

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 1 (2022)

Павлодар

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/WRIX7218>

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.

к.т.н., доцент

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD, доцент*

Ответственный секретарь

Приходько Е. В., *к.т.н., профессор*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*
Новожилов Т. А., *к.т.н., доцент (Россия)*
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*
Нефтисов А. В., *доктор PhD, доцент*
Шокубаева З. Ж. *технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/RLUI6028>

***В. Ф. Говорун¹, В. П. Марковский², Б. К. Шапкенов³,
П. В. Бурцев⁴, А. С. Аябаев⁵**

^{1,2,3,4,5}Торайгыров университет,

Республика Казахстан, г. Павлодар

КОРРЕКЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С МЕЛКИМИ НЕЛИНЕЙНЫМИ ПОТРЕБИТЕЛЯМИ

В работе, на основании имитационного моделирования, предлагается алгоритм исследования резонанса тока, возникающего в системе электроснабжения при хаотичном изменении мощности нагрузки и вариации степени компенсации реактивной мощности, при наличии потребителей, имеющих нелинейную вольтамперную характеристику. Показано, что перегрузка конденсаторных батарей может возникать в широком диапазоне частот, близких к резонансной частоте. Предлагаемый алгоритм определяет все возможные частоты, на которых может произойти увеличение токов в конденсаторных батареях выше допустимых величин при параллельном резонансе. В процессе работы предприятия нагрузка по технологическим причинам (включение/отключение) или аварийным отключениям может изменяться в очень широком диапазоне при условии неизменности количества подключенных конденсаторов из-за инерционности регулятора БСК. Поэтому при исследовании резонанса тока необходимо проводить расчеты всех возможных режимов работы сети.

Определение диапазона частот, на которых будет происходить перегрузка конденсаторов, необходим для выбора способов и средств подавления высших гармоник, подбора и настройки устройств, предназначенных для снижения амплитуд токов высших гармоник в сети.

Цель предлагаемой работы: показать, в каких режимах работы системы электроснабжения предприятия может возникать перегрузка конденсаторов токами высших гармоник при изменении

мощности нагрузки и вариации степени компенсации реактивной мощности.

Ключевые слова: коэффициент мощности; нелинейная нагрузка; высшие гармоники; резонанс токов; батарея статических конденсаторов.

Введение

Одной из наиболее актуальных проблем современного электроснабжения является повышение качества электроэнергии, так как существенно снижается расход электроэнергии, улучшается надежность систем электроснабжения и технологический процесс производства.

На ряде предприятий малой и средней мощности имеется большое количество мелких потребителей с нелинейной вольтамперной характеристикой, подключенных на разные ТП-6/0,4 кВ, что вызывает проблему обеспечения качества электроэнергии на шинах высокого напряжения.

Широкое внедрение силовых электронных преобразователей в производство породило проблему их негативного влияния на качество электроэнергии. Причиной этому явился нелинейный и импульсный характер процессов преобразования электроэнергии посредством ключевых элементов, дискретно управляющих потоками электрической энергии. В результате их работы происходит искажение токов в цепях переменного тока и кроме роста активной мощности, потребляемой из сети, также возрастает реактивная мощность, обусловленная фазовым сдвигом основных гармоник тока и напряжения, и мощность искажения.

Для тиристорных преобразователей порядок высших гармоник определяется по формуле:

$$n = mk \pm 1, \quad (1)$$

где m – число фаз выпрямления; k – натуральный ряд чисел.

При 6-фазной схеме выпрямления $n = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25$, и т.д., а при 12-фазной схеме $n = 11, 13, 23, 25, 35, 37$ и т.д.

Появление в системе электроснабжения высших гармоник тока и напряжения приводит к росту потерь мощности, перегреву оборудования, старению изоляции, сбою аппаратуры и т.п. Негативному влиянию высших гармоник, как на отдельные элементы электрооборудования, так и на всю систему электроснабжения посвящено достаточно большое количество публикаций [1–8].

Компенсация реактивной мощности в настоящее время является одним из приоритетных мероприятий в разрабатываемых программах по увеличению экономической эффективности при передаче и распределении электрической мощности.

Для достижения поставленных целей в соответствии с Законом Республики Казахстан об энергосбережении и повышении энергоэффективности потребители электрической энергии с присоединенной электрической нагрузкой 630 киловольт-ампер и выше обязаны поддерживать на своих шинах нормативные значения коэффициента мощности установкой компенсирующих конденсаторных устройств.

Нормативные значения коэффициента мощности в электрических сетях в Казахстане для индивидуальных предпринимателей и юридических лиц, определяются по классу напряжения в точке присоединения к электрической сети: 110 – 220 кВ > 0,89; 6 – 35 кВ > 0,92; 0,4 кВ > 0,93.

В настоящее время практически на всех предприятиях с нагрузкой выше 630 киловольт-ампер для обеспечения нормативного значения коэффициента мощности, как правило, устанавливаются ступенчато регулируемые конденсаторные установки.

