

кварцевой керамики использование двух стадий измельчения от 5 до –1 мм позволяет уменьшить удельные затраты энергии на 16,3 кВт·ч/т по сравнению с одностадийным измельчением.

Измельчение руд Шерловгорского месторождения в две стадии позволяет уменьшить удельные затраты энергии на 3,42 кВт·ч/т. Следует отметить хорошее совпадение расчетных данных по определению размера отверстий электрода-классификатора на промежуточной стадии с результатами разрушения сырья.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. – Л.: Наука, 1988. – 277 с.
2. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2002. – 324 с.

#### Выводы

1. Разрушение сырья электроимпульсным способом в несколько стадий при использовании оптимальных энергий единичного импульса позволяет существенно уменьшить энергопотребление по сравнению с одностадийным дроблением.
2. Предложенная методика может быть рекомендована для определения как количества стадий, так и крупности разрушения на них.
3. Власов О.Е., Смирнов С.А. Основы расчета дробления горных пород взрывом. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 140 с.
4. Жекул В.Г., Раковский Г.Е. К теории формирования электрического разряда в проводящей жидкости // Журнал технической физики. – 1983. – № 53. – Вып. 1. – С. 8–14.

Поступила 12.02.2013 г.

УДК 621.311

## КОМПЛЕКСНОЕ ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЛОЖНЫХ СЕТЯХ

Г.В. Рогов

Филиал ОАО «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергосистемы» – СибНИИЭ, г. Новосибирск  
E-mail: grigoriyrogov@mail.ru

*Рассмотрены способы повышения качества электроэнергии в сложных сетях с множественными искажающими нагрузками. Предложено применение активных кондиционеров напряжения, напрямую воздействующих на величину, симметрию и гармонический состав напряжения. Разработан алгоритм управления активным кондиционером напряжения. Продемонстрирована эффективность активных кондиционеров напряжения на примере системы электроснабжения Байкало-Амурской магистрали.*

#### Ключевые слова:

Качество электроэнергии, преобразователь напряжения, активный кондиционер напряжения, Байкало-Амурская магистраль.

#### Key words:

Power quality, voltage source converter, active power conditioner, Baykal-Amur railroad.

Электроэнергия, как и любой другой товар, должна обладать определенным качеством, чтобы соответствовать требованиям рынка. Низкое качество электроэнергии (КЭ) приводит к значительному ущербу на всех уровнях электроэнергетической системы – от генерации до потребления. В последние годы проблема КЭ обостряется ростом доли преобразовательной нагрузки, которая, с одной стороны, является чувствительной к КЭ, с другой стороны, сама является источником искажений, в первую очередь, гармонических. Сегодня практически в каждой квартире и на каждом промышленном предприятии присутствуют выпрямители, работа которых обуславливает протекание несинусоидальных токов и, как следствие, искажение формы кривой напряжения. В будущем число и мощность преобразовательных электроприемников будут только расти. В таких условиях любое присоединение электрической сети может рассматриваться как источник искажений.

Ярким примером сетей с множественными искажающими нагрузками являются системы электроснабжения железных дорог. Перемещение электропоездов в пространстве и изменение потребляемой ими мощности приводит к резким и значительным отклонениям напряжения на шинах тяговых подстанций от номинального значения. Электропоезда являются однофазными электроприемниками, и их подключение к трехфазной сети вызывает несимметрию напряжения. Наконец, электропоезда питаются от сети переменного тока через выпрямители, а значит, являются источниками токов высших гармоник. Вычислительные эксперименты [1] и натурные замеры [2] показывают, что в сети 220 кВ электроснабжения Байкало-Амурской магистрали (БАМ) практически на всех подстанциях не соответствуют требованиям ГОСТ такие показатели КЭ, как суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и коэффициент

несимметрии напряжения по обратной последовательности.

Для стабилизации напряжения в сетях с резкопеременными нагрузками могут использоваться быстродействующие управляемые средства компенсации реактивной мощности (СКРМ), например статический тиристорный компенсатор [3], управляемый шунтирующий реактор, СТАТКОМ. При реализации пофазного управления эти средства могут также снижать несимметрию в сети.

