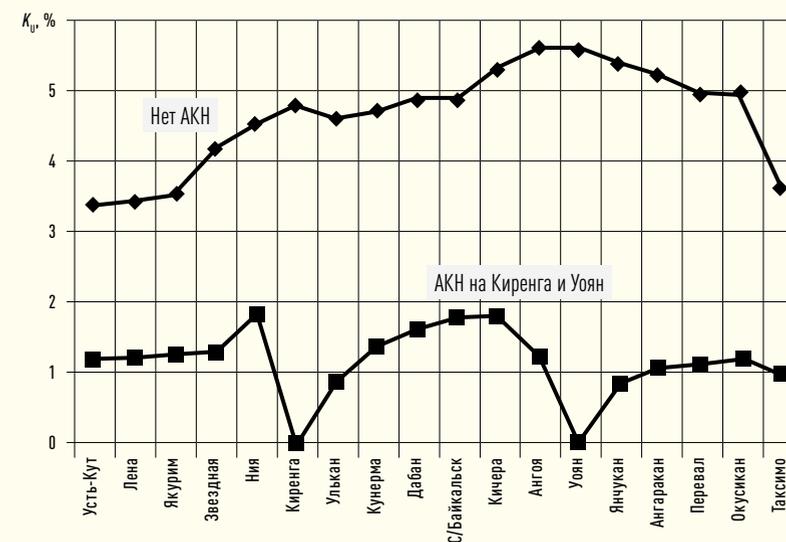


Рис. 9

## КОЭФФИЦИЕНТ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ ПО ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

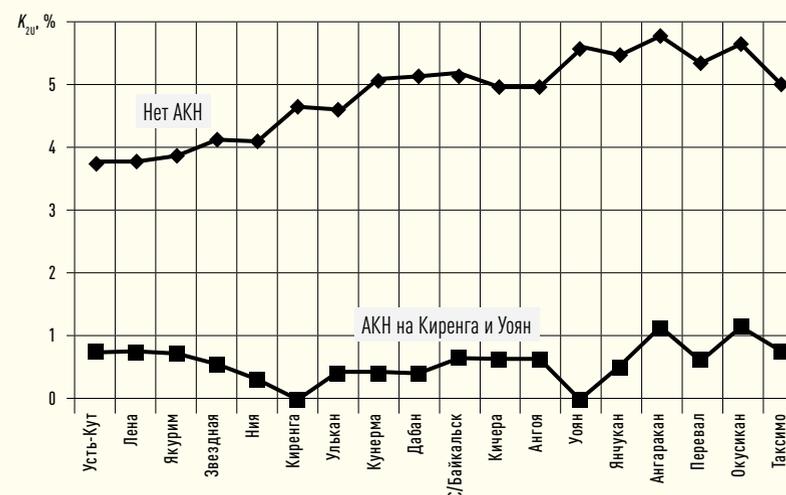


Рис. 10

В системе электроснабжения Байкало-Амурской магистрали часто возникают колебания напряжения, обусловленные движением мощных электровозов. Эти колебания снижают эффективность работы сети 220 кВ и осложняют регулирование напряжения в точках питания электроприемников. На рис. 11 показано влияние АКН на размах колебаний напряжения, то есть разность максимального и минимального значений напряжения за межпоездный интервал.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Качество электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог Восточной Сибири не соответствует требованиям действующих стандартов.
2. Планируемое сетевое строительство улучшает ситуацию, но задача повышения отдельных показателей качества электроэнергии остается нерешенной.
3. Применение пофазно управляемых средств компенсации реактивной мощности дает возможность существенно улучшить коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности и отклонение напряжения.
4. Современные устройства повышения качества электроэнергии за рубежом применяются в сетях низкого и среднего напряжения, используются в пределах ограниченной электрической сети с действием на малое количество потребителей.
5. Принципиально возможно создание универсального устройства, позволяющего одновременно улуч-

ИНФОРМАЦИЯ

## ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ В РОССИИ

Электрификация железных дорог в СССР началась со знаменитого плана ГОЭЛРО (1921 г.) в соответствии с которым в 1926 г. был электрифицирован первый в стране участок Баку-Сураханы протяженностью 19 км.

В Российской Федерации первой электрифицированной дорогой стал участок Москва — Мытыщи (17,7 км). Регулярное движение пригородных поездов открылось 1 окт. 1929 г. С 1956 по 1991 гг. в СССР переведено на электрическую тягу почти 50 тыс. км ж.д. магистралей. К концу 1991 г. общая протяженность электрифицированных линий составила 55,2 тыс. км. В настоящее время в России на электрической тяге осуществляется более 50% всех грузовых перевозок. В мире электрификации уделяется огромное значение. В Швейцарии электрифицировано почти 100% ж. д. (около 3000 км), в Швеции — свыше 60% (более 7500 км), в Италии — около 50% (более 8000 км).

## РАЗМАХ КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ

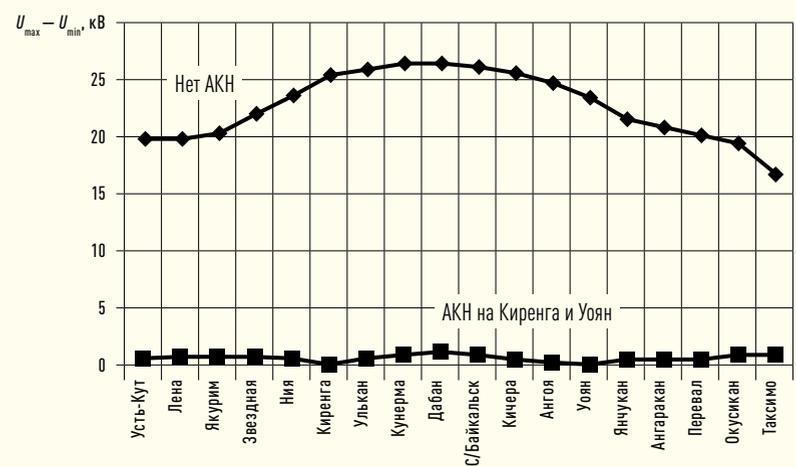


Рис. 11

шать несколько показателей качества электроэнергии и распространяющего свое влияние на смежные подстанции.

