

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-37-51>

УДК 621.316

Электромагнитная совместимость компенсирующих устройств и преобразователей регулируемого электропривода в электрических сетях промышленных предприятий

В. П. Счастный¹⁾, А. И. Жуковский²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾ЧУП «КРМ Инжиниринг» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Проблемы компенсации реактивной мощности и повышения качества электрической энергии в системах электроснабжения промышленных предприятий нераздельно связаны. Их актуальность обусловлена широким применением электроприемников, потребляющих реактивную мощность и искажающих качество электрической энергии в сети, а также внедрением в производство новых технологий, систем и оборудования, предъявляющих повышенные требования к качеству электрической энергии. Важной характеристикой качества электрической энергии, нормируемого ГОСТ 32144–2013, является несинусоидальность напряжения. Основная причина несинусоидальности напряжения в электрических сетях промышленных предприятий – применение электрооборудования с нелинейной вольт-амперной характеристикой, являющегося источником кондуктивных электромагнитных помех, в частности: регулируемых электроприводов постоянного и переменного тока, источников бесперебойного питания электроприемников, электросварочного оборудования, дуговых электрических печей, установок индукционного нагрева, газоразрядных источников излучения. Вследствие нелинейности вольт-амперных характеристик указанные выше устройства потребляют из сети несинусоидальный ток, что вызывает гармонические искажения питающего напряжения, включающего основную гармоническую составляющую и высшие гармонические составляющие, кратные основной частоте. Несинусоидальность напряжения, в свою очередь, вызывает дополнительные потери мощности и энергии в элементах электрической сети, приводит к перегреву и ускоренному старению изоляции электрооборудования, снижая его эксплуатационную надежность и уменьшая срок службы, ухудшает точность электрических измерений, вызывает нарушения в работе систем автоматики, телемеханики, релейной защиты, электронных систем и коммуникаций. Кроме того, она существенно усложняет компенсацию реактивной мощности в электрической сети. Компенсирующие устройства выполняются на базе конденсаторов, электрические параметры которых (сопротивление, мощность, ток) зависят как от величины питающего напряжения, так и от его гармонического состава. В настоящей статье обозначены проблемы и предложены решения в части компенсации реактивной мощности и повышения качества

Адрес для переписки

Счастный Валерий Петрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-52
val.sc@mail.ru

Address for correspondence

Schasny Valery P.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-52
val.sc@mail.ru

электрической энергии в электрических сетях, содержащих тиристорные преобразователи напряжения и преобразователи частоты, применяемые в установках регулируемого электропривода промышленных предприятий.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, качество электрической энергии, кондуктивная электромагнитная помеха, преобразователь напряжения, преобразователь частоты, фильтрокомпенсирующее устройство

Для цитирования: Счастный, В. П. Электромагнитная совместимость компенсирующих устройств и преобразователей регулируемого электропривода в электрических сетях промышленных предприятий / В. П. Счастный, А. И. Жуковский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 1. С. 37–51. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-37-51>

Electromagnetic Compatibility of Compensating Devices and Converters of an Adjustable Electric Drive in Electrical Networks of Industrial Enterprises

V. P. Schasny¹⁾, A. I. Zhukouski²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾PUE “KRM Engineering” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The problems of reactive power compensation and improving the quality of electrical energy in the power supply systems of industrial enterprises are inseparable. Their relevance is due to the widespread use of electric receivers that consume reactive power and distort the quality of electrical energy in the network, as well as the implementation of new technologies, systems and equipment into production that make increased demands on the quality of electrical energy consumed. An important characteristic of the quality of electrical energy rationed by GOST 32144–2013 is the non-sinusoidal voltage. The main reason for the non-sinusoidal voltage in the electrical networks of industrial enterprises is the use of electrical equipment with a nonlinear voltage characteristic, which is a source of conductive electromagnetic interference, in particular: adjustable DC and AC electric drives, uninterruptible power supplies of electric receivers, electric welding equipment, electric arc furnaces, induction heating installations, gas-discharge radiation sources. Due to the nonlinearity of the current-voltage characteristics, the above devices consume a non-sinusoidal current from the network, which causes harmonic distortion of the supply voltage, including the fundamental harmonic component and higher harmonic components that are multiples of the fundamental frequency. Non-sinusoidal voltage, in turn, causes additional losses of power and energy in the elements of the electrical network, causes overheating and accelerated aging of the insulation of electrical equipment, reducing its operational reliability and reducing service life, worsens the accuracy of electrical measurements, causes malfunctions in automation systems, telemechanics, relay protection, electronic systems and communications. Non-sinusoidal voltage significantly complicates the compensation of reactive power in the electrical network. Compensating devices are made on the basis of capacitors, whose electrical parameters (resistance, power, current) depend on both the magnitude of the supply voltage and its harmonic composition. The present article identifies problems and proposes solutions in terms of reactive power compensation and improving the quality of electrical energy in electrical networks containing thyristor voltage converters and frequency converters used in adjustable electric drive installations of industrial enterprises.