Если в системе распределения энергии, включающей в себя индуктивности и ёмкости, применяются конденсаторы коррекции коэффициента мощности, всегда есть частота, на которой конденсаторы находятся в параллельном резонансе с сетью. Если это условие выполняется на частоте одной из гармоник, генерируемой нелинейным потребителем энергии, между сетью и конденсатором будут протекать большие токи на частоте этой гармоник, ограниченные только демпфирующим сопротивлением цепи. Они будут складываться с имеющимися искажениями, увеличивая их. Это приведёт к увеличению напряжения на конденсаторе и чрезмерному току через компоненты системы. Перегрузка конденсаторных батарей в странах СНГ регламентируется стандартами [9, 10], которые запрещают эксплуатацию конденсаторных батарей в том случае, когда токи, проходящие через конденсаторные батареи, превышают номинальные токи батареи в 1,3 раза. За рубежом, согласно стандарту [11], действующее значение суммарного тока, проходящего через конденсаторную установку, не должно превышать 135 % от её номинального тока

Определение возможности возникновения резонансных режимов в системах электроснабжения с источниками высших гармоник является актуальной задачей, как при выборе компенсирующих устройств, так и при обосновании необходимости установки фильтрокомпенсирующих блоков, поэтому в данной работе рассмотрен еще один из подходов к оценке и решению проблем, возникающих при резонансе токов.

В настоящей работе будет производиться математическое моделирование режима резонанса токов при изменении реактивной мощности нагрузки и емкостного сопротивления батареи конденсаторов.

В публикациях излагаются различные подходы к определению резонансной частоты системы. При расчете режима резонанса токов авторы работ [12, 13] учитывают полное сопротивление трансформатора, емкостные проводимости кабельных линий и емкостное сопротивление конденсаторных батарей, но не учитывают комплексное сопротивление нагрузки.

В работах [13–16] авторами учтены не все параметры электрической системы. При этом созданы алгоритмы, с помощью которых можно определить резонансные частоты системы электроснабжения при изменении степени компенсации реактивной мощности, но без учета хаотичности изменения мощности нагрузки.

В публикациях [15–16] рассматривается пакетное вейвлет-преобразование сигнала тока, которое позволяет выявить только области частот, на которых выполняется условие резонанса токов.

При расчете режима резонанса токов авторы [18] предлагают учитывать полную проводимость всех элементов резонансного контура. Под выражением $Z_{\text{sys}} = R_{\text{sys}} + jX_{\text{sys}}$ они понимают активные и индуктивные сопротивления элементов, входящих в систему электроснабжения. Изложенный подход получил свое развитие в предлагаемой работе.

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных исследованию резонанса токов, ни в одной из них [12–18] авторами не рассмотрена задача определения диапазона частот, на которых может произойти перегрузка конденсаторов токами высших гармоник при изменении мощности нагрузки и переключении ступеней конденсаторных батарей. К тому же в работе активное и реактивное сопротивления резонансного контура учитывают все активные, индуктивные и емкостные параметры цепей, к которым подключен блок конденсаторов. В работе предлагается алгоритм определения резонанса тока и диапазон частот, на которых может произойти перегрузка конденсаторных батарей. Проводится анализ перегрузки батарей конденсаторов при наличии большого количества мелких потребителей с нелинейной вольтамперной характеристикой, подключенных на разных ТП-6/0,4 кВ.

Материалы и методы

На одном из предприятий с большим количеством мелких потребителей с нелинейной вольтамперной характеристикой, подключенных на разных ТП-6/0,4 кВ были установлены на обеих шинах РУ- 6 кВ конденсаторные установки УКРМ56-6,3-2700 (1350+9x150) М4 УХЛ1 с автоматическими регуляторами реактивной мощности NOVAR 1206.

После непродолжительной работы установок вначале на одной, а затем и на второй установке произошло срабатывание и выход из строя предохранителей и патронов типа ПКТ. При этом батареи конденсаторов нагрелись так, что осыпалась с них краска.

В электрической сети без подключения конденсаторной установки были проведены исследования по наличию гармонических искажений кривой напряжения. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Гармонические искажения кривой напряжения

№ гармоники	Зафиксированное значение	Нормируемое по ГОСТ 13109-97
H3	1,0	3,0
H5	1,1	4,0
H7	5,3	3,0
H9	1,2	1,0
H11	4,1	2,0
H13	5,6	2,0
Сумма	7,0	5,0

Из таблицы следует, что в электрической сети 6 кВ предприятия имеет место превышения допустимого уровня гармонических искажений высших порядков, начиная с седьмой гармоники, что свидетельствует о наличии в этой сети нагрузок с нелинейной вольтамперной характеристикой. При этом в сетях 0,4 кВ гармонические искажения кривой напряжения ниже нормируемых ГОСТ 13109-97.

Регулятор коэффициента мощности автоматически включает и выключает ступени для получения необходимых значений реактивной мощности. QБСК = (450–1350) кВАр с шагом 150 кВАр.

Микропроцессорный регулятор, измеряя сигналы тока и напряжения, вычисляет мощность нагрузки емкостного характера, которая должна быть в данный момент времени подключена к сети для обеспечения заданного коэффициента мощности.

Для оценки влияния высших гармоник на работу конденсаторной установки УКРМ56-6,3-2700 специалистами ТОО «Усть-Каменогорский конденсаторный завод» совместно с представителями предприятия были произведены измерения показателей качества электроэнергии на ГПП-110/6 кВ при изменении ее мощности.

Целью проведения измерений было определение показателей качества электроэнергии в питающих линиях конденсаторных установок УКРМ56-6,3-2700 (1350+9х150) М4 УХЛ1, а также определение причин возникновения технологических нарушений их работы в процессе эксплуатации.