Для борьбы с высшими гармониками традиционно применяются пассивные фильтры (также распространено название фильтрокомпенсирующие устройства), представляющие собой индуктивно-емкостные цепи, настроенные в резонанс на частоте одной или нескольких высших гармоник. Для поглощения токов высших гармоник в сложных сетях с множеством искажающих нагрузок необходима установка большого количества пассивных фильтров. Такое решение приводит к значительному увеличению числа контуров в схеме сети и возможности возникновения резонанса на какой-либо частоте при определенных условиях. Поэтому весьма сложным является отыскание набора пассивных фильтров, обеспечивающего необходимое снижение напряжений высших гармоник в сети. Изменение схемы сети или вывод в ремонт одного из фильтров могут нарушить работу системы фильтров и привести к резкому возрастанию напряжения отдельных гармоник. Применение пассивных фильтров осложняется возможностью недопустимого повышения напряжения вследствие того, что индуктивно-емкостная цепь пассивного фильтра, имеющая нулевое сопротивление для высшей гармоники, является источником реактивной мощности для первой гармоники.

Развитие силовой электроники позволило создать более совершенные активные фильтры гармоник (АФГ), основным элементом которых являются преобразователи напряжения (ПН) на полностью управляемых вентилях с высокой частотой коммутации. АФГ не создают резонансных контуров и способны практически мгновенно реагировать на изменения режима нагрузки или сети. АФГ способны также осуществлять управляемую компенсацию реактивной мощности и симметрирование токов или напряжений. Существуют поперечные и продольные АФГ. Поперечные АФГ подключаются параллельно искажающей нагрузке и создают такой несимметричный несинусоидальный

ток  $i_A$ , который в сумме с током нагрузки  $i_H$  дает симметричный синусоидальный ток в ветви источника  $i_H$  (рис. 1, а). Для эффективной борьбы с несимметрией и несинусоидальностью в системе необходима установка поперечных АФГ в ветвях всех искажающих присоединений, что затруднено по техническим, экономическим и организационным причинам. Продольные АФГ подключаются последовательно между источником (сетью) и нагрузкой через последовательный трансформатор (рис. 2, б) 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  $u_H$  дает симметричное синусоидальное напряжение на шинах нагрузки  $u_H$ .

Существующие пассивные и активные фильтры гармоник предназначены для использования в простых радиальных сетях. В сложных сетях с множеством искажающих нагрузок их применение неперспективно. Для сложных сетей необходимо устройство, установка которого на одной подстанции приводит к существенному повышению КЭ во всей сети или на прилежащем участке сети. Например, установка управляемого СКРМ на одной подстанции в большинстве случаев обеспечивает приближение напряжения к желаемой величине на большом количестве подстанций той же сети. Пофазно управляемое СКРМ может обеспечить поддержание на шинах подстанции практически симметричного напряжения желаемой величины. Из-за протекания несимметричных токов напряжение на соседних подстанциях будет отличаться от идеального как по величине, так и по симметрии. Тем не менее, установка одного пофазно управляемого СКРМ позволяет снизить коэффициенты несимметрии и приблизить напряжение к желаемому значению на большом участке сети.

Привлекательна идея создания устройства, влияние которого на высшие гармоники подобно влиянию пофазно управляемого СКРМ на величину и симметрию напряжения, то есть устройства, обеспечивающего поддержание практически синусоидального напряжения на шинах одной подстанции и снижающего суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на большом участке сети. Реализация такого устройства возможна на основе ПН на полностью управляемых вентилях с высокой частотой коммутации. Использование широтно-импульсной моду-

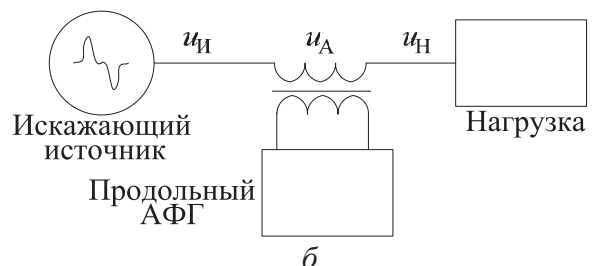
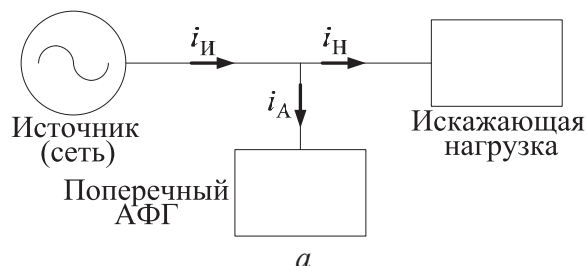


