

Компенсация реактивной мощности с фильтрацией токов высших гармоник – реальный путь повышения энергоэффективности передачи и распределения электроэнергии

Аксёнов В.В., ОАО «Усть-Каменогорский конденсаторный завод», Республика Казахстан,
Быстров Д.В., ОАО «Усть-Каменогорский конденсаторный завод», Республика Казахстан,
Воротицкий В.Э., ОАО «НТЦ электроэнергетики», г. Москва, д.т.н., профессор,
Трофимов Г.Г., Союз инженеров-энергетиков Республики Казахстан, д.т.н., профессор.

В соответствии со ст. 2 Федерального Закона РФ от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ [1], под энергетической эффективностью понимаются «характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенных в целях получения такого эффекта, применительного к продукции, технологическому процессу, юридическому лицу, индивидуальному предпринимателю».

Если речь идет о технологическом процессе передачи и распределения электроэнергии по электрическим сетям, то под полезным эффектом повышения энергетической эффективности этого процесса следует понимать не только снижение потерь электроэнергии в электрических сетях, но и повышение качества электроэнергии, пропускной способности электрической сети и надежности электроснабжения потребителей. Нельзя считать процесс передачи и распределения электрической энергии энергетически эффективным, если в результате этого процесса выполняется условие минимума относительных потерь энергии в сети, но не обеспечиваются нормативные или договорные требования по пропускной способности электрической сети, качеству и надежности электроснабжения.

Передовой отечественный и зарубежный опыт показывает, что по сравнению с другими мероприятиями, наибольшая энергетическая эффективность на рубль капиталовложений по её достижению обеспечивается за счет внедрения и использования средств компенсации реактивной мощности [2, 3].

К этим средствам в общем случае относятся:

- синхронные компенсаторы;
- синхронные двигатели, работающие в режиме перевозбуждения;
- батареи статических конденсаторов;
- статические тиристорные компенсаторы и др.

Чем ближе к потребляющим реактивную мощность электроприемникам устанавливаются компенсирующие устройства, тем выше их экономическая и энергетическая эффективность системы электроснабжения, тем меньше срок окупаемости затрат на установку компенсирующих устройств. С этой точки зрения, как известно, наиболее оптимальным решением является компенсация реактивной мощности у

потребителей, осуществляемая в основном регулируемые и нерегулируемые конденсаторными батареями в сочетании с фильтрами токов высших гармоник, если в электрических сетях наблюдается несинусоидальность напряжения. Именно об этих конденсаторных установках и особенностях их применения пойдет речь в данной статье.

Энергетическая эффективность использования конденсаторов в распределительных электрических сетях и системах электроснабжения достигается за счет:

- уменьшения токовых нагрузок элементов электрических сетей (воздушных и кабельных линий и трансформаторов);
- снижения потерь мощности и электроэнергии;
- повышения пропускной способности электрических сетей (линий и трансформаторов);
- разгрузки генераторов электрических станций;
- повышения качества электроэнергии вследствие:
 - уменьшения потерь напряжения в сетях и недопустимых отклонений напряжения в точках присоединения потребителей;
 - уменьшении токов высших гармоник (в случае применения фильтрокомпенсирующих устройств) и несимметричных токов в сетях 0,4кВ (в случае применения симметрирующих компенсирующих устройств) [3].

Компенсация реактивной мощности в системообразующих и межсистемных электрических сетях 220-750 кВ позволяет за счет оптимизации загрузки отдельных линий и подстанций нормализовать уровни напряжения в дефицитных по реактивной мощности районах, снять ограничения на отключение отдельных линий в связи с ликвидацией аварий и вывод их в ремонт или на реконструкцию.

Учитывая сравнительно высокую экономическую и энергетическую эффективность компенсации реактивной мощности, в промышленно развитых странах ей уделяют большое внимание. В частности, во Франции, Швеции, Германии мощность конденсаторных установок составляет 35% от активной пиковой мощности, в США и Японии – около 70%. В отдельных энергокомпаниях США мощность установленных компенсирующих устройств составляет 100% от мощности генераторов. При этом во многих странах наблюдается тенденция уменьшения выдачи генераторами электростанций реактивной мощности за счет увеличения доли реактивной мощности, вырабатываемой конденсаторами.

Что касается коэффициента реактивной мощности $\text{tg}\varphi$ в режиме максимальных нагрузок, то в США, Японии и большинстве европейских стран его оптимальное значение в зависимости от номинального напряжения сети поддерживается на уровне 0,2-0,4, что соответствует $\text{Cos}\varphi=0,98-0,92$. В последние годы во многих энергосистемах США распределительные электрические сети в режиме максимальных нагрузок работают с $\text{tg}\varphi=0$ [3].

В СССР в течение длительного времени (с 30-х годов прошлого века и до 2000г.) взаимоотношения энергоснабжающих организаций и потребителей электроэнергии в части реактивной мощности регулировались за счет применения шкалы скидок (надбавок) к тарифам на электроэнергию [4]. При этом в схемах развития энергосистем в соответствии с Методическими рекомендациями по проектированию развития энергосистем (СО153-34.20.118-2003) при отсутствии исходных данных по реактивной составляющей нагрузки $\text{tg}\varphi$ рекомендуется принимать не выше значений, представленных в табл. 1.