Keywords: reactive power compensation, quality of electrical energy, conductive electromagnetic interference, voltage converter, frequency converter, filter compensating device

For citation: Schasny V. P., Zhukouski A. I. (2022) Electromagnetic Compatibility of Compensating Devices and Converters of an Adjustable Electric Drive in Electrical Networks of Industrial Enterprises. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (1), 37–51. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-37-51> (in Russian)

Введение

Под электромагнитной совместимостью в электроэнергетике принято понимать способность различных видов электрооборудования нормально функционировать в единой электромагнитной среде, не создавая при этом взаимно недопустимых помех. Проблема электромагнитной совместимости электроприемников с питающей сетью вызывает объективные сложности при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий.

На промышленных предприятиях широко применяются регулируемые электроприводы постоянного и переменного тока (асинхронные). Коэффициент мощности указанных электроприемников преимущественно находится в пределах 0,60–0,85, соответственно коэффициент реактивной мощности 0,6–1,3. В этих условиях потребляемая бесполезная реактивная мощность соизмерима и даже может превышать полезную активную мощность, что обуславливает необходимость компенсации реактивной мощности.

В электрических сетях, содержащих преобразователи регулируемого электропривода, в частности тиристорные преобразователи напряжения и преобразователи частоты, компенсация реактивной мощности имеет особенности. Вследствие нелинейности вольт-амперных характеристик указанные устройства потребляют из сети несинусоидальный ток, включающий ряд высших гармоник, которые создают кратные падения напряжения в элементах электрической сети и тем самым вызывают искажение синусоидальности питающего напряжения.

Особенно опасна несинусоидальность напряжения для конденсаторов. Из-за уменьшения сопротивления конденсаторов токам высших гармоник пропорционально порядковому номеру гармоники происходит их перегрузка по току и, как следствие, перегрев, ускоренное старение диэлектрика и преждевременный выход из строя. Согласно мировой статистике, более 70 % повреждений конденсаторов в электрических сетях промышленных предприятий происходит из-за воздействия высших гармоник.

Проблемы и их решения

Регулируемые электроприводы постоянного тока содержат двигатели постоянного тока (ДПТ) и управляемые тиристорные выпрямители (УТВ). Искажения кривых тока и напряжения в сетях ДПТ с УТВ являются следствием коммутации тиристоров. В момент коммутации тиристоров происходит подключение нагрузки к соответствующей фазе без разрыва тока предыдущей фазы, что приводит к периодическим междуфазным коротким замыканиям в питающей сети. Эти коммутационные короткие замыкания отличаются от аварийных лишь малой длительностью времени протекания. В кривой напряжения в процессе коммутации тиристоров появляются коммутационные искажения, форма, величина и количество которых зави-

сят от схемы и количества фаз выпрямления, мощности преобразователя, параметров питающей сети.

Коммутационные искажения тока и напряжения имеют периодический характер, что позволяет производить их гармонический анализ – выделять высшие гармоники, кратные основной частоте.

Методы расчета несинусоидальности напряжения в электрических сетях при работе вентильных преобразователей описаны в [1]. Порядок высших гармоник тока, создаваемых УТВ, определяется по выражению

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

где m – число фаз выпрямления; $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ – последовательный ряд натуральных чисел.

В регулируемых электроприводах постоянного тока наиболее часто применяются УТВ, выполненные по 6- или 12-пульсной схеме выпрямления. Согласно (1), входной ток 6-пульсного преобразователя содержит 5, 7, 11, 13, 17, 19-ю и т. д. гармоники; 12-пульсного – 11, 13, 23, 25, 35, 37-ю и т. д.

В качестве примера на рис. 1–4 представлены гистограммы коэффициентов высших гармонических составляющих тока $K_{I(n)}$ и напряжения $K_{U(n)}$ в сетях волочильных станов грубого (ГВ) и среднего (СВ) волочения сталепроволочного цеха № 1 Белорусского металлургического завода. Указанные станы оснащены ДПП с УТВ, выполненными по 6-пульсной схеме. Методика расчета параметров и результаты моделирования режимов работы компенсирующих устройств в электрических сетях волочильных станов с регулируемыми электроприводами постоянного тока подробно описаны в [2, 3].