Рис. 1. Подключение АФГ: а) поперечного; б) продольного

ляции для управления моментами коммутации вентилей позволяет создавать на выводах ПН напряжение заданного гармонического состава. Независимый выбор моментов коммутации вентилей разных фаз дает возможность создания несимметричного напряжения, а изменение коэффициента модуляции позволяет управлять величиной напряжения на выводах ПН. Таким образом, возможно совмещение в одном устройстве функций регулирования величины напряжения, симметрирования напряжения и исключения высших гармоник напряжения. Устройство на основе ПН, поддерживающее симметричное синусоидальное напряжение заданной величины в некоторой точке, может быть названо активным кондиционером напряжения (АКН).

Основными элементами АКН являются ПН, конденсатор на стороне постоянного тока, предназначенный для запаса энергии, и трансформатор, обеспечивающий возможность подключения ПН к сети напряжением 110 кВ и выше (рис. 2). Напряжение на выводах ПН АКН представляет собой высокочастотную последовательность импульсов. Такое напряжение оказывает значительное разрушающее воздействие на изоляцию. Для предотвращения появления такого напряжения в сети возможна установка в цепи АКН индуктивно-емкостного сглаживающего фильтра.

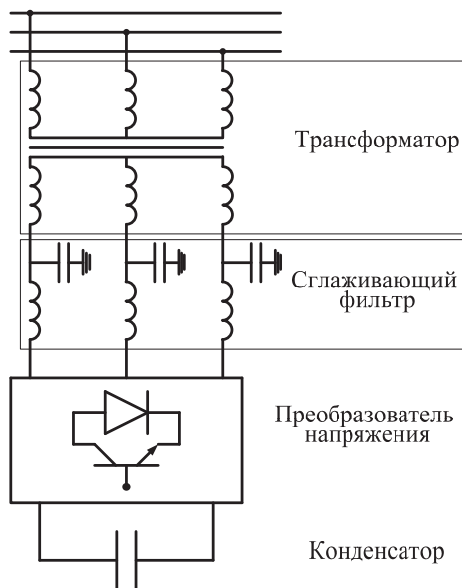


Рис. 2. Принципиальная схема АКН

Расчет линейных электрических цепей, в которых действуют несинусоидальные источники тока и напряжения, производят на основе принципа наложения, который позволяет для каждой гармоники рассматривать отдельную схему. В каждой схеме действуют синусоидальные токи и напряжения одной частоты, амплитуды и фазы которых могут быть получены при разложении в ряд Фурье исходных несинусоидальных функций, характеризующих источники. Напряжение на выводах ПН

также может быть разложено в ряд Фурье с образованием гармонических составляющих. Поэтому в схеме отдельной гармоники ПН может быть представлен в виде комплексного источника ЭДС. Схема замещения фазы АКН, соответствующая принципиальной схеме рис. 2, показана на рис. 3, а. Для каждого из элементов АКН возможны разные схемы замещения, кроме того, возможны разные конфигурации цепи АКН. Поэтому в общем случае целесообразно использовать эквивалентную схему замещения, рис. 3, б. Параметры эквивалентной схемы замещения связаны с параметрами полной схемы замещения комплексными коэффициентами, постоянными для данного АКН. Например, для схемы на рис. 2

$$\underline{Z}_A^{(v)} = \underline{Z}_T^{(v)} + \frac{\underline{Z}_И^{(v)} \cdot \underline{Z}_E^{(v)}}{\underline{Z}_И^{(v)} + \underline{Z}_E^{(v)}};$$

$$\underline{E}_A^{(v)} = \frac{\underline{E}_{ПН}^{(v)} \cdot \underline{Z}_E^{(v)}}{\underline{Z}_И^{(v)} + \underline{Z}_E^{(v)}}, \quad (1)$$

где  $\underline{Z}_A^{(v)}$  – эквивалентное сопротивление АКН току гармоники порядка  $v$ ;  $\underline{Z}_T^{(v)}$  – сопротивление трансформатора току гармоники порядка  $v$ ;  $\underline{Z}_И^{(v)}$  – сопротивление индуктивного элемента сглаживающего фильтра току гармоники порядка  $v$ ;  $\underline{Z}_E^{(v)}$  – сопротивление емкостного элемента сглаживающего фильтра току гармоники порядка  $v$ ;  $\underline{E}_A^{(v)}$  – эквивалентная ЭДС АКН гармоники порядка  $v$ ;  $\underline{E}_{ПН}^{(v)}$  – напряжение гармоники порядка  $v$  на выводах ПН.