Таблица 1

| Номинальное напряжение шин понижающих подстанций, кВ | $\text{tg}\varphi$ | $\text{Cos}\varphi$ |
|--|--------------------|---------------------|
| 10 (6) | 0,4 | 0,93 |
| 35 | 0,49 | 0,90 |
| 110 | 0,54 | 0,88 |
| 220 | 0,59 | 0,86 |

В постперестроечный период, в соответствии с приказом Минэнерго РФ от 10.01.2000 г. № 2, действующие в области компенсации реактивной мощности документы были признаны утратившими силу. Взамен этим документам ничего не было предложено и, соответственно, внимание к этой важнейшей проблеме существенно упало. За тот же период по ряду объективных причин значительно выросли реактивные нагрузки при существенном отставании вводов генерирующих активных мощностей и электросетевого строительства. Появилось большое количество энергорайонов России, характеризующихся дефицитами реактивной мощности и, как следствие, работающих с пониженными уровнями напряжения в нормальных режимах. В этих районах все чаще стали возникать трудности с выводом оборудования в ремонт вследствие аварийных отключений. В частности, при выводе оборудования в ремонт было невозможно обеспечить допустимые уровни напряжения в сети 110 кВ без ввода графиков ограничения потребителей. При аварийных отключениях в сети 110 кВ происходило снижение напряжения на 20÷30% (до 85-90 кВ) на головных подстанциях с последующим автоматическим сбросом нагрузки.

На одном из селекторных совещаний ОАО РАО «ЕЭС России», по решению проблем и задач нормализации потоков реактивной мощности и уровней напряжения в распределительных электрических сетях, (протокол от 25.12.2006 г. № 330) отмечалось, что, например, в ОАО «Ростовэнерго» по состоянию на 2006 г. на 175 ПС 35-110 кВ из 563 значения $\text{tg}\varphi$ превышали значения 0,4 и на 97 ПС 35-110 кВ отсутствовал учет реактивной мощности и энергии на вводах силовых трансформаторов. В ОАО «Волгоградэнерго» среднее значение $\text{tg}\varphi$ за зимний режимный день 2005 г. составил 0,46, за летний режимный день 2006 г. – 0,44. При этом на 89% подстанций $\text{tg}\varphi > 0,4$ и на 35% $\text{tg}\varphi > 0,6$.

Из 27 районов Волгоградэнерго 17 районов были дефицитными по реактивной мощности. На сегодняшний день ситуация практически не изменилась.

Приведенные примеры свидетельствуют о необходимости значительных объемов работ по повышению уровня компенсации реактивной мощности в электрических сетях и у потребителей электроэнергии России. Недостаточное внимание к вопросам компенсации реактивной мощности привело к значительному росту потерь электроэнергии в электрических сетях.

Существенным импульсом к активизации работ по компенсации реактивной мощности послужила системная авария в ОАО «Мосэнерго» в мае 2005 г. Анализ причин этой аварии вскрыл ряд проблем как в контроле и обеспечении балансов реактивной мощности и регулировании напряжения в электрических сетях, так и в нормативной базе по компенсации реактивной мощности. С целью актуализации этой базы и активизации работ по повышению уровня компенсации реактивной мощности в электрических сетях, в 2006-2008 г.г. были разработаны, а в 2007 и 2010 гг. утверждены и введены в действие два важных нормативных документа [5, 6]. Руководитель разработки этих документов д.т.н. Железко Ю.С. в [4] изложил основные положения этих документов.

В соответствии с [5], установлены предельные значения коэффициента реактивной мощности. В часы нагрузок с 07 до 23 ч. Они приведены в табл. 2. А в часы малых нагрузок (с 23 до 07 ч) необходимо чтобы $\text{tg}\varphi=0$, а $\text{Cos}\varphi=1$. Для точек присоединения потребителя к электрической сети 220 кВ и выше, $\text{tg}\varphi$ определяется на основе расчетов режимов работы сети для нормальной и ремонтной схем.

Если сравнить таблицы 1 и 2, то можно сделать вывод о некотором ужесточении требований по компенсации реактивной мощности в [5] по сравнению с предыдущими нормативными документами существовавшими в бывшем СССР. Тем не менее, учитывая реальную ситуацию сегодняшнего дня в России, эти требования ниже, чем в промышленно развитых странах.

Таблица 2

Предельные значения коэффициента реактивной мощности (часы 07-23 наибольших нагрузок)

| Положение точки присоединения потребителя к электрической сети напряжением, кВ | $\text{tg}\varphi$ | $\text{Cos}\varphi$ |
|--|--------------------|---------------------|
| 110 (154) | 0,5 | 0,895 |
| 35 (60) | 0,4 | 0,928 |
| 6-20 | 0,4 | 0,928 |
| 0,4 | 0,35 | 0,944 |

Одной из важнейших задач сегодняшнего дня, является обеспечение установленных в [5] предельных значений коэффициента реактивной мощности. Решению этой задачи, безусловно, должно способствовать использование утвержденного в [6] механизма повышающих (понижающих) коэффициентов к тарифам на услуги по передаче

электрической энергии в зависимости от соотношения потребления активной и реактивной мощности, энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств). Несмотря на ряд правовых проблем практического применения этих документов, о которых в частности говорится в [7], по нашему мнению, в настоящее время создана достаточная методическая и нормативная основа для широкого внедрения компенсирующих устройств, как в электрических сетях, так и у потребителей. Компенсация реактивной мощности по-прежнему является одним из приоритетных мероприятий в разрабатываемых в настоящее время программах повышения энергетической эффективности процесса передачи и распределения электрической энергии.

Одновременно с методической базой создана также достаточно полная номенклатура компенсирующих устройств позволяющая повысить уровни компенсации реактивной мощности в отечественных электрических сетях до нормативных значений. Ниже рассмотрим эту номенклатуру и некоторые особенности применения конденсаторных батарей в современных условиях на примере опыта работы одного из известных конденсаторных заводов [8, 9] – АО «Усть-Каменогорский Конденсаторный Завод» (АО «УККЗ»).