Рис. 1. Гистограмма коэффициентов высших гармонических составляющих тока стана грубого волочения

Fig. 1. Histogram of the coefficients of higher harmonic components of the current in the coarse drawing mill

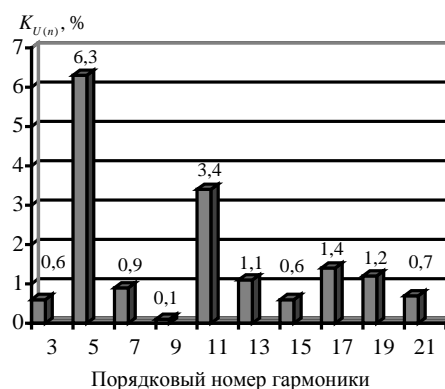


Рис. 2. Гистограмма коэффициентов высших гармонических составляющих напряжения в сети стана грубого волочения

Fig. 2. Histogram of the coefficients of the higher harmonic components of the voltage in the network of coarse drawing mill

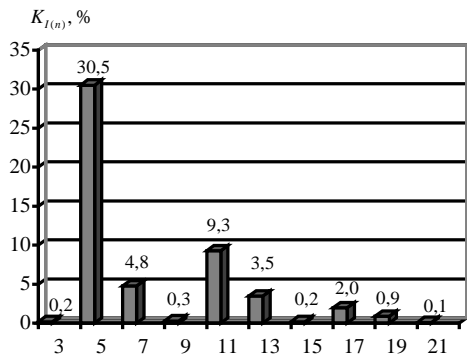


Рис. 3. Гистограмма коэффициентов высших гармонических составляющих тока стана среднего волочения

Fig. 3. Histogram of the coefficients of the higher harmonic components of the current in the medium drawing mill

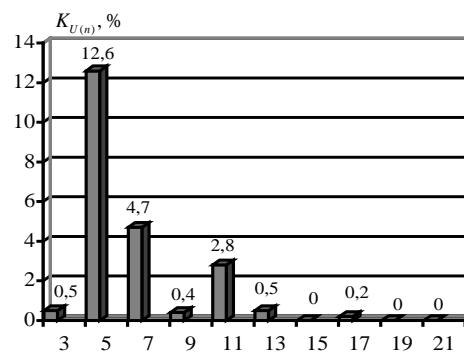


Рис. 4. Гистограмма коэффициентов высших гармонических составляющих напряжения в сети стана среднего волочения

Fig. 4. Histogram of the coefficients of the higher harmonic components of the voltage in the network of the medium drawing mill

Анализ несинусоидальности напряжения в сети стана СВ показал следующее:

- качество электрической энергии не удовлетворяет требованиям стандарта [4]: суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения 13,7 % (допускается 8 %); коэффициент 5-й гармонической составляющей напряжения 12,6 % (допускается 6 %);

- в составе напряжения ярко выделяются 5, 7 и 11-я высшие гармонические составляющие, формирующие основные искажения синусоидальности напряжения.

При фактической величине напряжения и его гармоническом составе в сети стана СВ расчетный коэффициент перегрузки конденсаторов по току $k_I > 1,4$. Для конденсаторов стандартных серий производителями установлен коэффициент максимальной длительной токовой перегрузки $k_{I_{\max}} = 1,3$, что соответствует требованиям Правил устройства электроустановок. В указанных условиях компенсация реактивной мощности с применением обычных батарей статических конденсаторов или автоматических конденсаторных установок (АКУ) невозможна.

Задачи компенсации реактивной мощности и повышения качества электрической энергии в исследуемой сети могут быть решены в комплексе путем применения фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), представляющих собой комбинации пассивных $L-C$ -фильтров с последовательным соединением дросселей и конденсаторов, резонансно настроенных на частоты преобладающих высших гармоник. Достоинство ФКУ состоит в том, что конденсаторы, входящие в состав фильтров высших гармоник, являются источниками реактивной мощности на основной частоте и, таким

образом, осуществляют компенсацию реактивной мощности в электрической сети.

Принцип действия ФКУ основан на условии резонанса в электрической цепи с последовательным соединением индуктивного и емкостного элементов

$$n2\pi fL_{\Phi} = \frac{1}{n2\pi fC_{\Phi}}, \quad (2)$$

где f – частота сети, Гц; L_{Φ} – индуктивность фильтра, Г; C_{Φ} – емкость фильтра, Ф.

При идеальной резонансной настройке фильтра L – C -цепь представляет собой короткое замыкание для n -й гармоники тока, в результате напряжение в сети не содержит данной гармоники. Вместе с тем, кроме тока n -й гармоники, по L – C -цепи (при пренебрежении активным сопротивлением элементов) протекает ток 1-й гармоники

$$I_1 = \frac{U_1}{\frac{1}{2\pi fC_{\Phi}} - 2\pi fL_{\Phi}}, \quad (3)$$

где U_1 – напряжение 1-й гармоники, В.