Измерения производились на двух секциях шин РУ-6 кВ анализатором качества электроэнергии РЕСУРС-UF2, Анализатор был подключен к ячейкам, питающих УКРМ. Таким образом, измерения отражают показатели качества электроэнергии в цепи питания установок УКРМ. В виду предыдущих технологических нарушений, возникших в процессе работы установок УКРМ, и во избежание нарушения отлаженной технологического процесса предприятия было принято решение о включении установок под напряжение на время 5-10 минут. На момент проведения измерений не все технологическое оборудование было введено в работу. Результат проведенных измерений отражен в Протоколах испытаний электрической энергии.

Включение анализатора на УКРМ-1 было осуществлено в 12:23. В момент включения уже была включена постоянная часть УКРМ-1 – 450 кВАр. В 12:25 в ручном режиме была подключена ступень компенсации № 1 – 150 кВАр. В 12:28 подключена ступень № 2 – 300 кВАр и отключена ступень № 1 – 150 кВАр.

Гармонические искажения тока установки УКРМ-1 представлены на рисунках 1–2 (гармоники ниже 5 не приведены из-за незначительной их величины). Гармонические искажения тока установки в фазе С приблизительно такие же, как в фазе В.

Регулятор реактивной мощности. NOVAR 1206, установленный в установках УКРМ подключается к токовым цепям на вводе в РУ-6 кВ, Значения искажений, зафиксированные на вводе СШ-6 кВ, в момент проведения замеров, отражаемые интерфейсом регулятора представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Искажения на вводе СШ - 6 кВ

№гарм.	Пост. часть=450 кВАр		Вкл.Ст.1-150кВАр		Вкл.Ст.2 - 300кВАр		NTHDUU
	THDI	THDU	THDI	THDU	THDI	THDU	
THD	4,5	6,5	7,5	1,0	8,5	1,5	7,0
H3	0,2	0,6	0,6	0,2	0,6	0,1	1,0
H5	3,9	4,4	4,5	0,7	4,6	0,8	1,1
H7	2,3	3,7	4,6	0,9	5,4	1,1	5,3
H9	0,2	0	0,2	0,1	0,2	0,1	1,2
H11	0,2	1,2	2,1	0,5	4,3	0,7	4,1
H13	0,3	1,5	0,2	0	0,9	0,2	5,6
H15	0,1	0,4	0	0,2	0	0,1	1,4
H17	0	0,2	0	0,2	0	0	0,6
Ш9	0	0,2	0,2	0	0	0	0,4
CHL		95		98		100	132

где THD – мгновенный уровень гармонических искажений, %;

THDI – мгновенный уровень гармонических искажений тока, %;

THDU – мгновенный уровень гармонических искажений напряжения, %;

CHL – мгновенное значение коэффициента гармонической нагрузки конденсаторов, %;

NTHDU – максимально зарегистрированный за период эксплуатации уровень гармонических искажений напряжения, %.

Из таблицы и рисунков следует, что при включении только постоянной части конденсаторов = 450 кВАр имеем перегрузку гармоническими составляющими тока на 7,7 %, т.е. $I_{\text{БСК}}/I_1 = 1,077$ по сравнению с током синусоидальной гармоники.

Наибольшие искажения в кривой тока установки УКРМ-1 происходят в результате воздействия гармоник тока 7-го и 11-го порядков. После включения ступени 150 кВАр в 12:25 происходит увеличение коэффициента несинусоидальности по току приблизительно с 6,5 % (7 гармоника) и 6 % (11 гармоника) в 12:24 до 8 % (7 гармоника) и 9 % (11 гармоника) в 12:26. После отключения ступени 150 кВАр и включения ступени 300 кВАр в 12:28 происходит увеличение коэффициента несинусоидальности по току приблизительно с 8 % (7 гармоника) и 9 % (11 гармоника) в 12:27 до 9 % (7 гармоника) и 14 % (11 гармоника) в 12:29-12:30.

Дальнейшие экспериментальные исследования по переключению ступеней не выполнялись.

При включении ступеней компенсации коэффициент искажения возрастает так же и на вводе в распределительное устройство, что свидетельствует о передаче искажений в сеть. На рисунках 1–2 показаны гармонические искажения тока установки на фазе А и В, по горизонтали отображены величины гармоник с 5 по 13.