Как показал опыт внедрения конденсаторных батарей этого завода на ряде предприятий, существенное, если не решающее, значение для надежной и эффективной работы этих батарей в условиях эксплуатации имеет качество электрической энергии в точках их подключения. В частности, это относится к наличию в электрических сетях высших гармонических составляющих тока и напряжения. Кроме отрицательного влияния высших гармоник на надежность и долговечность электрооборудования электрических сетей и потребителей, на точность учета и потери электроэнергии, при установке конденсаторных батарей в электрических сетях могут возникать резонансные явления между емкостным характером конденсаторных батарей и индуктивным сопротивлением питающей сети. Эти резонансы при определенных условиях могут усилить высшие гармоники и их влияние на оборудование и даже привести к выходу из строя конденсаторных батарей из-за перенапряжения на конденсаторах. В качестве иллюстрации, ниже приведены полученные специалистами АО «УККЗ» результаты проверки взаимного влияния параметров качества электроэнергии и режима работы конденсаторной установки, подключенной к первой секции шин ЩУ-1 напряжением 0,4 кВ компрессорной станции № 4 Тишинского рудника (Республика Казахстан).

Результаты измерений показателей качества электроэнергии с помощью прибора «Ресурс UF2», проведенных до подключения конденсаторной установки (КУ) к шинам компрессорной станции, показали существенное превышение допустимых значений по величине напряжения по отдельным гармоническим составляющим (рис. 1). Ситуация не улучшилась и после подключения КУ (рис. 2). Более того, отклонение напряжения от номинального на шинах превысило +12%. Коэффициент несинусоидальности напряжений также увеличился (рис. 3). Коэффициент несинусоидальности тока достиг 250% (рис. 4).

Рис.2 свидетельствует об увеличении амплитуды гармоник 3-й, 5-й, 8-й, 10-й. Перегрузка КУ по току составила 50%.

По графику потребляемой мощности (рис. 6) видно, что вследствие значительного изменения формы тока при отключённой КУ (рис.5), потребляемого подстанцией, после включения КУ генерация реактивной мощности КУ (120 квар) практически скомпенсирована дополнительным потреблением ее на высших гармониках. Вследствие этого, в показаниях счетчиков электроэнергии, учитывающих полную реактивную энергию, факт подключения КУ может быть практически не зафиксирован. При этом регулятор реактивной мощности КУ выполнил автоматический выбор и подключение ступеней конденсаторов из расчета первой гармоники напряжения и тока. У регулятора сработала защита от превышения коэффициента несинусоидальности.

Причиной значительной несинусоидальности напряжения и тока послужило одновременное сочетание нескольких факторов:

- наличие высших гармоник во внешней питающей сети;
- повышенное напряжение;
- наличие тиристорных возбудителей и отклонения в их работе. Наличие неканонических гармоник в спектре позволяет предположить несимметричную работу регуляторов по фазам.

По результатам измерений был сделан вывод о недопустимости эксплуатации конденсаторной установки в рассматриваемой точке её подключения без выполнения мероприятий по улучшению параметров качества электрической энергии, а именно, без установки фильтрокомпенсирующего устройства.

Анализ качества электроэнергии на крупных промышленных предприятиях, использующих управляемые вентильные преобразователи, как правило, подтверждают наличие недопустимых искажений формы кривой напряжения и, соответственно, реальную возможность возникновения резонансных явлений при подключении конденсаторных установок. Особенно велики эти искажения (которые могут передаваться в питающую сеть) в сетях прокатных станков металлургических заводов.

С целью повышения надежности работы конденсаторных установок, в точках их подключения с недопустимыми искажениями формы кривой напряжения, и с учетом всё более увеличивающегося количества и мощности искажающих нагрузок, конструкторским отделом завода разработаны и серийно выпускаются специальные фильтрокомпенсирующие устройства напряжением 6,3-10,5 кВ, мощностью от 150 до 450 кВА. Они представляют собой последовательные резонансные контуры «емкость-индуктивность», подключаемые к шинам 6-10 кВ, и позволяют кроме собственно компенсации реактивной мощности уменьшать искажения, вносимые нелинейными нагрузками.

АО «УККЗ», как в прочем и другие аналогичные заводы, уделяет большое внимание внедрению новой техники и материалов, позволяющих повысить долговечность и надежность выпускаемой продукции, с одновременным снижением её весогабаритных

параметров и стоимости. При этом, учитываются передовые достижения в конденсаторостроении, выполняется широкомасштабная программа технического перевооружения производственной инфраструктуры. В частности, запущен в работу комплекс из трех единиц высокоточного гидравлического оборудования с ЧПУ фирмы «Амада» (Япония) по раскрою заготовок, штамповке и гибки деталей, смонтирована и введена в работу поточно-механизированная линия окраски КУ порошковыми красками, внедрены современные высокопроизводительные станки-автоматы намотки секций. Приобретены современные сварочные полуавтоматы, проведена модернизация термовакуумного оборудования, внедрена технология индивидуальной заливки конденсаторов.

Все применяемые материалы выбираются из условия соответствия обеспечения качества мировым стандартам. Для этого используется:

- пленка полипропиленовая производства Франции, Финляндии;
- бумага конденсаторная производства фирм России;
- фольга алюминиевая производства фирм России, Швейцарии;
- изоляционная бумага, электрокартон производства Украины;
- проволока медная калиброванная для плавких предохранителей;
- проходные изоляторы на напряжение от 1 кВ до 20 кВ производства фирм Италии, Индии, России, Украины;
- припой производства России, Франции;
- экологически безопасная пропитывающая жидкость производства Японии.

Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения Uв без КУ

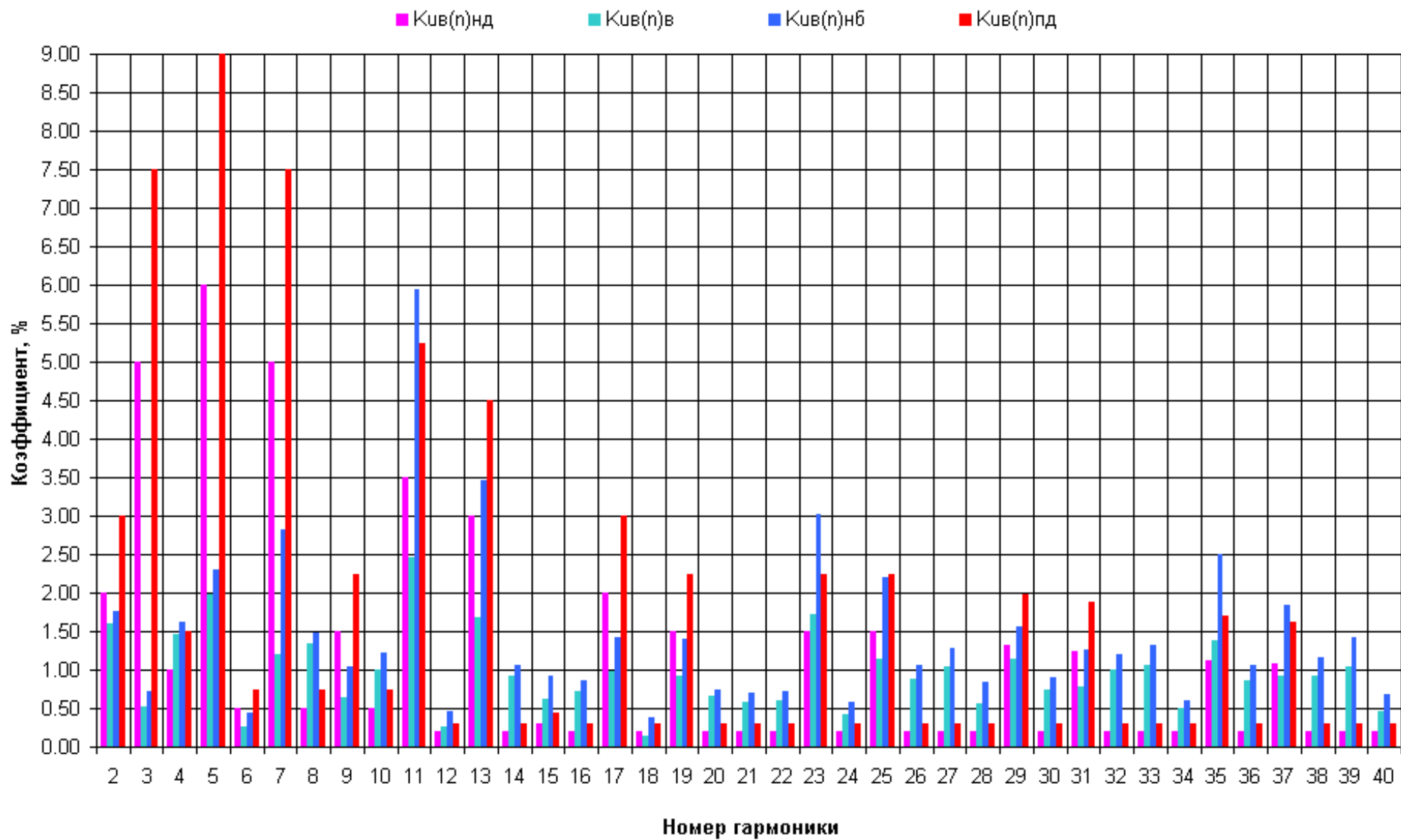


Рис. 1

Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения U_v при работе КУ