6. В системе электроснабжения Байкало-Амурской магистрали для обеспечения нормируемых показателей качества электроэнергии в 2015 г. достаточно применения двух универсальных устройств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Горпинич А.В. Оценка надежности электрооборудования при пониженном качестве электроэнергии // Вести в электроэнергетике, № 6, 2006. – с. 13–17.
2. Добрусин Л.А. Проблема качества электроэнергии и электросбережения в России // Энергоэксперт, № 4, 2008, с. 14–19.
3. Долгов А.П., Кандаков С.А., Осадчев М.А. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог Восточной Сибири // Управление, информация и оптимизация в электро-

энергетических системах: тез. докл. Междунар. молодежной научно-техн. конф. – г. Новосибирск, 21–24 сентября 2011. – Новосибирск, 2011. – с. 52.

4. Grunbaum R., Andreasson L. STATCOM for Improved Grid Stability and Power Transmission Capability // [http://www.aesieap0910.org/upload/File/PDF/4-Technical%20Sessions/TS02/TS0205/TS0205\\_FP.pdf](http://www.aesieap0910.org/upload/File/PDF/4-Technical%20Sessions/TS02/TS0205/TS0205_FP.pdf)
5. Akagi H. New Trends in Active Filters for Power Conditioning // IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 6, November/December 1996.
6. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. тех. ун-та., 2004. – 672 с.
7. Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ №2007612771 (РФ) «Fazonord-Качество – Расчеты показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения в фазных координатах с учетом движения поездов» / Закарюкин В.П., Крюков А.В. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Зарегистр. 28.06.2007.

# ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ПС 35-110 КВ ДЛЯ РАСПРЕДСЕТЕЙ

На правах рекламы

Технологии цифровой подстанции (ЦПС) активно развиваются, и сегодня рассматривается их применение как в магистральных, так и в распределительных сетях РФ. Однако для применения технологий ЦПС в РСК необходимо учесть ряд технических и организационных факторов.

### Традиционно к элементам ЦПС относятся следующие технологии:

Полевое УСО или контроллер для «цифровизации» коммутационных аппаратов (УСО для разъединителей и ЗН, используемое только для нужд АСУТП; УСО для всех КА, используемое для нужд всех вторичных систем ПС);

Цифровизация измерительных ТТ/ТН (АМУ, подключаемые к традиционным ТТ/ТН, с оцифровкой измерений в формат МЭК 61850-9-2); Цифровые ТТ/ТН с выдачей информации по МЭК 61850-9-2;

Централизованные решения (укрупнение функциональных устройств или программная реализация всех функций в едином сервере).

Базовый принцип ЦПС – однократный ввод информации с последующим многократным ее использованием для нужд различных систем.

Применение технологий ЦПС в РСК затруднительно, поскольку в них еще не получила широкого распространения комплексная автоматизация ПС.

Базовые технологии автоматизации, освоение которых должно предшествовать применению элементов ЦПС:

Распределенная структура систем автоматизации; Реализация систем автоматизации в виде отдельных функциональных ПТК (телемеханика, оперативная блокировка, система мониторинга РЗА); Комплексная автоматизация ПС с использованием единого ПТК АСУТП; Комплексный подход ко вторичным системам; Использование многофункциональных устройств РЗА/АСУТП/ТМ для нужд различных систем.

Техническая целесообразность применения данных технологий не-

сомненна, но основное препятствие для их внедрения – существующая организационная структура РСК. Общепринятый подход – создание отдельных ПТК, ориентированных на независимое использование различными службами.

Комплексная автоматизация ПС требует пересмотра зон ответственности различных служб при эксплуатации единого ПТК АСУТП, а в будущем – единого ПАК ЦПС.

Еще одна особенность РСК – объекты автоматизации (в основном ПС 35-110кВ и ниже). Не все технологии ЦПС эффективны для таких объектов. По результатам исследований компании «РТСофт» разработана таблица эффективности технологий автоматизации и ЦПС для различных типов исполнений ПС РСК.

### Выводы

- 1) ЦПС для РСК – это в первую очередь внедрение современных ПТК АСУТП;
- 2) Наиболее эффективны простые решения:
  - а. Многофункциональные устройства РЗА/АСУТП/ТМ;
  - б. Полевые УСО и контроллеры с поддержкой МЭК 61850-8-1.

Компания «РТСофт» готова предложить и реализовать оптимальные и эффективные решения по построению цифровых ПС всех классов напряжения.

**Леонид Орлов.** Директор направления автоматизации подстанций ЗАО «РТСофт»  
**тел. 8-495-967-1505**  
pr@rtsoft.ru | www.rtsoft.ru

Технология	ОРУ110	ОРУ35	КРУЭ110	КРУ35
Распределенная структура	+	+	+	+
Комплексная АСУТП	+	+	+	+
МЭК 61850-8-1 для АСУТП и ОБР	+	+	+	+
МФУ (ТМ+ОБ)	+	+	+	+
МФУ (ТИ+ТС+ТУ)	+	+	+	+
МФУ (РЗА+АУВ+КП)		+		+
МЭК 61850-8-1 GOOSE для РЗА		+		+
Полевое УСО	+	+	+	
Полевой контроллер			+	
АМУ с выходом 61850-9-2				
ЦИТ с выходом 61850-9-2				