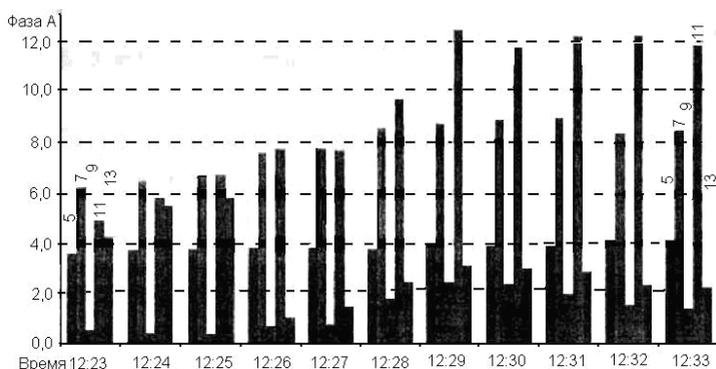


Рисунок 1 – Гармонические искажения тока установки на фазе А

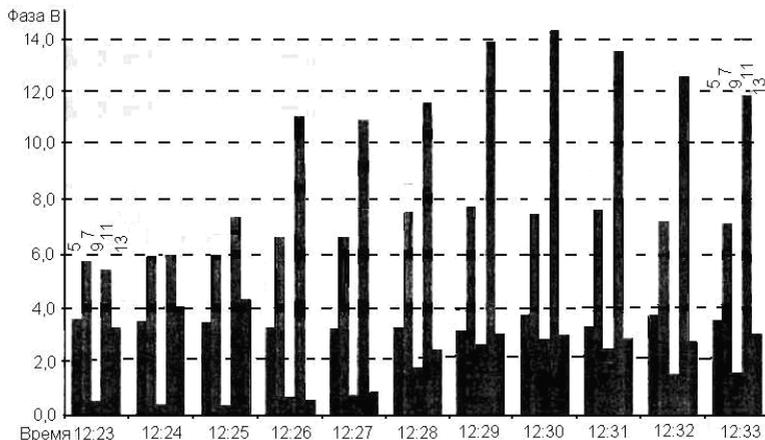


Рисунок 2 – Гармонические искажения тока установки на фазе В

Из выше сказанного следует, что включение дополнительных ступеней компенсации сопровождается увеличением коэффициента несинусоидальности по току, следовательно, увеличивается ток через конденсаторы.

Максимальные коэффициенты несинусоидальности по току за период измерений зафиксированы в 12–30 в фазе В.

Следовательно, использование токоограничивающих предохранителей для защиты от короткого замыкания и перегрузок конденсаторов затрудняется при наличии высших гармонических искажений в виду возможного повторного зажигания дуги в дугогасящей среде. Это вызвано тем, что вследствие поверхностного эффекта, вызванного высшими гармониками, происходит неравномерный нагрев по сечению плавкой вставки и, следовательно, к некорректному срабатыванию и выходу из строя патронов предохранителей.

В виду зависимости тока конденсаторов от гармонических частот напряжения, они являются наиболее уязвимыми силовыми элементами энергетической инфраструктуры современных предприятий.

Результаты и обсуждение

При наличии большого количества мелких потребителей с нелинейной вольтамперной характеристикой, подключенных на разных ТП-6/0,4 кВ суммарный гармонический спектр, полученный при измерениях на ГПП-110/6 кВ, характерен для работы выпрямительных установок и преобразователей частоты с шести и двенадцати импульсными выпрямительными схемами.

Рассмотрим подробнее причины возникновения указанных реакций системы электроснабжения на колебания высших гармоник и возможные пути их решения.

Потребление активной мощности на выработку 1 кВАр реактивной мощности составляет (0,003–0,0045) кВт, а потери активной мощности в элементах сети при протекании реактивной мощности незначительны, поэтому учет активных сопротивлений БСК и в суммарной индуктивности сети не целесообразен из-за их малости по сравнению с X_c и X_H .

К тому же в [14] показано, что при определении частоты резонанса, если не учитывается активное сопротивление в индуктивной цепи в резонансном контуре, погрешность составляет меньше 0,1 %. То есть при проведении практических расчетов можно не учитывать активное сопротивление RL.

Следует отметить, что активные сопротивления в резонансном контуре оказывают демфирующее действие на амплитуду колебательного процесса.

Известно, что при равенстве емкостного и индуктивного сопротивлений (проводимостей) возникает резонанс токов, при котором ток в индуктивности I_L и ток в емкости I_c равны друг другу. Физическая суть резонанса заключается в том, что в каждую четверть периода синусоиды происходит обмен энергией между магнитным полем, запасаемым в индуктивности нагрузки и электрическим полем блока конденсаторов, причем энергия полей равна друг другу.

При параллельном соединении участков g_H , L_H , $C_{БСК}$ (R_H , X_H , $X_{БСК}$) резонансная частота определяется:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{1}{L_H C_{БСК}}}, \quad (2)$$

Или же, согласно [19]:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_H C_{БСК}}}, \quad (3)$$

где $L_H = X_H / \omega_0$ – индуктивность системы электроснабжения на частоте основной гармоники сети; $C_{БСК}$ — емкость конденсаторной батареи (БСК);

$\omega_0 = 2\pi \cdot f_0$ $\omega_0 = 2\pi f_0$ – синхронная частота при частоте сети $f_0 = 50$ Гц;

$R_H = U_H^2 / P_H$ – активное сопротивление нагрузки на основной частоте;

$X_H = U_H^2 / Q_H$ – индуктивное сопротивление нагрузки на основной частоте;

$X_C = 1/\omega_0 C_{\text{БСК}}$ – емкостное сопротивление конденсаторной батареи;
 P_H, Q_H – активная и реактивная мощность нагрузки, поступающая на шины, где подключен блок конденсаторов;

U_H – номинальное напряжение на шинах, где подключена БСК.

Следует заметить, что такое представление R_H и X_H учитывает все активные, индуктивные и емкостные параметры присоединенных к шинам цепей.

На рисунке 3 приведена амплитудно-частотная характеристика $I_C(\omega)$, $I_L(\omega)$ для R, L, C параллельного контура, построенная при условии, что $I = \text{const}$, $R = \text{const}$, $L = \text{const}$, $C = \text{const}$ [19]. $U(\omega)$.