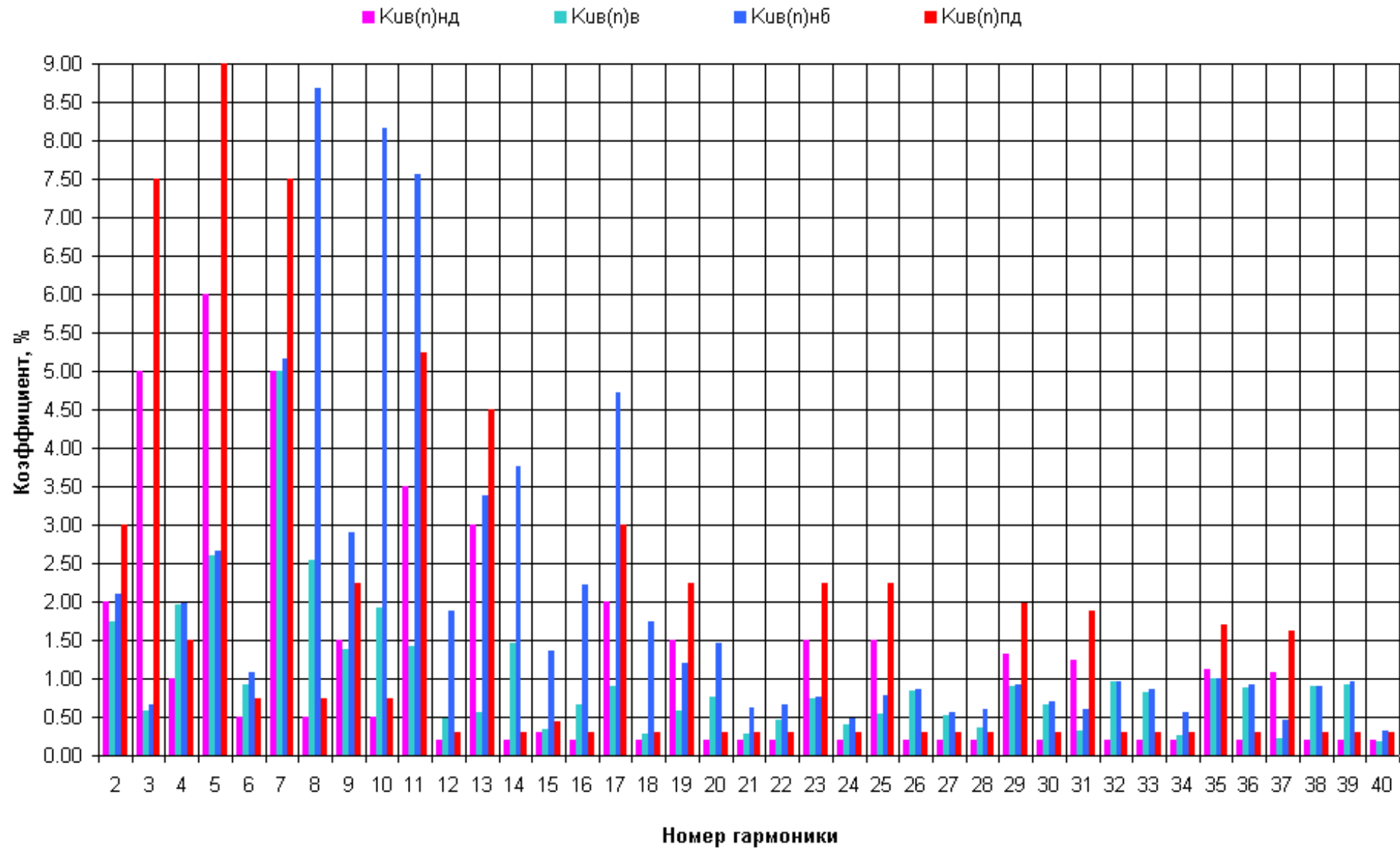


Рис. 2

Коэффициенты несинусоидальности фазных напряжений

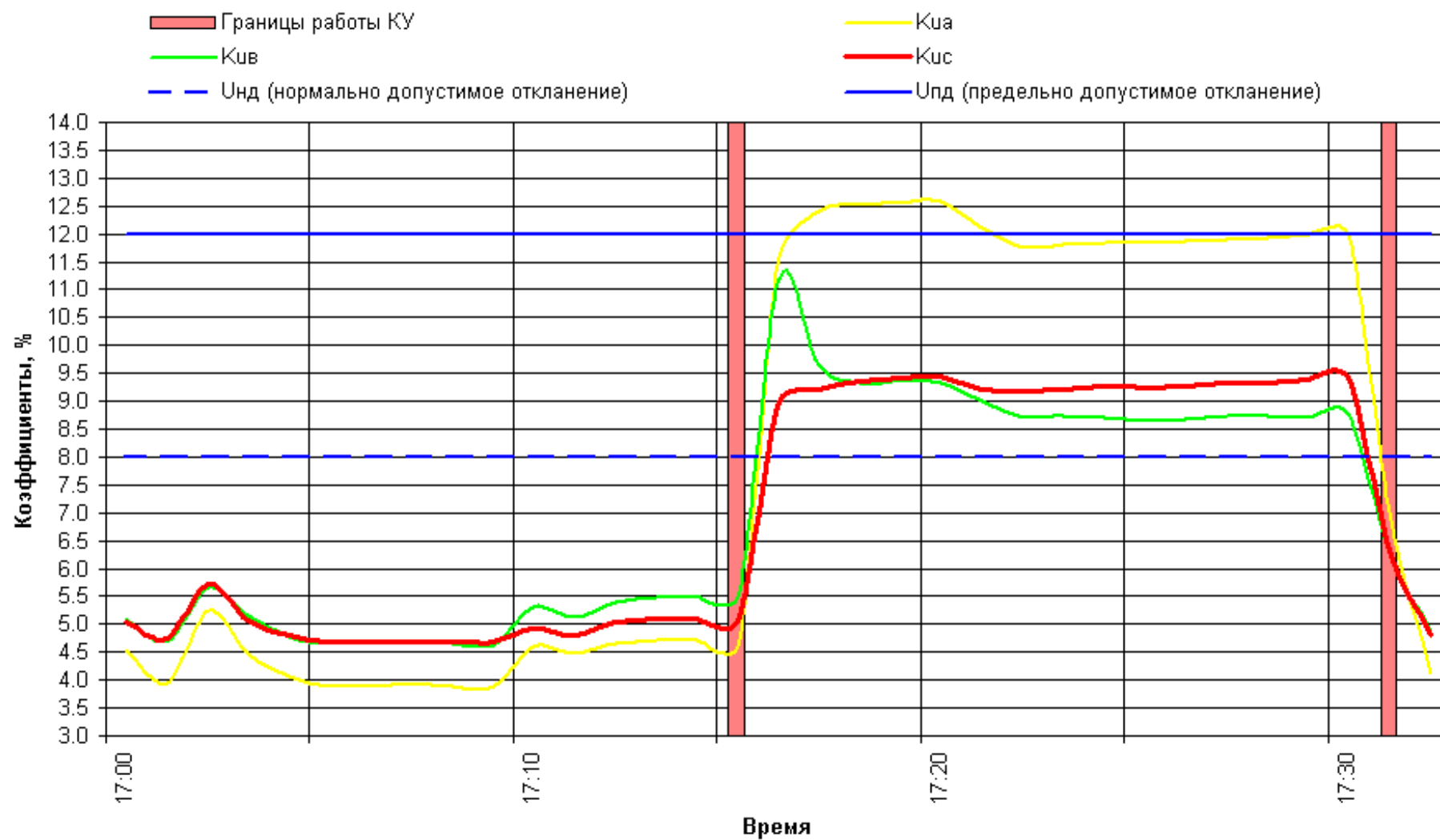


Рис. 3

Коэффициент несинусоидальности тока