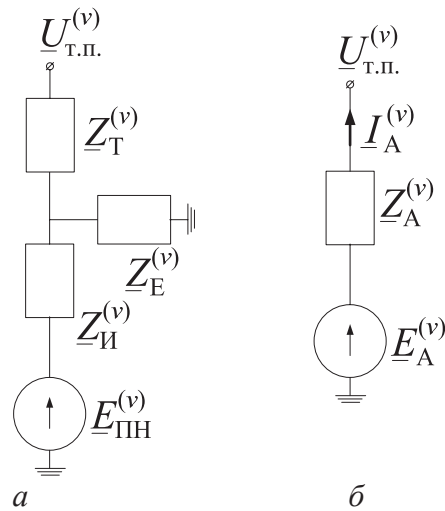


Рис. 3. Схема замещения АКН: а) полная; б) эквивалентная

Стратегия управления АКН заключается в создании на выводах ПН такого напряжения, которое обеспечивает желаемое напряжение в точке подключения АКН к сети. Желаемое напряжение представляет собой симметричную систему синусоидального напряжения заданной величины. Напряжение на выводах ПН при этом в общем виде несимметрично и несинусоидально. Любое изменение режима системы приводит к необходимости изменения напряжения на выводах ПН. Поэтому требуется алгоритм определения необходимого на-

пряжения на выводах ПН по информации, получаемой замером в месте установки АКН. Ниже приводится возможный алгоритм работы АКН.

Рассматривая отдельную гармонику порядка  $\nu$ , для схемы (рис. 3, б) можно записать выражение:

$$\underline{U}_{\text{т.п.}}^{(\nu)} = \underline{E}_A^{(\nu)} - \underline{I}_A^{(\nu)} \underline{Z}_A^{(\nu)},$$

где  $\underline{U}_{\text{т.п.}}^{(\nu)}$  — напряжение гармоники порядка  $\nu$  в точке подключения АКН к сети;  $\underline{I}_A^{(\nu)}$  — ток гармоники порядка  $\nu$  в эквивалентной ветви АКН.

Тогда ЭДС АКН, которую необходимо создать для получения желаемого напряжения в точке подключения  $\underline{U}_{\text{ж}}^{(\nu)}$ , можно определить как

$$\underline{E}_A^{(\nu)} = \underline{U}_{\text{ж}}^{(\nu)} + \underline{I}_A^{(\nu)} \underline{Z}_A^{(\nu)}. \quad (2)$$

Для высших гармоник, с учетом равенства желаемого напряжения нулю, выражение (2) преобразуется:

$$\underline{E}_A^{(\nu)} = \underline{I}_A^{(\nu)} \underline{Z}_A^{(\nu)}. \quad (3)$$

Для реализации алгоритма работы АКН по выражениям (2) и (3) необходимо измерение тока АКН. Целесообразно вместо этого измерять напряжение в точке подключения АКН, так как именно это напряжение является регулируемой величиной. Ток АКН в этом случае может быть определен по выражению (2) при подстановке вместо желаемого напряжения  $\underline{U}_{\text{ж}}^{(\nu)}$  действительного напряжения в точке подключения АКН  $\underline{U}_{\text{д}}^{(\nu)}$ :

$$\underline{I}_A^{(\nu)} = \frac{\underline{E}_A^{(\nu)} - \underline{U}_{\text{д}}^{(\nu)}}{\underline{Z}_A^{(\nu)}}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (2) можно выразить ЭДС АКН, которую необходимо создать в следующий момент времени  $\underline{E}_{A(t+1)}^{(\nu)}$  через действительное напряжение в точке подключения АКН к сети в данный момент времени  $\underline{E}_{A(t)}^{(\nu)}$  и ЭДС АКН в данный момент времени  $\underline{E}_{A(t)}^{(\nu)}$ :

$$\underline{E}_{A(t+1)}^{(\nu)} = \underline{E}_{A(t)}^{(\nu)} - \underline{U}_{\text{д}(t)}^{(\nu)} + \underline{U}_{\text{ж}}^{(\nu)}. \quad (5)$$