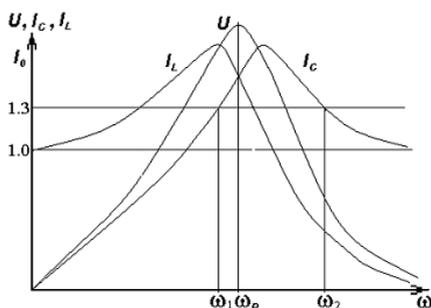


Рисунок 3 – Амплитудно-частотная характеристика $I_C(\omega)$, $I_L(\omega)$ для R, L, C параллельного контура

Частотные характеристики построены по следующим формулам:

$$U(\omega) = I_0 / \sqrt{g^2 + (1/\omega L - \omega C)^2}, \quad (4)$$

$$I_L(\omega) = U(\omega) / \omega L, \quad (5)$$

$$I_C(\omega) = U(\omega) \cdot \omega C. \quad (6)$$

Из рисунка 3 следует, что при приближении частоты колебаний к резонансной частоте амплитуды гармонических составляющих токов растут, а при прохождении ее падают. Очевидно, что полоса частот, при которых будет происходить перегрузка батарей конденсаторов, лежит в диапазоне $\omega_1 - \omega_2$.

Ток конденсаторной установки зависит от сопротивления включенных конденсаторов и рассчитывается по формуле:

$$I_{\Phi} = U_{\Phi} / X_C \quad (7)$$

где I_{Φ} – фазный ток конденсатора;

U_{Φ} – фазное напряжение конденсатора;

X_C – емкостное сопротивление конденсатора.

В свою очередь сопротивление конденсатора зависит от частоты питающего напряжения. Емкостное сопротивление конденсатора рассчитывается по формуле:

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot n \cdot C_{\text{БСК}}}, \quad (8)$$

где n – частота гармонического искажения напряжения сети.

Как видно из формулы сопротивление батареи конденсаторов (8) обратно пропорциональное частоте питающего напряжения, следовательно, с ростом порядка гармонических составляющих напряжения (увеличение частоты гармоники) сопротивление батареи конденсаторов уменьшается и следовательно возрастает ток через нее на частоте данной гармоники.

Полный ток конденсатора складывается из геометрической суммы всех гармонических составляющих тока и рассчитывается следующим образом:

$$I_{\text{БСК}} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n \geq 2} I_n^2}. \quad (9)$$

Перегрузку по току можно определить исходя из следующего уравнению:

$$\frac{I_{\text{БСК}}}{I_1} = \sqrt{1 + (u_3 \cdot 3)^2 + (u_5 \cdot 5)^2 + (u_7 \cdot 7)^2 + \dots + (u_{15} \cdot 15)^2 + (u_{17} \cdot 17)^2 + (u_{19} \cdot 19)^2 + \dots} \quad (10)$$

где I_1 – действующее значение тока основной (первой) гармоники;

I_n – действующее значение тока n -й гармоники;

u_i – мгновенный уровень гармонических искажений напряжения, %.

Следовательно, перегрузка конденсаторных батарей токами, превышающими номинальные токи батареи в 1,3 раза будет возникать в

широкой полосе частот, близких к резонансной. Это зависит также от пиковых амплитуд гармонических искажений и их фазовых сдвигов друг к другу, создаваемых разными источниками гармоник.

Использование в таких режимах работы сети конденсаторных установок невозможно, так как они будут работать со значительной токовой перегрузкой, которая за достаточно короткий промежуток времени приведет к дополнительному нагреву и разрушению конденсаторных батарей или выходу из строя предохранителей.

Следует отметить, что в процессе работы предприятия нагрузка по технологическим причинам (включение/отключение) или аварийным отключениям может измениться в очень широком диапазоне при условии неизменности количества подключенных конденсаторов из-за инерционности регулятора БСК. Поэтому при исследовании резонанса тока необходимо проводить расчеты всех возможных режимов работы сети.

Использовать предложенную выше методику для определения диапазона частот, при которых произойдет перегрузка блока конденсаторов при изменении мощности нагрузки и количества блоков конденсаторов не сложно. Требуется построить зависимости $U(\omega)$, $I_C(\omega)$, $I_L(\omega)$ для четырех режимов:

- минимальная нагрузка и минимальное число, подключенных конденсаторов;
- минимальная нагрузка и максимальное число, подключенных конденсаторов;
- максимальная нагрузка и минимальное число, подключенных конденсаторов;
- максимальная нагрузка и максимальное число, подключенных конденсаторов.

На основании построенных зависимостей можно провести полный анализ возможности возникновения резонанса тока и перегрузки конденсаторов при широком изменении мощности нагрузки и числа подключенных блоков конденсаторов.

Рассмотрим еще один подход к решению проблемы.

По известной минимальной и максимальной реактивной мощности нагрузки определяем значения индуктивных сопротивлений на основной гармонике:

$$X_{L1} = U_H^2 / Q_{H \min} , \quad (11)$$

$$X_{L2} = U_H^2 / Q_{H \max} . \quad (12)$$

Затем рассчитываем на этой же частоте индуктивность:

$$L_1 = X_{L1} / 2\pi \cdot f_0 \quad (13)$$

$$L_2 = X_{L2} / 2\pi \cdot f_0. \quad (14)$$

По найденным значениям L_1 и L_2 определяем X_{L1} и X_{L2} на других частотах по формуле:

$$X_{Li} = 2\pi \cdot f_0 \cdot n \cdot L_i, \quad (15)$$

где n – номер гармоники.