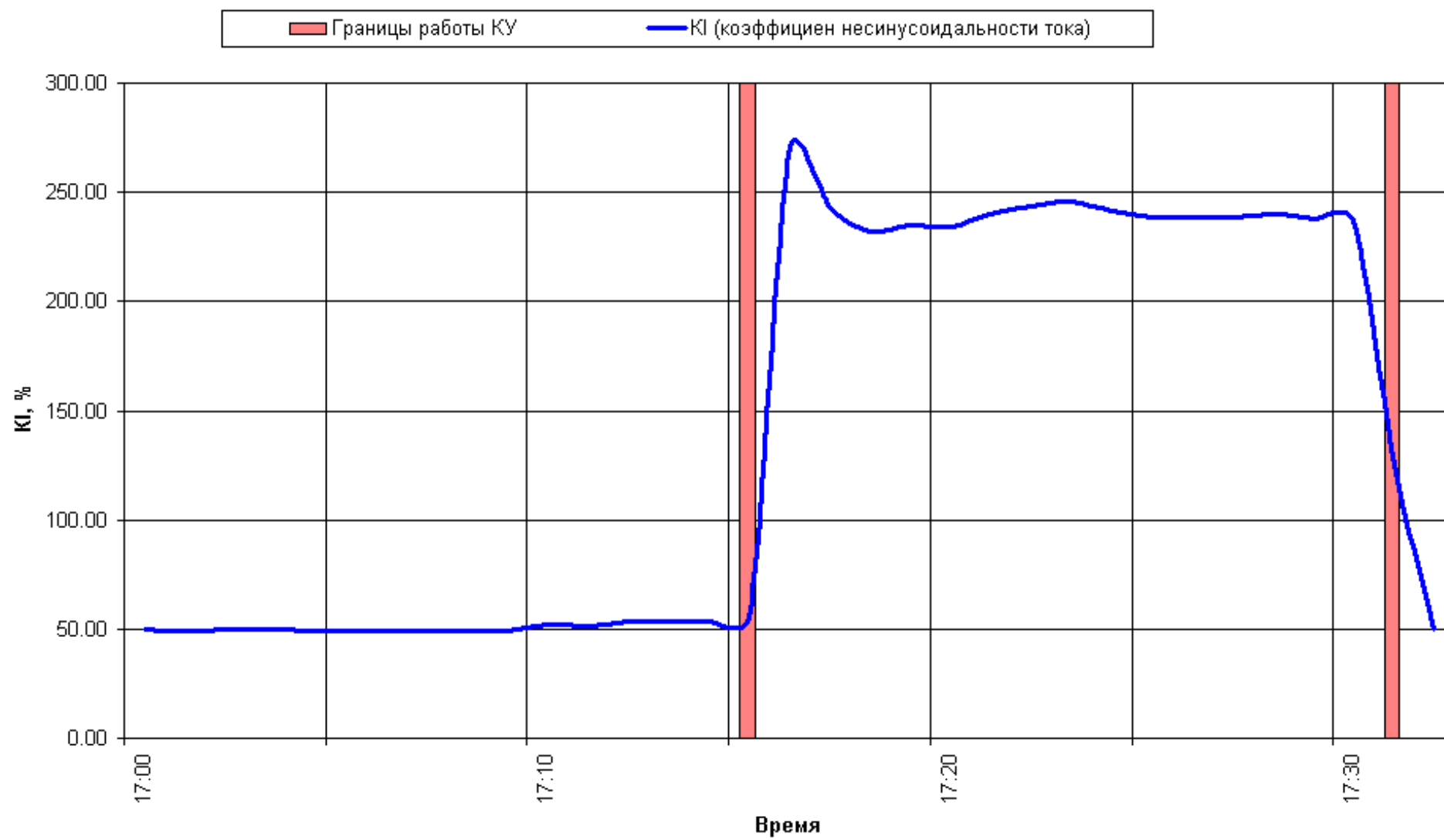


Рис. 4

Восстановленные по средниминутным значениям коэффициентов несинусоидальности
форма кривых тока и напряжения на 10.06.2009 г. 17:10 при отключенной КУ

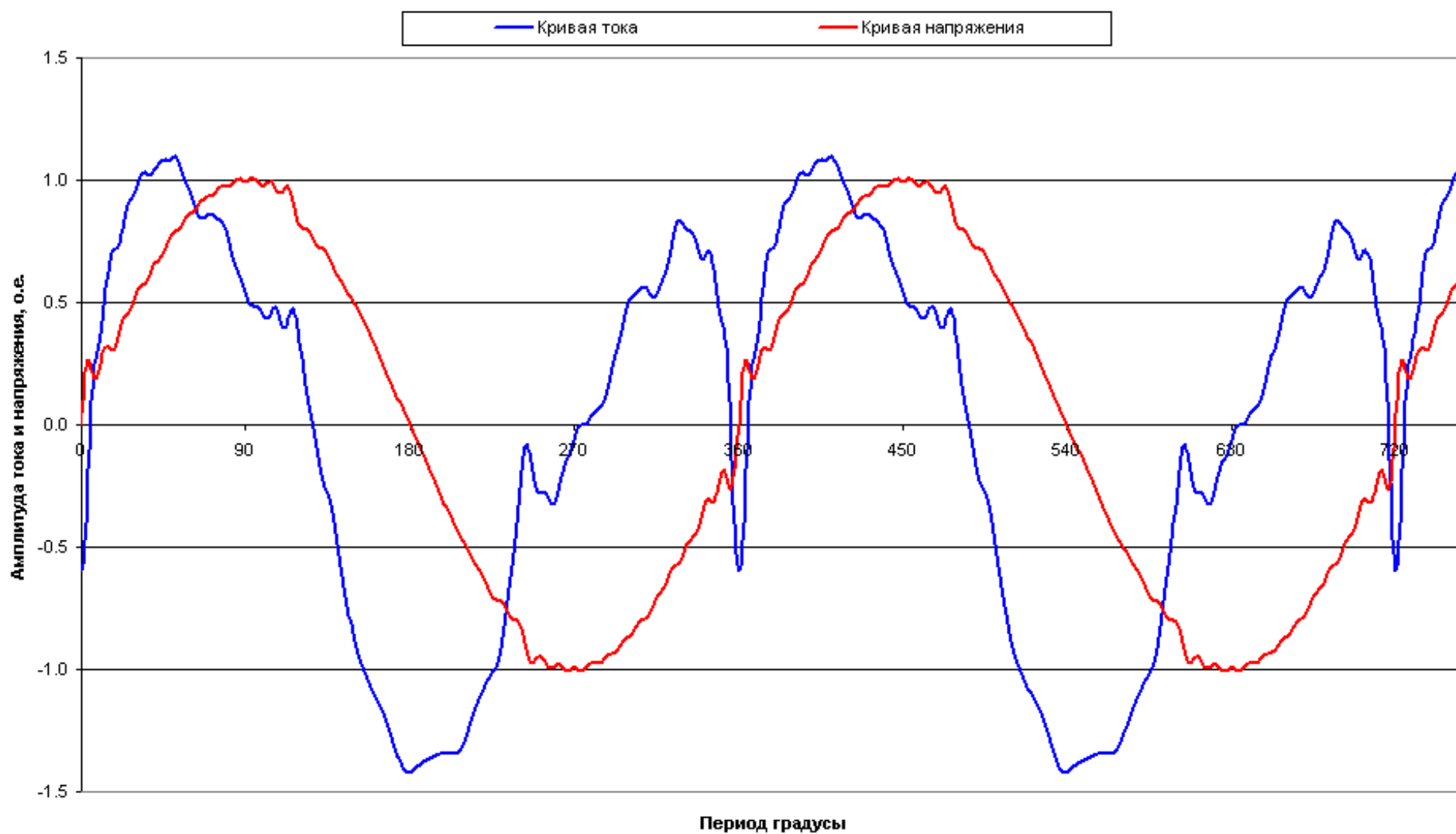


Рис. 5

Активная и реактивная трехфазные мощности

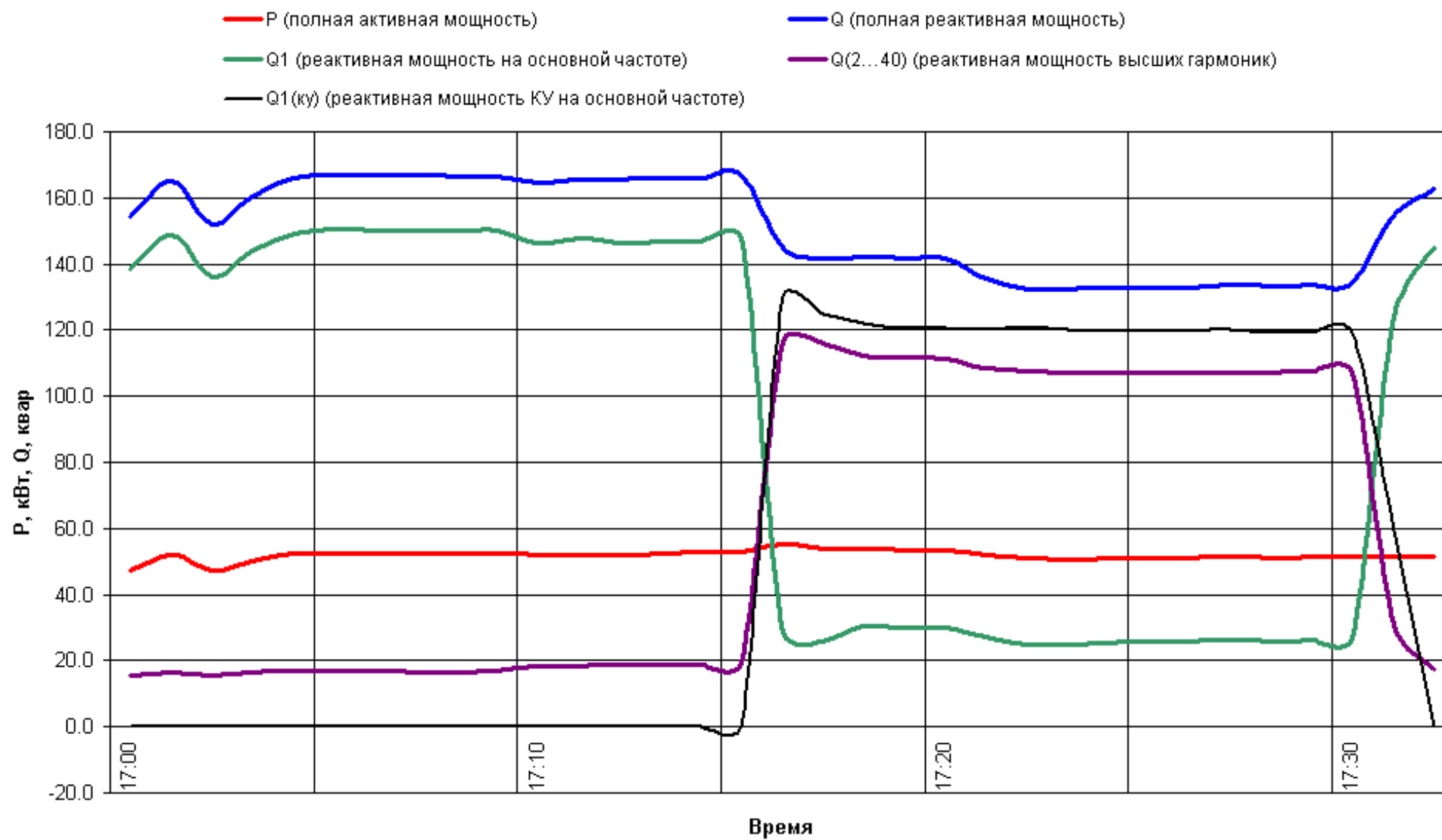


Рис. 6

Продукция АО «УККЗ» соответствует международным и российским государственным стандартам, техническим условиям и подтверждается аккредитацией в качестве поставщика для объектов атомной энергетики «РОЭНЕРГОАТОМ», экспертными заключениями ОАО «ФСК ЕЭС», сертифицирована экспертной организацией «КЕМА» (Нидерланды) на соответствие требованиям международного стандарта ИСО 9001-2000.

С учетом перечисленных инноваций с 2008г. завод производит батареи статических конденсаторов (БСК) на напряжение 6, 10, 35, 110, 220 кВ, мощностью от 5 до 200 Мвар на уровне лучших мировых аналогов. БСК разрабатываются на базе однофазных косинусных конденсаторов, путем их последовательно-параллельного соединения. Конденсаторы выполнены в корпусах из нержавеющей стали, имеют встроенные разрядные резисторы и предохранители (рис. 7).



Рис. 7

В батареях применяется защита Н-типа, которая представляет собой измерительный трансформатор тока, установленный в разрыв двух параллельных групп конденсаторов (в каждой фазе батареи). В батареях установлены реакторы, снижающие токи короткого замыкания в системе. Реакторы установлены в каждой фазе батареи.

Предусмотрено модульное размещение конденсаторных установок любого напряжения. Модуль представляет собой утепленный контейнер, что позволяет использовать конденсаторные установки в различных климатических условиях от минус 60 °С до плюс 50 °С (рис. 8).



Рис. 8

Внутреннее помещение модуля оборудовано освещением, штатными системами отопления и вентиляции, которые в автоматическом режиме поддерживают необходимый температурный режим. Модуль может оборудоваться системами охранной и пожарной сигнализации, автоматического пожаротушения.

Установки конденсаторные на напряжение 6-10 кВ размещаются по одной в модуле, а установки на напряжение 0,4 кВ. – до пяти в одном модуле, со шлейфовой разводкой кабелем по три установки (с двумя вводами в модуль).

Создаваемое в настоящее время единое экономическое пространство в рамках ЕВРАЗЭС (Россия, Белоруссия, Казахстан) может стать эффективной конструктивной основой для обмена опытом разработки и внедрения нормативно-правовой базы, расширения и дальнейшего совершенствования технической базы для повышения уровня компенсации реактивной мощности в электрических сетях стран-участниц.

Выводы

1. Компенсация реактивной мощности в электрических сетях и у потребителей является одним из наиболее приоритетных мероприятий по повышению энергетической эффективности процесса передачи и распределения электроэнергии, в том числе по снижению технологических потерь электроэнергии в электрических сетях, повышению их пропускной способности, повышению надежности и качества электроснабжения потребителей.
2. В настоящее время создана нормативно-правовая база по предельным значениям коэффициента мощности для точек присоединения потребителей к электрическим сетям, по повышающим (понижающим) коэффициентам к тарифам на услуги по передаче электрической энергии в зависимости от коэффициента реактивной мощности.

3. Имеется достаточная техническая база и широкая номенклатура разработанных компенсирующих устройств, для доведения уровней компенсации до экономически обоснованных значений.
4. Установке конденсаторных батарей в электрических сетях и у потребителей должен предшествовать анализ параметров качества электроэнергии в точках присоединения этих батарей к электрической сети, в особенности по коэффициенту n -ой гармонической составляющей для крупных промышленных предприятий, имеющих управляемые вентильные преобразователи и другие нелинейные нагрузки.
5. В случае превышения нормально допустимых и предельно допустимых значений гармонических составляющих и с целью недопущения выхода из строя конденсаторных батарей следует устанавливать специальные фильтрокомпенсирующие устройства.
6. Повышение надежности, экономичности, снижения веса, габаритов и стоимости компенсирующих устройств за счет применения новой техники и технологий – важная актуальная задача дальнейшего развития и активизации работ по компенсации реактивной мощности в электрических сетях и у потребителей, по повышению энергетической эффективности процесса передачи и распределения электрической энергии.
7. Единое экономическое пространство в рамках ЕВРАЗЭС создает благоприятную основу для расширения сотрудничества в области повышения энергетической эффективности электроэнергетики стран-участниц.

Литература

1. Федеральный закон РФ от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»
2. Паули В.К., Воротников Р.А. Компенсация реактивной мощности как эффективное средство рационального использования электроэнергии /Энергоэксперт (информационно-аналитический журнал), 2007, №2, с. 16-23
3. Овсейчук В.А., Трофимов Г.Г. Техничко-экономическая эффективность регулирования реактивной мощности и напряжения в распределительных электрических сетях. Учебно-методическое пособие – М.: ИПКГосслужбы, 2009. - 72с
4. Железко Ю.С. Новые нормативные документы, определяющие взаимоотношения сетевых организаций и покупателей электроэнергии в части условий потребления реактивной мощности – Электрика, 2008, №2
5. Порядок расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии,

- применяемых для определения обязательств сторон в договорах об организации услуг по передаче электрической энергии (договорах энергоснабжения). Утвержден приказом Минпромэнерго России от 22 февраля 2007 г. № 49, рег. № 9134 от 22.03.2007 г. Минюста России
6. Методические указания по расчету повышающих (понижающих) коэффициентов к тарифам на услуги по передаче электрической энергии в зависимости от соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон по договорам об оказании услуг по передаче электрической энергии по единой национальной (общероссийской) электрической сети (договорам энергоснабжения) (Утвержден приказом ФСТ России от 31 августа 2010 г. № 219-Э/6)
 7. Кузнецов А.В., Пестов С.М., Егорова Н.Ю. О применении повышающих коэффициентов к тарифу на услуги по передаче электроэнергии за потребление реактивной мощности – Промышленная энергетика, 2010, № 3
 8. Аксенов В.В. Энергосбережение – это наше направление! Конденсаторы – наша продукция! Качество – наше кредо! – Энергетика, Вестник Союза инженеров-энергетиков Республики Казахстан, май 2011, № 2(37) – с. 12-13
 9. Быстров Д.В. Компенсация реактивной мощности и фильтрация токов высших гармоник – реальный путь к энергоэффективности. Презентация доклада на международном производственно-техническом семинаре «Энергосбережение и новые технологии. Возобновляемые источники энергии» г. Алматы, 22-23.06.2011г.