Для высших гармоник выражение (5) примет вид

$$\underline{E}_{A(t+1)}^{(\nu)} = \underline{E}_{A(t)}^{(\nu)} - \underline{U}_{\text{д}(t)}^{(\nu)}.$$

Временной интервал между моментами  $(t+1)$  и  $(t)$  соответствует времени существования неизменного напряжения на выводах ПН и зависит от частоты коммутации вентиля и тактовой частоты процессора, осуществляющего управление ПН.

В описанном алгоритме производится определение необходимого значения эквивалентной ЭДС  $\underline{E}_A^{(\nu)}$ , которая является фиктивной величиной. Реальной величиной, определяющей воздействие АКН на систему, является напряжение на выводах ПН  $\underline{E}_{\text{ПН}}^{(\nu)}$ . Для частного случая конфигурации полной схемы замещения АКН (рис. 3) а,  $\underline{E}_{\text{ПН}}^{(\nu)}$  с учетом (1) и (5) выражается как:

$$\underline{E}_{\text{ПН}(t+1)}^{(\nu)} = \underline{E}_{\text{ПН}(t)}^{(\nu)} + \frac{\underline{Z}_{\text{и}}^{(\nu)} + \underline{Z}_{\text{е}}^{(\nu)}}{\underline{Z}_{\text{е}}^{(\nu)}} (\underline{U}_{\text{ж}}^{(\nu)} - \underline{U}_{\text{д}(t)}^{(\nu)}). \quad (6)$$

Для высших гармоник

$$\underline{E}_{\text{ПН}(t+1)}^{(\nu)} = \underline{E}_{\text{ПН}(t)}^{(\nu)} + \frac{\underline{Z}_{\text{и}}^{(\nu)} + \underline{Z}_{\text{е}}^{(\nu)}}{\underline{Z}_{\text{е}}^{(\nu)}} \cdot \underline{U}_{\text{д}(t)}^{(\nu)}. \quad (7)$$

Исключение высших гармоник напряжения в точке подключения обеспечивается при поддержании на выводах ПН напряжения, определяемого как

$$e = \sum_{\nu} e_{\nu},$$

где  $e_{\nu}$  — мгновенные значения напряжения каждой гармоники, соответствующие комплексным величинам  $\underline{E}_{\text{ПН}(t+1)}^{(\nu)}$ , определяемым по (6) и (7).

Симметрирование и обеспечение желаемого модуля напряжения в точке подключения достигается при задании в (6) в качестве  $\underline{U}_{\text{ж}}^{(\nu)}$  для трех фаз симметричной системы напряжения необходимой величины. В результате симметрирования исходные напряжения в точке подключения АКН к сети изменяются как по модулю, так и по фазе. Поэтому возможно протекание в каждой фазе АКН активной и реактивной мощности. Так как в цепи АКН нет ни потребителей, ни источников активной мощности, суммарная активная мощность трех фаз должна быть равна потерям в элементах АКН. Выполнение этого условия обеспечивается регулятором, работающим по принципу стабилизации напряжения на конденсаторе и воздействующим на угол желаемого напряжения. Постоянство напряжения на конденсаторе говорит о том, что активная мощность не передается через ПН и является необходимым условием получения на выводах ПН напряжения, соответствующего сигналу.

Продемонстрируем эффективность АКН в решении задачи повышения КЭ в сети с множественными искажающими нагрузками на примере системы электроснабжения БАМ уровня 2015 г. Электроснабжение тяги западного участка БАМ от станции Лена до станции Таксимо производится по двухцепной связи 220 кВ с опорными подстанциями Киренга, Северобайкальск, Уоян и Таксимо. Длина связи от подстанции Коршуниха до подстанции Таксимо превышает 900 км. К 2015 г. в сети планируется установка нескольких СКРМ, однако в данной работе перспективные СКРМ не учитываются, так как их функции могут выполнять АКН.