Строим зависимости $X_{L1}(\omega)$ и $X_{L2}(\omega)$ для максимальной и минимальной нагрузки.

Аналогично выполняем расчеты для минимального и максимального значения емкости БСК по формулам:

$$X_{C1} = U_H^2 / Q_{\text{БСКmin}}, \quad (16)$$

$$X_{C2} = U_H^2 / Q_{\text{БСКmax}}, \quad (17)$$

$$C_1 = X_{C1} / 2\pi \cdot f_0, \quad (18)$$

$$C_2 = X_{C2} / 2\pi \cdot f_0, \quad (19)$$

$$X_{Ci} = 2\pi \cdot f_0 \cdot n \cdot C_i. \quad (20)$$

Строим зависимости $X_{C1}(\omega)$ и $X_{C2}(\omega)$ для максимального и минимального значения емкости БСК.

По построенным зависимостям можно также провести полный анализ возможности возникновения резонанса тока при широком изменении мощности нагрузки и числа подключенных блоков конденсаторов. Частота резонанса определяется из условия:

$$X_{L2}(f) + X_{C2}(f) = 0. \quad (21)$$

Для снижения амплитуд высших гармоник, вызванных нелинейной нагрузкой применяются дополнительные устройства. Иногда достаточно подключить фильтр гармоник последовательно с конденсатором таким образом, чтобы цепь фильтр/конденсатор была индуктивной на критических частотах и емкостной на основной частоте. Для этого цепь из последовательно соединенных конденсатора и фильтра должна иметь собственную частоту ниже наименьшей критической гармоники. Значение частоты зависит от амплитуд и порядка имеющихся гармоник.

Выводы

В процессе работы предприятия нагрузка по технологическим причинам (включение/отключение) или аварийным отключениям может изменяться в очень широком диапазоне при условии неизменности количества подключенных конденсаторов из-за инерционности регулятора БСК. Поэтому при исследовании резонанса тока необходимо проводить расчеты всех возможных режимов работы сети.

Активные сопротивления в резонансном контуре оказывают только демфирующее действие на амплитуду колебательного процесса, и не влияет на резонансную частоту, так как резонанс наступает только при равенстве магнитной и электрической энергий.

Перегрузка конденсаторов может также происходить на частотах больше или меньше резонансной частоты и зависит от суммы амплитуд спектра частот, поступающих от источников гармоник.

На основании предложенных в работе алгоритмов можно определить диапазон частот, на которых будет выполняться условие резонанса токов, а также провести полный анализ возможности возникновения перегрузки конденсаторов при широком изменении мощности нагрузки и числа подключенных блоков конденсаторов.

Определение диапазона частот, на которых будет происходить перегрузка конденсаторов, необходим для выбора способов и средств подавления высших гармоник, подбора и настройки устройств, предназначенных для снижения амплитуд токов высших гармоник в сети.

При наличии большого количества мелких потребителей с нелинейной вольтамперной характеристикой, подключенных на разных ТП-6/0,4 кВ установка фильтров высших гармоник экономически нецелесообразна.

При коэффициенте мощности таких предприятий, равным 0,88-0,9 установка БСК не целесообразна. В электрической сети 6 кВ имеет место превышения допустимого уровня гармонических искажений, начиная с седьмой по 11 гармоники, что свидетельствует о наличии в этой сети суммарных искажений, поступающих из сетей 0,4 кВ. При этом гармонические искажения кривой напряжения в сетях 0,4 кВ ниже

нормируемых ГОСТ 13109-97. При прохождении через входной реактор и трансформатор искажения с седьмой по 11 гармонике снизятся на порядок, так как $X_{L\Xi} = 2\pi \cdot f_0 \cdot n \cdot (L_p + L_T)$ и на высокой стороне трансформатора, показатели качества напряжения придут в норму.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Руководство по компенсации реактивной мощности с учетом влияния гармоник. Выпуск 21. Техническая коллекция Schneider Electric. – 2008. – 26 с.

2 Гармонические искажения в электрических сетях и их снижение. Выпуск 22. Техническая коллекция Schneider Electric. – 2008. – 28 с.

3 **Жежеленко, И. В.** Высшие гармоники в сетях электроснабжения промышленных предприятий. 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.

4 IEEE recommended practice for monitoring electric power quality. IEEE Std. 1159 – 1995.

5 **Куско, А., Томпсон, М.** Качество энергии в электрических сетях / пер. с англ. – М. : Додэка-XXI, 2008.

6 **Stratford, R.** Analysis and control of harmonic current in systems with static power converters // IEEE trans. On industry applications. – 1981. – Vol. IA-17. – № 1. – P. 71–81.

7 **Akagi, H.** Active harmonic filters // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93. – № 12. – P. 2128–2140.

8 **Говорун, В. Ф., Говорун, О. В., Марковский, В. П. и др.** Энергоэффективность передачи и потребления реактивной мощности в электрических сетях. // Вестник ПГУ. Серия энергетическая, 2020. – № 2. – С.16–25.

9 Конденсаторные установки компенсации реактивной мощности. [Электронный ресурс]. – <http://www.kondensator.su/kondensatornye-ustanovki/krm-reactive-power-compensation.html> (Дата обращения 10.11.2020).