Трехфазный фильтр, настроенный на частоту n -й гармоники, выдает в сеть реактивную мощность

$$Q = 3(2\pi fC_{\Phi}) \frac{n^2}{n^2 - 1} U_1^2. \quad (4)$$

Для компенсации реактивной мощности и фильтрации высших гармоник в сети стана СВ целесообразно применить автоматическое фильтрокомпенсирующее устройство (АФКУ). Параметры компенсирующих ступеней АФКУ (емкость конденсаторов, индуктивность дросселей) выбираются такими, чтобы коэффициент мощности в сети был не ниже 0,95 и обеспечивалась резонансная настройка L – C -цепей на частоты фильтруемых гармоник: для фильтра 5-й гармоники резонансная частота фильтра принята 247 Гц (идеальная резонансная частота 250 Гц), для фильтра 7-й гармоники – 346 Гц (350 Гц). При наличии в АФКУ фильтров двух и более гармоник для управления режимом работы необходимо использовать специальный регулятор реактивной мощности с функцией избирательного включения ступеней регулирования, реализующий алгоритм последовательного включения фильтров более низких, а затем более высоких гармоник и их отключения в обратном порядке.

Результаты моделирования работы АФКУ в сети стана СВ приведены в табл. 1, 2. Формы кривых тока и напряжения в сети стана СВ в исходном режиме и при включении в сеть АФКУ представлены на рис. 5–8.

Таблица 1

Значения токов основной и высших гармоник стана среднего волочения
The values of the currents of the fundamental and higher harmonics
of the medium drawing mill

Составляющая тока	Значение тока основной и высших гармоник				Кратность изменения тока
	без автоматического фильтрокомпенсирующего устройства		с автоматическим фильтрокомпенсирующим устройством		
	в амперах	в процентах от I_1	в амперах	в процентах от I_1	
I_1	338,5	–	148,8	–	2,3
I_5	94,6	28,0	2,63	1,8	36,0
I_7	16,9	5,0	0,46	0,3	36,7
I_Σ	353,6		149,0		2,4

Таблица 2

Значения напряжений основной и высших гармоник в сети стана среднего волочения
The values of the voltages of the fundamental and higher harmonics in the network
of the medium drawing mill

Составляющая напряжения	Значение напряжения основной и высших гармоник				Кратность изменения напряжения
	без автоматического фильтрокомпенсирующего устройства		с автоматическим фильтрокомпенсирующим устройством		
	в вольтах	в процентах от U_1	в вольтах	в процентах от U_1	
U_1	224,8	–	224,7	–	1,0
U_5	28,8	12,8	0,88	0,4	32,7
U_7	6,8	3,0	0,24	0,1	28,3
U_Σ	231,5		245,9		1,06

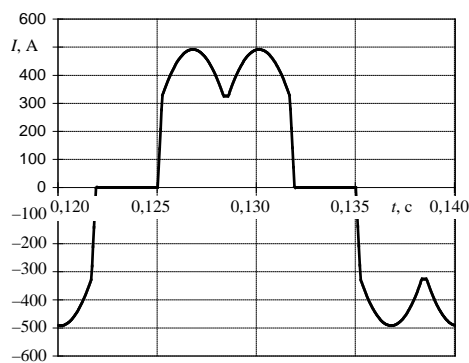


Рис. 5. Исходная форма кривой тока стана среднего волочения

Fig. 5. The initial shape of the current curve of the medium drawing mill

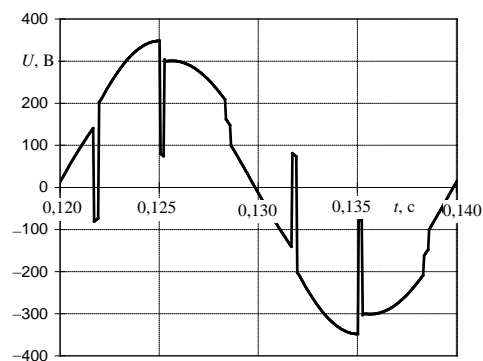


Рис. 6. Исходная форма кривой напряжения в сети стана среднего волочения

Fig. 6. The initial shape of the voltage curve in the network of the medium drawing mill

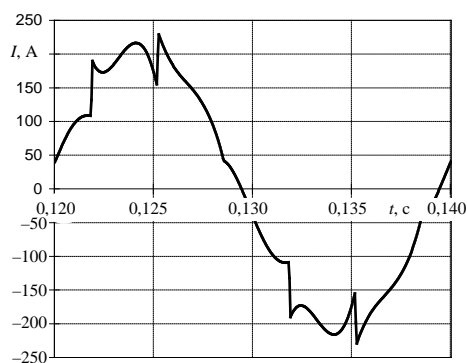


Рис. 7. Форма кривой тока стана среднего волочения с автоматическим фильтрокомпенсирующим устройством

Fig. 7. The shape of the current curve in the medium drawing mill with an automatic filter compensating device

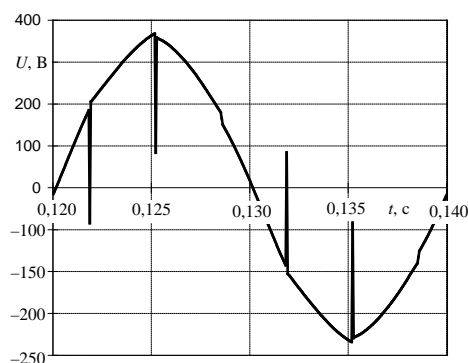


Рис. 8. Форма кривой напряжения в сети стана среднего волочения с автоматическим фильтрокомпенсирующим устройством

Fig. 8. The shape of the voltage curve in the network of the medium drawing mill with an automatic filter compensating device

Результаты расчетов показали, что включение в сеть стана СВ АФКУ, содержащего фильтры 5-й и 7-й гармоник, позволит:

- снизить уровни фильтруемых гармоник тока: 5-й – в 36 раз, 7-й – в 36,7 раза; гармоник напряжения: 5-й – в 32,7 раза, 7-й – в 28,3 раза;
- существенно улучшить формы кривых тока и напряжения;
- обеспечить соответствие значений суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и коэффициентов n -х гармонических составляющих напряжения требованиям действующего стандарта;
- уменьшить полный потребляемый ток стана за счет компенсации реактивной мощности и фильтрации высших гармоник в 2,4 раза, что даст возможность сократить потери мощности и энергии в сети.

При проектировании ФКУ часто сознательно снижают резонансную частоту L - C -фильтров в отношении их идеальной резонансной частоты, что несколько уменьшает степень фильтрации высших гармоник, однако существенно повышает надежность ФКУ. К примеру, для фильтра 5-й гармоники резонансную частоту принимают равной 234 Гц, для 7-й гармоники – 331 Гц. Выбор резонансной частоты фильтров зависит от уровней гармонических искажений напряжения в сети и требований к степени фильтрации высших гармоник. Примеры применения ФКУ в электрических сетях промышленных предприятий описаны в [5–8].

Проблема электромагнитной совместимости также остро стоит при проектировании компенсации реактивной мощности в сетях с частотно-регулируемыми электроприводами, наиболее часто применяемыми в настоящее время. Частотно-регулируемые электроприводы содержат асинхронные электродвигатели (АД) и преобразователи частоты (ПЧ). Искажения кривых тока и напряжения в сетях АД с ПЧ обусловлены наличием выпрямителей на входе ПЧ.

Распространенное среди энергетиков мнение, что ПЧ, оснащенные встроенным входным фильтром (сетевым дросселем), не оказывают влияния на качество напряжения в питающей сети, не верно. Это мнение справедливо лишь для частного случая, когда в сети предприятия имеются единичные либо множество маломощных АД с ПЧ, которые не формируют максимальную нагрузку, и вносимые ими искажения не могут существенно повлиять на синусоидальность напряжения в сети. Работа ПЧ сопровождается потреблением из сети несинусоидального тока даже в том случае, когда индуктивность сетевого дросселя подобрана правильно. Как показывает практика, последнее наблюдается далеко не всегда, поскольку при внедрении частотно-регулируемого электропривода анализ сети – скорее исключение, чем правило. На рис. 9 приведены гистограммы высших гармоник напряжения в сети насосного агрегата повысительной насосной станции УП «Минскводоканал», оснащенного АД мощностью 200 кВт в комплекте с ПЧ, при работе с отключенным и включенным сетевым дросселем. Как видно из гистограмм, наличие сетевого дросселя на входе ПЧ незначительно уменьшает уровни высших гармоник напряжения в сети.



Рис. 9. Гистограммы высших гармоник напряжения в сети насосного агрегата (асинхронный двигатель с преобразователем частоты):
а – без сетевого дросселя; б – с сетевым дросселем

Fig. 9. Histograms of higher voltage harmonics in the pumping unit network (induction motor with frequency converter):
a – without mains choke; b – with mains choke

Компенсация реактивной мощности в сети АД с ПЧ имеет два принципиальных отличия от описанного выше решения для сети ДПТ с УТВ:

- 1) спектр высших гармоник напряжения в сети, как правило, более широкий, и отдельные высшие гармоники выделяются не так явно;
- 2) несинусоидальность напряжения в сети чаще всего соответствует норме, и проблема фильтрации высших гармоник остро не стоит.

В этих условиях применять ФКУ, содержащие фильтры сразу нескольких высших гармоник, технически сложно и экономически неэффективно.

Для компенсации реактивной мощности в сетях АД с ПЧ целесообразно применять АКУ в исполнении, защищенном от высших гармоник, с расстроенными L - C -цепями (защищенные АКУ). Такие установки также называют широкополосными фильтрами высших гармоник. В них последовательно с конденсаторами включаются защитные дроссели, сдвигающие частоту резонанса системы ниже частоты самой низкой высшей гармоники, присутствующей в сети. Резонансная частота системы, включающей индуктивность элементов внешней сети (силового трансформатора и пр.) и емкость конденсатора, определяется:

– без защитного дросселя

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_c C}}; \quad (5)$$

– с защитным дросселем

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_c + L_d)C}}, \quad (6)$$

где L_c – индуктивность элементов внешней сети, Г; L_d – то же дросселя, Г; C – емкость конденсатора (батареи конденсаторов), Ф.