Расчеты, выполненные при помощи программного комплекса Fazonord-Качество [4], предназначенного для расчета показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения в фазных координатах с учетом движения поездов, показывают, что установка двух АКН мощностью по 30 МВА на подстанциях Киренга и Уоян позволяет добиться соответствия КЭ требованиям ГОСТ на всех подстанциях. На рис. 4 и 5 приведены максимальные за межпоездной 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 %. Подстанции на диаграммах рис. 4 и 5 расположены в порядке их следования с запада на восток.

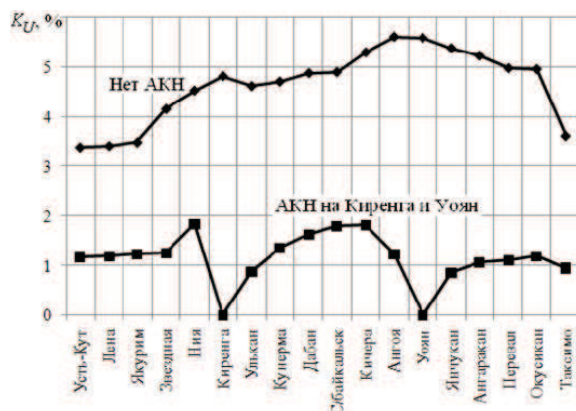


Рис. 4. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения

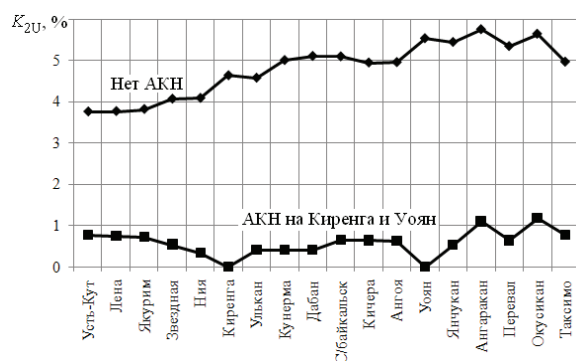


Рис. 5. Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анохин Б.А. Анализ уровней несимметрии и отклонений напряжения в протяженной сети при питании тяговой нагрузки // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. – № 1. – С. 404–407.
2. Долгов А.П., Кандаков С.А., Осадчев М.А. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог Восточной Сибири // Управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах: Тез. докл. Междунар. молодежной научно-техн. конф. – Новосибирск, 21–24 сентября 2011. – С. 70.
3. Мастерова О.А., Тюлькин М.В. Исследование эффективности реализации пилотного проекта по установке статического ти-

ристорного компенсатора на подстанции Ново-Анжерская 500 кВ // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 4. – С. 100–103.

В системе электроснабжения БАМ наблюдаются колебания напряжения, обусловленные движением мощных электровозов. Колебания напряжения снижают эффективность работы сети 220 кВ и осложняют регулирование напряжения в точках питания электроприемников. На рис. 6 показано влияние АКН на размах колебаний напряжения, то есть разность максимального и минимального значения напряжения за межпоездной интервал.

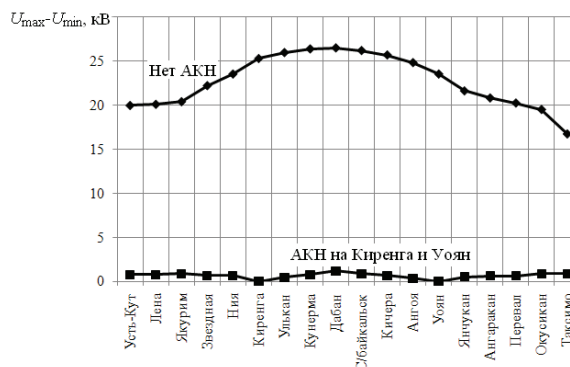


Рис. 6. Размах колебаний напряжения

Результаты проведенных исследований позволяют заключить, что АКН является эффективным средством повышения КЭ в сложных сетях с множественными искажающими нагрузками. Преимуществом АКН является возможность радикального повышения КЭ в большой сети при установке малого количества устройств.

ристорного компенсатора на подстанции Ново-Анжерская 500 кВ // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 4. – С. 100–103.

4. 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.

Поступила 22.01.2013 г.