10 Установки компенсации реактивной мощности. [Электронный ресурс]. – <https://profsector.com/publication/1/ustanovki-kompensatsii-reaktivnoy-moshhnosti> (Дата обращения 10.11.2020).

11 IEEE Standard for Shunt Power Capacitors // IEEE Std. – 18-2012, 2013. – 69 p.

12 **Николаев, А. А., Корнилов, Г. П., Храмшин, Т. Р. и др.** Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2016. – Т. 14. – № 4. – С. 96–105.

13 **Петухов, В.** Резонансные явления в электроустановках зданий как фактор снижения качества электроэнергии // Новости электротехники. – 2003. – № 6 (24). [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/24/20.php> (Дата обращения 05.11.2020).

14 **Коваленко, Д. В.** Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 8 (часть 1) – С. 16–21.

15 **Osipov, D. S., Kovalenko, D. V., Dolgikh, N. N.** Calculation of currents resonance at higher harmonics in power supply systems based on wavelet packet transform // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – 2017. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239492.

16 **Файфер, Л. А., Осипов, Д. С., Еремин, Е. Н., Долгих, Н. Н.** Применение пакетного вейвлет-преобразования для определения составляющих мощности при несинусоидальных режимах // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 8 (115). – С. 136–145.

17 **Сиромеха, С. С., Осипов, Д. С., Черемисин, В. Т.** О необходимости учёта режима работы и импеданса системы электроснабжения при моделировании резонанса токов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15252> (Дата обращения 15.11.2020).

18 **Rahimi, S., Wiechowski, W., Rundrup, M. [at al.]**. Identification of problems when using long high voltage AC cable in transmission system II: Resonance & Harmonic resonance // Transmission and Distribution Conference and Exposition. T&D. IEEE/PES. 2008. – P. 1–8. – DOI: 10.1109/TDC.2008.4517187.

19 **Нейман, А. Р., Димирчян, К. С.** Теоретические основы электротехники. Том первый. – Ленинград : Энергоиздат. Ленинградское отделение, 1981. – 535 с.

REFERENCES

1 Rukovodstvo po kompensatsii reaktivnoy moshchnosti s uchetom vliyaniya garmonik [Guidelines for reactive power compensation taking into account the influence of harmonics]. Issue 21. Schneider Electric Technical Collection. – 2008. – 26 p.

2 Garmonicheskiye iskazheniya v elektricheskikh setyakh i ikh snizheniye [Harmonic distortion in electrical networks and their reduction]. Issue 22. Schneider Electric technical collection. – 2008. – 28 p.

3 **Zhezhenko, I. V.** Vysshkiye garmoniki v setyakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Higher harmonics in power supply networks

of industrial enterprises]. 4th ed., Rev. and add. – Moscow : Energoatomizdat, 2000. – 331 p.

4 IEEE recommended practice for monitoring electric power quality // IEEE Std. 1159 – 1995.

5 **Cuzco, A., Thompson, M.** Kachestvo energii v elektricheskikh setyakh : perevod s angliyskogo [Energy quality in electrical networks : trans. from English]. – Moscow : Dodeka-XXI, 2008.

6 **Stratford, R.** Analysis and control of harmonic current in systems with static power converters // IEEE trans. On industry applications. – 1981. – Vol. IA-17. – No. 1. – P. 71–81.

7 **Akagi, H.** Active harmonic filters. – Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93. – No. 12. – P. 2128–2140.

8 **Govorun, V. F., Govorun, O. V., Markovsky, V. P. et al.** Energoeffektivnost' peredachi i potrebleniya reaktivnoy moshchnosti v elektricheskikh setyakh [Energy efficiency of transfer and consumption of reactive power in electrical networks]. // Bulletin of PSU. Energy series, 2020. – № 2. – P.16–25.

9 Kondensatornyye ustanovki kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Capacitor units for reactive power compensation]. <http://www.kondensator.su/kondensatornye-ustanovki/krm-reactive-power-compensation.html> (Date accessed 10.11.2020). [Electronic resource].

10 Ustanovki kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Installations of reactive power compensation]. [Electronic resource]. – <https://profsector.com/publication/1/ustanovki-kompensatsii-reaktivnoy-moshchnosti>. (Date of access 10.11.2020).

11 IEEE Standard for Shunt Power Capacitors. IEEE Std. 18- 2012, 2013. 69 p.

12 **Nikolaev, A. A., Kornilov, G. P., Khramshin, T. R. [and others].** Eksperimental'nyye issledovaniya elektromagnitnoy sovmestimosti sovremennykh elektroprivodov v sisteme elektrosnabzheniya metallurgicheskogo predpriyatiya [Experimental studies of electromagnetic compatibility of modern electric drives in the power supply system of a metallurgical enterprise] // Vestnik MGTU im. G. I. Nosov. – 2016. – Vol. 14. – No. 4. – P. 96–105.

13 **Petukhov, V.** Rezonansnyye yavleniya v elektroustanovkakh zdaniy kak faktor snizheniya kachestva elektroenergii [Resonance phenomena in electrical installations of buildings as a factor in reducing the quality of electricity] // News of electrical engineering. – 2003. – No. 6 (24). [Electronic resource]. – URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/24/20.php> (date accessed 05.11.2020)

14 **Kovalenko, D. V.** Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy [International Journal of Applied and Fundamental Research]. – 2017. – No. 8 (part 1) – P. 16–21.