Коэффициент расстройки дросселя определяется как

$$k_p = \left(\frac{f}{f_d} \right)^2 100, \quad (7)$$

где f_d – резонансная частота дросселя, Гц.

В защищенных АКУ чаще всего применяются расстроенные дроссели на резонансные частоты 134 Гц ($k_p = 14\%$) и 189 Гц ($k_p = 7\%$). Соответственно дроссели с $k_p = 14\%$ применяются в сетях с преобладанием 3-й гармоники и гармоник более высоких порядков, дроссели с $k_p = 7\%$ – 5-й гармоники и гармоник более высоких порядков. Сопротивление L - C -цепи на основной частоте и частотах меньше резонансной имеет емкостный характер, а на частотах больше резонансной – индуктивный, что препятствует возникновению высших гармоник тока значительной величины и не искажает синусоидальность напряжения в сети.

Производители компенсирующих устройств рекомендуют применять защищенные АКУ в сетях, где суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $K_U > 3\%$ и отсутствуют требования к фильтрации высших гармоник. Однако данная рекомендация весьма условна, так как важно учитывать не только суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, но и значения коэффициентов n -х гармонических составляющих напряжения вследствие неравноценного влияния высших гармоник различных порядков на перегрузку конденсаторов.

Решение о применении обычных или защищенных АКУ необходимо принимать на основе анализа показателей несинусоидальности напряжения в сети и определения расчетной перегрузки конденсаторов. Критерием допустимости применения обычных АКУ является расчетное значение коэффициента длительной токовой перегрузки конденсаторов ($k_I \leq 1,3$), определяемого с учетом тока основной частоты (I_1) и токов высших гармонических составляющих (I_n):

$$I_1 = \frac{U_1}{1/2\pi f C}; \quad (8)$$

$$I_n = \frac{U_n}{1/n 2\pi f C}; \quad (9)$$

$$I_\Sigma = \sqrt{I_1^2 + \sum I_n^2}; \quad (10)$$

$$k_I = \frac{I_\Sigma}{I_n}, \quad (11)$$

где U_n – напряжение n -й гармоники, В; $I_{ном}$ – номинальный ток конденсатора (батареи конденсаторов), А.

Проблему надежности АКУ нельзя решить исключительно применением специальных конденсаторов, предназначенных для тяжелых (серия HD) и сверхтяжелых (серия UHD) условий работы. Конденсаторы указанных серий допускают ограниченные по времени токовые перегрузки (в течение не более 48 ч непрерывной работы): $k_I \leq 2,0$ – для HD; $k_I \leq 2,5$ – для UHD. Допускаемые длительные (без ограничения по времени) токовые перегрузки конденсаторов практически всех производителей $k_I \leq 1,3$. Поэтому специальные конденсаторы позволяют обеспечить достаточную надежность АКУ лишь в нормальных условиях и в условиях периодических недлительных перегрузок.

При проектировании компенсирующих устройств в сетях с гармонически искаженным напряжением необходимо учитывать, что включение в сеть конденсаторов с высокой вероятностью вызовет резонанс токов на частотах

ряда высших гармоник и приведет к еще большим гармоническим искажениям напряжения. В табл. 3 приведены показатели несинусоидальности напряжения на шинах низшего напряжения двухтрансформаторной ТП 10/0,4 кВ сильвинитовой обогатительной фабрики третьего рудоуправления ОАО «Беларуськалий» при отключенных и включенных АКУ. При включении в работу АКУ увеличиваются значения коэффициентов практически всех высших гармонических составляющих напряжения; особенно значительно увеличение коэффициентов 5, 7 и 11-й гармоник, которые и изначально были максимальными.

Таблица 3

Показатели несинусоидальности напряжения на шинах низшего напряжения ТП 10/0,4 кВ при отключенных и включенных автоматических конденсаторных установках
Indicators of non-sinusoidal voltage on low-voltage TP 10/0.4 kV buses when the automatic capacity units are switched off and on

Показатель несинусоидальности напряжения	Трансформатор Т1		Трансформатор Т2	
	АКУ отключена	АКУ включена	АКУ отключена	АКУ включена
$K_U, \%$	2,5	3,9	2,9	5,0
Коэффициенты n -х гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}, \%$				
$K_{U(3)}$	0,27	0,32	0,25	0,24
$K_{U(5)}$	2,36	3,32	2,53	3,78
$K_{U(7)}$	0,50	0,78	1,22	3,53
$K_{U(9)}$	0,15	0,52	0,09	0,27
$K_{U(11)}$	0,60	2,53	0,29	1,40
$K_{U(13)}$	0,10	0,60	0,18	0,73
$K_{U(15)}$	0,05	0,22	0,01	0,07
$K_{U(17)}$	0,07	0,30	0,03	0,20
$K_{U(19)}$	0,06	0,16	0,04	0,11
$K_{U(21)}$	0,03	0,10	0,01	0,01

Если при выборе типа АКУ ориентироваться исключительно на текущие значения показателей несинусоидальности напряжения в сети (как правило, именно эти данные являются исходными), можно допустить ошибку, приняв к установке АКУ без защиты от высших гармоник. Как следствие, при включении в сеть данная АКУ нормально работать не будет. На ряде предприятий новые АКУ, закупленные без достаточной технической проработки, не введены в эксплуатацию по причине их электромагнитной несовместимости с питающей сетью. Попытки эксплуатировать АКУ в нарушение требований электромагнитной совместимости часто приводят к их выходу из строя, иногда – к возникновению аварий, распространяющихся на всю систему электроснабжения предприятия.

Случаи аварийного выхода из строя конденсаторных установок энергослужбами предприятий не афишируются, но они далеко не единичны.

Защищенные АКУ и АФКУ в среднем в 2–2,5 раза дороже обычных конденсаторных установок, что сдерживает их масштабное применение. При детальной технико-экономической проработке применение специальных компенсирующих устройств позволяет достичь хороших результатов. Дополнительный экономический эффект от фильтрации высших гармоник может составить 20 % и более от общего эффекта (без учета технологического эффекта от повышения качества электрической энергии в сети, который зачастую является определяющим). Экономическая эффективность применения компенсирующих устройств в электрических сетях предприятий разных отраслей промышленности Беларуси (металлургии, машиностроения, строительной индустрии, пищевой промышленности) отражена в [9–12].

В заключение обратим внимание на еще одну важную проблему. Отсутствие в Беларуси платы за реактивную энергию (принимаемую и выдаваемую), а также реальной взаимной ответственности энергоснабжающих организаций и потребителей за нарушение установленных норм качества электрической энергии в точках ее передачи является серьезным препятствием для успешного решения задач компенсации реактивной мощности и повышения качества электрической энергии [13, 14]. Без соответствующих актов законодательства, регулирующих взаимоотношения и устанавливающих юридическую и экономическую ответственность субъектов рынка электроэнергии, при решении указанных задач неизбежны объективные технические сложности и недостижимы желаемые экономические результаты.

ВЫВОД

При проектировании компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий ключевым фактором является обеспечение электромагнитной совместимости компенсирующих устройств и электроприемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой, являющихся источниками кондуктивных электромагнитных помех. Задачи компенсации реактивной мощности и повышения качества электрической энергии должны решаться совместно на стадии проектирования систем электроснабжения предприятий. Выбор типов и параметров компенсирующих устройств необходимо производить на основе результатов исследования специфики электрических нагрузок и анализа (прогнозирования) показателей качества электрической энергии, выявления источников электромагнитных помех и оценки их влияния на работу компенсирующих устройств, моделирования режимов работы компенсирующих устройств в условиях существующей электромагнитной среды, определения экономической эффективности вариантов технических решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, В. С. Режимы потребления и качество электрической энергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В. С. Иванов, В. И. Соколов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 336 с.
2. Жуковский, А. И. Эффективность применения фильтрокомпенсирующих устройств на примере сталепроволочного цеха № 1 РУП «Белорусский металлургический завод» / А. И. Жуковский // *Металлургия и литейное производство* 2007. Беларусь: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 6–7 сент. 2007. Жлобин: ПО «БМЗ», 2007. С. 99–101.
3. Жуковский, А. И. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии в электрических сетях промышленных предприятий / А. И. Жуковский // *Энергия и Менеджмент*. 2008. № 3. С. 38–42.
4. *Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 32144–2013. Введ. 01.04.2016.* Минск: БелГИСС, 2016. 19 с.
5. Жуковский, А. И. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии в электрических сетях промышленных предприятий / А. И. Жуковский // *МЕТАЛЛ Информ*. 2008. № 4. С. 39–42.
6. Жуковский, А. И. Фильтрокомпенсирующие устройства для компенсации реактивной мощности и повышения качества электроэнергии в электрических сетях металлургических предприятий / А. И. Жуковский // *Металлургия и литейное производство* 2007. Беларусь: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Жлобин, 6–7 сент. 2007. Жлобин: ПО «БМЗ», 2007. С. 118–120.
7. Жуковский, А. И. К вопросу о проектировании компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий / А. И. Жуковский // *Энергия и Менеджмент*. 2015. № 2. С. 20–30.
8. Счастный, В. П. Взаимовлияние режимов регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий / В. П. Счастный, А. И. Жуковский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 3. С. 239–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-239-249>.
9. Жуковский, А. И. Компенсация реактивной мощности. Проблемы и решения / А. И. Жуковский // *Энергия и Менеджмент*. 2007. № 3. С. 30–33.
10. Жуковский, А. И. Компенсация реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий / А. И. Жуковский, В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич // *Энергия и Менеджмент*. 2013. № 4–5. С. 23–26.
11. Счастный, В. П. Особенности выбора установок компенсации реактивной мощности / В. П. Счастный, А. И. Зеленкевич // *Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 ч.* Минск: БГАТУ, 2019. Ч. 1. С. 393–394.
12. Козловская, В. Б. Учет влияния высших гармоник при выборе сечений проводников линий наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 6. С. 544–557. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-544-557>.
13. Пекелис, В. Г. Потребляемая и генерируемая реактивная энергия. Порядок расчетов с абонентами / В. Г. Пекелис, А. И. Жуковский // *Энергетика и ТЭК*. 2004. № 10. С. 12–14.
14. Жуковский, А. И. Новые технико-экономические условия и подходы к расчетам с потребителями за реактивную энергию / А. И. Жуковский // *Агропанорама*. 2005. № 6. С. 26–30.

Поступила 03.12.2020 Подписана в печать 23.02.2021 Опубликована онлайн 31.01.2022

REFERENCES

1. Ivanov V. S., Sokolov V. I. (1987) *Consumption Regimes and the Quality of Electricity Power Systems of Industrial Enterprises*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 336 (in Russian).
2. Zhukouski A. I. (2007) Efficiency of the Use of Filtration-Compensating Devices by the Case of the Steel Wire Workshop No 1 of the Belarusian Steel Works. *Metallurgiya i Liteinoe Proizvodstvo 2007. Belarus': Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Zhlobin, 6–7 Sent. 2007* [Metallurgy and Foundry Production 2007. Belarus: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Zhlobin, Sept. 6–7, 2007]. Zhlobin, Belarusian Steel Works Industry Association, 99–101 (in Russian).
3. Zhukouski A. I. (2008) Compensation of Reactive Power and Improving the Quality of Electricity in the Electrical Grids of Industrial Enterprises. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (3), 38–42 (in Russian).
4. State Standard 32144–2013. *Electric Power. The Electromagnetic Compatibility of Technical Devices. Quality Standards of Electricity in General Purpose Electricity Systems*. Minsk, BelSIS Publ. 2016. 19 (in Russian).
5. Zhukouski A. I. (2008) Compensation of Reactive Power and Improving the Quality of Electricity in the Electrical Grids of Industrial Enterprises. *METALL Inform*, (4), 39–42 (in Russian).
6. Zhukouski A. I. (2007) Filter-Compensating Devices to Compensate for Reactive Power and Improve the Quality of Electricity in the Electrical Grids of Steel Mills. *Metallurgiya i Liteinoe Proizvodstvo 2007. Belarus': Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Zhlobin, 6–7 Sent. 2007* [Metallurgy and Foundry Production 2007. Belarus: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Zhlobin, Sept. 6–7, 2007]. Zhlobin, Belarusian Steel Works Industry Association, 118–120 (in Russian).
7. Zhukouski A. I. (2015) Towards the Problem of the Design of Compensation of Reactive Power in the Electrical Networks of Industrial Enterprises. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (2), 20–30 (in Russian).
8. Schasny V. P., Zhukouski A. I. (2021) On the Mutual Influence of Voltage Control Modes and the Compensation of Reactive Power in the Electrical Networks of Industrial Enterprises. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (3), 239–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-239-249> (in Russian).
9. Zhukouski A. I. (2007) Reactive Power Compensation. Problems and Solutions. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (3), 30–33 (in Russian).
10. Zhukouski A. I., Schasny V. P., Zelen'kevich A. I. (2013) Compensation of Reactive Power in Electrical Networks of Industrial Enterprises. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (4–5), 23–26 (in Russian).
11. Schasny V. P., Zelen'kevich A. I. (2019) Specific Features of the Selection of Reactive Power Compensation Installations. *Tekhnicheskoe i Kadrovoe Obespechenie Innovatsionnykh Tekhnologii v Sel'skom Khozyaistve: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. Ch. 1* [Technical and Human Resources Provision of Innovative Technologies in Agriculture: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. Part 1]. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 393–394 (in Russian).
12. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2017) Consideration of the Impact of High Harmonics when Selecting the Conductor Cross-Sections of Lines of Outdoor Lighting. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (6), 544–557. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-544-557> (in Russian).
13. Pekelis V. G., Zhukouski A. I. (2004) Consumed and Generated Reactive Energy. Order of Payments with Costumers. *Energetika i TEK* [Energy and Fuel and Energy Complex], (10), 12–14 (in Russian).
14. Zhukouski A. I. (2005) New Feasibility Study and Approaches to Payments with Consumers for Reactive Energy. *Agropanorama* [Agricultural Panorama], (6), 26–30 (in Russian).