15 **Osipov, D. S., Kovalenko, D. V., Dolgikh, N. N.** [Calculation of currents resonance at higher harmonics in power supply systems based on wavelet packet transform] // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – 2017. – P. 1–6. – DOI: 10.1109 / Dynamics.2017. – 8239492.

16 **Fifer, L. A., Osipov, D. S., Eremin, E. N., Dolgikh, N. N.** Primeneniye paketnogo veyvlet-preobrazovaniya dlya opredeleniya sostavlyayushchikh moshchnosti pri nesinusoidal'nykh rezhimakh [Application of packet wavelet transform to determine power components in non-sinusoidal modes] // Bulletin of Irkutsk State Technical University. – 2016. – No. 8 (115). – P. 136–145.

17 **Siromakha, S. S., Osipov, D. S., Cheremisin, V. T.** O neobkhodimosti uchota rezhima raboty i impedansa sistemy elektrosnabzheniya pri modelirovani rezonansa tokov // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [On the need to take into account the operating mode and impedance of the power supply system when modeling the resonance of currents // Modern problems of science and education]. – 2014. – No. 5. [Electronic resource]. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15252> (Date accessed 15.11.2020)

18 **Rahimi, S., Wiechowski, W., Rundrup, M. [at al.]**. Identification of problems when using long high voltage AC cable in transmission system II: Resonance & Harmonic resonance // Transmission and Distribution Conference and Exposition. T&D. IEEE / PES. – 2008. – P. 1–8. – DOI: 10.1109 / TDC.2008.4517187.

19 **Neiman, A. R., Dimirchyan, K. S.** Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Vol. 1. – Leningrad. Energoizdat. Leningrad branch, 1981. – 535 p.

Материал поступил в редакцию 28.02.22.

**В. Ф. Говорун¹, В. П. Марковский², Б. К. Шапкенов³, П. В. Бурцев⁴, А. С. Аябаев⁵*

^{1,2,3,4,5}Торайғыров университеті,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

Материал 28.02.22 баспаға түсті.

ШАҒЫН СЫЗЫҚТЫ ЕМЕС ТҰТЫНУШЫЛАР БАР ЭЛЕКТР БЕРУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕГІ ҚУАТ ФАКТОРЫН ТҮЗЕТУ

Бұл жұмыста имитациялық модельдеу негізінде жүктеме қуатының ретсіз өзгеруімен және реактивті қуаттың өтелу дәрежесінің өзгеруімен электрмен жабдықтау жүйесінде пайда болатын ток резонансын зерттеу алгоритмі ұсынылған. сызықты

емес вольт-амперлік сипаттамасы бар тұтынушылардың болуы. Конденсаторлар банктерінің шамадан тыс жүктелуі резонанстық жиілікке жақын кең жиілік диапазонында болуы мүмкін екендігі көрсетілген. Ұсынылған алгоритм конденсаторлар банктеріндегі токтардың ұлғаюы параллель резонанс жағдайында рұқсат етілген мәндерден жоғары болуы мүмкін барлық ықтимал жиіліктерді анықтайды.

Ұсынылған жұмыстың мақсаты: кәсіпорынның электрмен жабдықтау жүйесінің қандай жұмыс режимдерінде жүктеме қуаты өзгергенде және реактивті қуаттың өтелу дәрежесі өзгергенде жоғары гармоника токтарымен конденсаторлардың шамадан тыс жүктелуі орын алуы мүмкін екенін көрсету.

Кілтті сөздер: қуат факторы; сызықты емес жүктеме; жоғары гармоникалар; токтардың резонансы; статикалық конденсаторлар батареясы.

**V. F. Govorun¹, V. P. Markovsky², B. K. Shapkenov³, P. V. Burtsev⁴, A. S. Ayabayev⁵*

*^{1,2,3,4,5}Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Material received jn 28.02.22.*

POWER FACTOR CORRECTION IN POWER SUPPLY SYSTEMS WITH SMALL NON-LINEAR CONSUMERS

In this work, on the basis of simulation modeling, an algorithm for studying the resonance of the current that occurs in the power supply system with a chaotic change in the load power and variation in the degree of compensation of reactive power, in the presence of consumers with a nonlinear current-voltage characteristic is proposed. It is shown that overloading of capacitor banks can occur in a wide frequency range, close to the resonant frequency. The proposed algorithm determines all possible frequencies at which an increase of currents in capacitor banks can occur above the permissible values in parallel resonance.

The purpose of the proposed work: to show operating modes of the power supply system when an overload of capacitors by currents of higher harmonics can occur on the load power changes and vary of the degree of reactive power compensation.

Keywords: power factor; non-linear load; higher harmonics; resonance of currents; battery of static capacitors.

Теруге 28.02.2022 ж. жіберілді. Басуға 18.03.2022 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

3,77 Мб RAM

Шартты баспа табағы 13,12. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: З. С. Исакова

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3883

Сдано в набор 28.02.2022 г. Подписано в печать 18.03.2022 г.

Электронное издание

3,77 Мб RAM

Усл. печ. л. 13,12. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: З. С. Исакова

Корректор: А. Р. Омарова

Заказ № 3883

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

«Торайғыров университет»

коммерциялық емес акционерлік қоғамы

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

«Торайғыров университет»

коммерциялық емес акционерлік қоғамы

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

8 (7182) 67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz