

УДК 621.319.4

DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-84-92

## Выбор конденсаторов и устройств компенсации неактивной мощности напряжением до 1000 В

А. Е. Фокеев, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Н. А. Вяткин, студент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Рассмотрены факторы, влияющие на выбор конденсаторов и устройств компенсации неактивной мощности напряжением до 1000 В. Приведены критерии выбора конденсаторов для устройств компенсации неактивной мощности: коэффициент изменения срока службы, коэффициент использования по реактивной мощности и коэффициент гармонической нагрузки.*

*Проанализированы результаты выбора номинального напряжения конденсаторов для устройств компенсации неактивной мощности. Установлено, что для обеспечения нормативного срока службы устройств компенсации неактивной мощности в рассматриваемых случаях номинальное напряжение конденсаторов должно быть увеличено на 10...20 % по сравнению с типовыми решениями производителей. Срок окупаемости таких решений составляет от 3 до 6 лет при нормативном сроке службы оборудования 15 лет. Для объектов с долей полной мощности нелинейной нагрузки более 50 % в электрической сети напряжением до 1000 В для компенсации неактивной мощности необходимо использовать активные фильтры гармоник.*

*Предложен алгоритм выбора конденсаторов и устройств компенсации неактивной мощности с учетом электромагнитной обстановки в электрической сети, предполагающий использование следующих параметров: коэффициент гармонической нагрузки конденсатора, приведенные годовые затраты.*

*Предложенный алгоритм выбора устройств компенсации неактивной мощности может быть использован в составе методики расчета электрических нагрузок и выбора силового электрооборудования при проектировании трансформаторных подстанций для промышленных объектов, инфраструктурных объектов, жилых и общественных зданий.*

**Ключевые слова:** косинусные конденсаторы, нелинейная нагрузка, неактивная мощность, устройства компенсации неактивной мощности.

### Введение

При наличии высших гармонических составляющих тока и напряжения в электрической сети становится неактуальным использование понятия «реактивная мощность»; целесообразно использовать понятие «неактивная мощность» [1]. Компенсация неактивной мощности осуществляется с использованием различных технических средств в зависимости от преобладания в ее составе реактивной мощности или мощности токовых искажений, типа и режима работы их источника: устройства компенсации реактивной мощности на базе статических батарей конденсаторов (УКРМ), УКРМ с антирезонансными дросселями (УКРМФ), пассивные фильтры гармоник (ПФГ), активные фильтры гармоник (АФГ). Подробный обзор компенсирующих устройств и особенности режима их работы приведены в работах [2–4]. Технические средства, применяемые для компенсации неактивной мощности, далее будем именовать устройствами компенсации неактивной мощности (УКНМ).

В составе различных электротехнических устройств широкое применение находят самовосстанавливающиеся металлопленочные конденсаторы (СМПК), главным преимуществом которых является способность к самовосстановлению.

В статье [5] приведен опыт эксплуатации УКРМ с косинусными СМПК при значениях суммарного коэффициента гармонических искажений по напряжению  $K_U = 1,2...4,0$  % в электрической сети и значениями коэффициента гармонической перегрузки  $CHL = 101...103$  % соответственно. Установлено, что при отсутствии условий для возникновения резонансных явлений в электрической сети 30 % всех СМПК не выдержали условий эксплуатации в течение 18 месяцев – срок службы составил 10 % от номинального значения. В аналогичных условиях металлобумажные конденсаторы с жидким диэлектриком обеспечивали срок службы более 30 лет, что превышает номинальное значение срока службы на 20 %.

В статье [6] подробно рассмотрены режимы работы косинусных СМПК в составе УКРМ

и УКРМФ при различной температуре в помещении электроустановки и различных значениях параметров, характеризующих электромагнитную обстановку в электрической сети. В качестве критериев выбора номинального напряжения конденсаторов предложено использовать: коэффициент изменения срока службы  $K_{и.сл}$ , коэффициент использования по реактивной мощности  $K_{и.р}$  и коэффициент гармонической нагрузки конденсатора  $CHL_k$ .

В статье [7] рассматривается вопрос выбора устройств компенсации реактивной мощности по критерию «минимальная стоимость совокупного владения». Однако при определении эксплуатационных расходов не учитывалось влияние внешних факторов на срок службы косинусных СМПК. Кроме того, при оценке конкурентоспособности УКРМ использовалось понятие «уровень качества». В номенклатуре характеристик, определяющих уровень качества, отсутствовали параметры, характеризующие устойчивость УКРМ к воздействию электромагнитных явлений электрической сети.

При проектировании систем электроснабжения и технико-экономической оценке показателей проектов учитывается номинальный срок службы электрооборудования [8, 9]. Снижение срока службы косинусных СМПК в составе УКРМ приводит к увеличению эксплуатационных расходов и, как следствие, приведенных годовых затрат проекта. При высоких приведенных годовых затратах на мероприятия по компенсации реактивной мощности экономическая целесообразность для потребителя отсутствует.

**Целью исследования** является разработка алгоритма для выбора типа устройств компенсации неактивной мощности (УКНМ) и определение критериев выбора конденсаторов, применяемых в составе УКРМ на стадии проектирования системы электроснабжения, с учетом расчетных параметров электромагнитной обстановки при минимальном наборе исходных данных.

#### **Критерии выбора номинального напряжения конденсатора**

Первым критерием выбора номинального напряжения косинусных СМПК является соответствие фактическому напряжению электрической сети. Для исключения сокращения номинального срока службы конденсаторов под воздействием фактического напряжения электрической сети номинальное напряжение конденсаторов  $U_{к.ном}$  не должно быть меньше действующего значения напряжения электрической сети  $U_{сети}$

с учетом возможного положительного отклонения:

$$U_{к.ном} \geq U_{ном.сети} + \delta U_{(+)}, \quad (1)$$

где  $U_{ном.сети}$  – номинальное/согласованное напряжение электрической сети по ГОСТ 32144–2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»;  $\delta U_{(+)}$  – положительное отклонение напряжения от номинального/согласованного напряжения электрической сети, принимаемое 10 % от  $U_{ном.сети}$  по ГОСТ 32144–2013.

Для конденсатора, работающего в составе УКРМФ, номинальное напряжение должно выбираться по выражению

$$U_{к.ном} \geq \frac{U_{ном.сети} + \delta U_{(+)}}{\left(1 - \frac{p}{100}\right)}, \quad (2)$$

где  $p$  – коэффициент дросселирования, зависящий от соотношения частоты  $f_1$  основной гармоники и резонансной частоты  $f_{рез}$  последовательного колебательного контура антирезонансный дроссель – конденсатор:

$$p = \frac{f_1^2 \cdot 100}{f_{рез}^2}. \quad (3)$$

При выборе по первому критерию необходимо учитывать, что ГОСТ 29322–2014 (IEC 60038–2009) «Напряжения стандартные» предписывает для трехфазных четырехпроводных электрических сетей с частотой 50 Гц применять в качестве номинальных значений фазного/линейного напряжений значения 230/400 и 400/690 В. Необходимость обеспечения требуемого уровня напряжения 230/400 В для удаленных электроприемников в ряде случаев обуславливает наличие значений напряжения 253/440 В на шинах распределительных устройств 0,4 кВ трансформаторных подстанций, к которым подключаются УКРМ. Таким образом, значение фактического линейного напряжения в электрической сети с учетом возможного положительного отклонения может достигать 440 В.

Вторым критерием выбора номинального напряжения косинусных СМПК является отсутствие гармонической перегрузки под воздействием высших гармонических составляющих напряжения электрической сети. Анализ режимов работы косинусных СМПК показал, что коэффициент гармонической нагрузки конденсатора  $CHL_k$  не должен превышать 100 %:

$$CHL_k = \sqrt{\sum_{h=1}^h \left( \frac{h \cdot U_h}{U_{k,ном}} \right)^2} \cdot 100 \leq 100 \%, \quad (4)$$

где  $h$  – номер гармоники напряжения;  $U_h$  – действующее значение напряжения  $h$ -й гармоники;  $U_{k,ном}$  – номинальное напряжение конденсатора.

Третьим критерием выбора номинального напряжения косинусных СМПК является обеспечение значения коэффициента изменения срока службы под влиянием температуры окружающего воздуха больше единицы:

$$K_{и.сл} = \frac{1}{n_v} \frac{1}{n_T} \geq 1,0, \quad (5)$$

где  $n_v$  и  $n_T$  – перерасчетные коэффициенты для напряжения и температуры соответственно по ИЕС 61709–2017 «Electric components - Reliability - Reference conditions for failure rates and stress models for conversion».

При выборе по третьему критерию следует руководствоваться номинальным значением температуры окружающей среды  $T_{Аном} = +40$  °С (температура наружного воздуха в теплое время года  $+35$  °С и допустимое увеличение на  $+5$  °С по ГОСТ 1282–88 «Конденсаторы для повышения коэффициента мощности»), которое наблюдается в подавляющем большинстве электроустановок, оснащенных системами естественной и принудительной вытяжной вентиляции. Таким образом, для конденсаторов, работающих при температуре окружающего воздуха, превышающей допустимое среднегодовое значение температуры более чем на  $5$  °С, требуется такое увеличение номинального напряжения, которое обеспечит  $K_{и.сл} \geq 1,0$  с учетом первого и второго критерия выбора.

Четвертым критерием выбора номинального напряжения косинусных СМПК является коэффициент использования по реактивной мощности. Для применения экономически целесооб-

разного увеличения напряжения конденсатора необходимо пользоваться следующим правилом. Коэффициент использования конденсатора по реактивной мощности первой гармоники без учета реактивных мощностей высших гармоник

$$K_{и.О} = \frac{Q_{к.факт}}{Q_{к.ном}} \geq 0,5, \quad (6)$$

где фактическое значение фактической реактивной мощности конденсатора без использования антирезонансного дросселя, кВАр,

$$Q_{к.факт} = U_{к.факт}^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_k \cdot 10^{-3}; \quad (7)$$

при использовании антирезонансного дросселя, кВАр,

$$Q_{к.факт.др} = \left( \frac{U_{сети}}{U_{к.ном}} \right)^2 \cdot \frac{Q_{к.ном}}{(1-p)} \cdot 10^{-3}. \quad (8)$$

Применение вышеуказанных критериев выбора косинусных СМПК сводится к обеспечению режима работы, при котором не будет возникать перегрузки конденсаторов, а негативное влияние внешних факторов будет компенсироваться недоиспользованием конденсаторов по напряжению. Несомненно, что при таком подходе, когда конденсатор недоиспользован по реактивной мощности, увеличивается стоимость УКРМ, в том числе и за счет увеличения стоимости токоведущих частей и коммутационных аппаратов. При этом снижаются эксплуатационные расходы, связанные с необходимостью частой замены конденсаторов. Пример экономической целесообразности такого подхода для потребителя (собственника УКРМ) приведен ниже.

#### Анализ результатов выбора номинального напряжения конденсаторов

Расчет режимных параметров конденсаторов выполнялся для трех объектов с различными параметрами электрической сети (табл. 1).

Таблица 1. Параметры электрической сети

Table 1. The parameters of the electrical network

Значение $K_{U_s}$ , %	Значение $K_{U_h}$ , %									Значение $CHL$ , %
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	
4,0	3,0	1,5	1,0	1,5	0,5	0,6	0,8	0,3	0,2	103
5,8	2,5	3,5	2,5	1,0	2,0	1,5	0,8	1,0	0,5	110
10,9	5,0	6,0	5,0	1,5	3,5	3,0	0,5	2,0	1,5	133

В качестве параметров электрической сети использовались значения коэффициента  $h$ -й гармонической составляющей  $K_{U_h}$  и значения суммарного коэффициента гармонических со-

ставляющих напряжения  $K_{U_s}$ , полученные при проведении инструментальных обследований трансформаторных подстанций. Значение фактического напряжения в электрической сети

принималось 400 и 420 В для электрических сетей с номинальным напряжением 380 и 400 В соответственно при значении положительного отклонения напряжения 5 %. Значения  $CHL$  определены по выражению (4).

Рассматривались варианты использования в составе УКРМ и УКРМФ мощностью 100 кВАр конденсаторов с различным значением номинального напряжения при соответствующих значениях номинальной емкости. Для электрической сети со значением фактического напряжения 400 В рассматривались варианты применения в УКРМ конденсаторов с номинальным напряжением 440, 480, 525 и 580 В взамен 400 В. Для электрической сети с фактическим значением напряжения 420 В рассматривались варианты применения в УКРМ конденсаторов с номинальным напряжением 480, 525 и 580 В взамен 440 В.

Для УКРМФ рассматривался вариант с использованием антирезонансных дросселей с частотой расстройки 189 Гц (коэффициент дросселирования  $p = 7$  %). Для электрической сети со значением фактического напряжения 400 и 420 В рассматривались варианты применения в УКРМФ конденсаторов с номинальным напряжением 480, 525 и 580 В взамен 440 В.

В качестве основных критериев анализа рассматривались приведенные годовые затраты и срок окупаемости для различных вариантов использования конденсаторов относительно варианта применения конденсаторов, для которых номинальное напряжение соответствует фактическому напряжению электрической сети.

Приведенные годовые затраты на компенсацию неактивной мощности при среднем сроке службы УКРМ и косинусных СМПК  $T_{сл} = 15$  лет (120000...150000 часов):

$$Z_r = \frac{K + \mathcal{E}_{зам.к}}{T_{сл}}, \quad (9)$$

где  $K$  – капитальные затраты для УКРМ на базе косинусных СМПК, которые принимались равными 1,0 о.е. для базовых вариантов УКРМ и УКРМФ, для прочих вариантов принимались путем перерасчета с учетом разницы в фактической стоимости УКРМ по данным производителей;  $\mathcal{E}_{зам.к}$  – эксплуатационные расходы, связанные с необходимостью частой замены конденсаторов в интервале номинального срока службы конденсаторов.

Эксплуатационные расходы, связанные с необходимостью замены конденсаторов, определялись для УКРМ при  $K_{и.сл} < 1,0$ , о.е.:

$$\mathcal{E}_{зам.к} = \frac{0,38 \cdot K_{400}}{K_{и.сл}},$$

где 0,38 – доля стоимости конденсаторов (0,33) и их работ по их замене (0,05) от общей стоимости современных УКРМ;  $K_{и.сл}$  – коэффициент изменения срока службы конденсатора, определяемый по выражению (5).

Расчет приведенных годовых затрат производился в относительных единицах. В составе эксплуатационных расходов не учитывались потери активной мощности в конденсаторах, риски повреждения оборудования при перегрузке конденсаторов и токоведущих частей УКРМ. Данные показатели в значительной степени зависят от параметров косинусных СМПК конкретного производителя и качества изготовления.

Срок окупаемости варианта с большим значением номинального напряжения конденсаторов относительно варианта применения конденсаторов, для которых номинальное напряжение соответствует фактическому напряжению электрической сети, лет:

$$T_{ок} = \frac{K_2 - K_1}{(\mathcal{E}_{зам.к1} - \mathcal{E}_{зам.к2})/T_{сл.ном}},$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – капитальные затраты для вариантов УКРМ с меньшим и большим напряжением конденсаторов соответственно;  $\mathcal{E}_{зам.к1}$  и  $\mathcal{E}_{зам.к2}$  – эксплуатационные расходы, связанные с необходимостью частой замены конденсаторов в интервале номинального срока службы конденсаторов для вариантов УКРМ с меньшим и большим напряжением конденсаторов соответственно.

На рис. 1 представлены зависимости приведенных годовых затрат  $Z_r$  от значения номинального напряжения конденсаторов  $U_{к.ном}$  для УКРМ при подключении к электрическим сетям с различными значениями суммарного коэффициента гармонических искажений  $K_U = 4,0...10,9$  % и значениями фактического напряжения  $U_{ф.сети} = 400$  и 420 В.

На рис. 2 аналогичные зависимости представлены для УКРМФ с частотой расстройки  $f = 189$  Гц.

На рис. 3 представлены зависимости срока окупаемости  $T_{ок}$  от значения номинального напряжения конденсаторов  $U_{к.ном}$  для УКРМ при подключении к электрическим сетям с различными значениями суммарного коэффициента гармонических искажений  $K_U = 4,0...10,9$  % и значениями фактического напряжения  $U_{ф.сети} = 400$  и 420 В.

На рис. 4 аналогичные зависимости представлены для УКРМФ с частотой расстройки  $f = 189$  Гц.

Зависимости  $Z_{\Gamma} = f(U_{к.ном})$  на рис. 1 и  $T_{ок} = f(U_{к.ном})$  на рис. 3 свидетельствуют о целесообразности применения в УКРМ конденсаторов со значением номинального напряжения  $U_{к.ном} = 440$  и  $480$  В. Для электрических сетей с фак-

тическим значением напряжения  $U_{сети факт.} = 400$  В минимум приведенных годовых затрат для УКРМ при  $K_U = 4,0$  % обеспечивают конденсаторы  $U_{к.ном} = 440$  В, при  $K_U = 5,8 \dots 10,9$  % – конденсаторы  $U_{к.ном} = 480$  В. Для электрических сетей с  $U_{сети факт.} = 420$  В минимум приведенных годовых затрат для УКРМ обеспечивают конденсаторы  $U_{к.ном} = 480$  и  $580$  В.

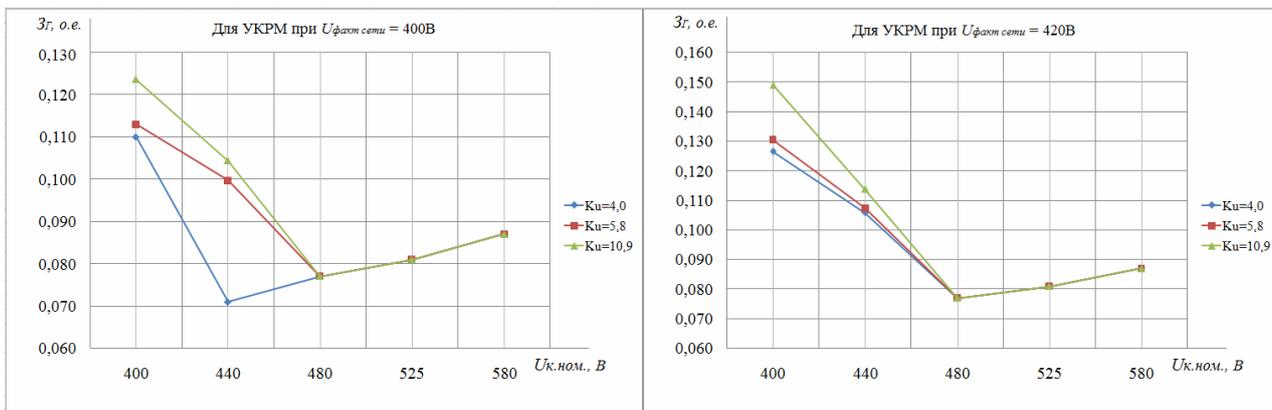


Рис. 1. Зависимости  $Z_{\Gamma} = f(U_{к.ном})$  для УКРМ при различных значениях  $U_{ф.сети}$  и  $K_U$

Fig. 1. Dependencies  $E_A = f(U_{C.RATED})$  for UKRM at different value  $U_{F.GRID}$  and  $THD_U$

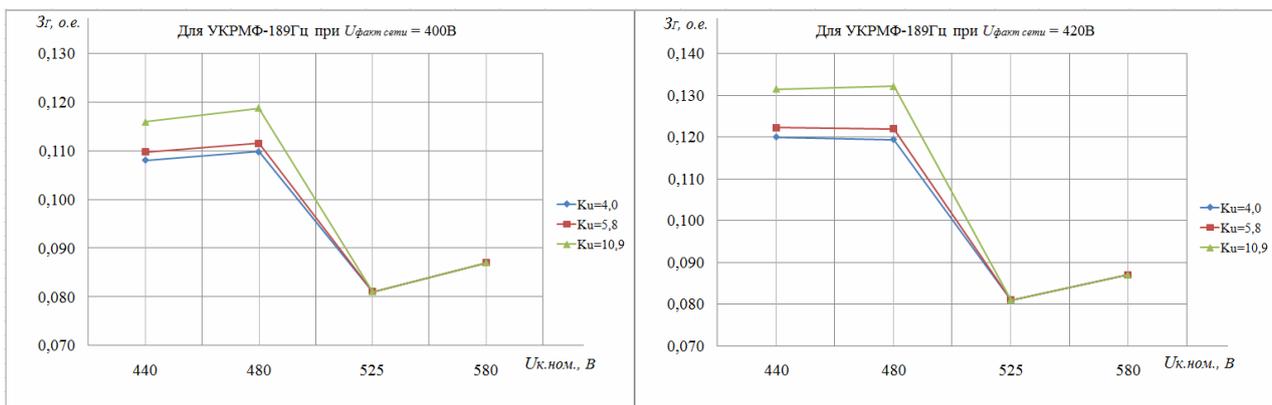


Рис. 2. Зависимости  $Z_{\Gamma} = f(U_{к.ном})$  для УКРМФ  $f = 189$  Гц при различных значениях  $U_{ф.сети}$  и  $K_U$

Fig. 2. Dependencies  $E_A = f(U_{C.RATED})$  for UKRMF  $f = 189$  Hz at different value  $U_{F.GRID}$  and  $THD_U$

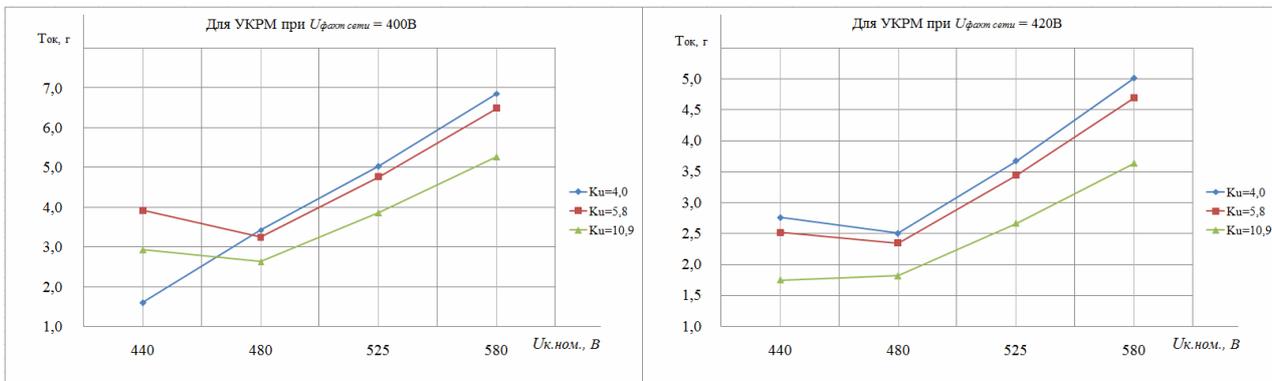


Рис. 3. Зависимости  $T_{ок} = f(U_{к.ном})$  для УКРМ при различных значениях  $U_{ф.сети}$  и  $K_U$

Fig. 3. Dependencies  $T_p = f(U_{C.RATED})$  for UKRM at different value  $U_{F.GRID}$  and  $THD_U$

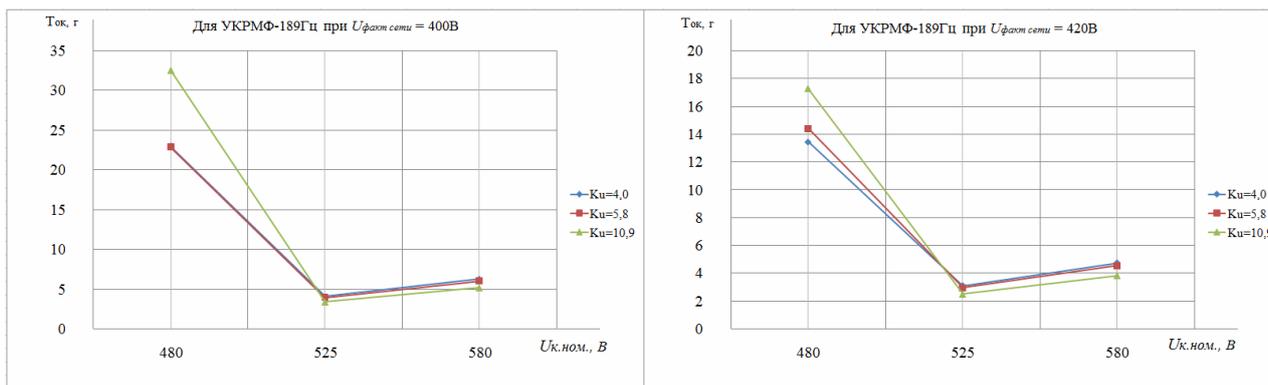


Рис. 4. Зависимости  $T_{ок} = f(U_{к.ном})$  для УКРМФ  $f = 189$  Гц при различных значениях  $U_{ф.сети}$  и  $K_U$

Fig. 4. Dependencies  $T_P = f(U_{C.RATED})$  for UKRMF  $f = 189$  Hz at different value  $U_{F.GRID}$  and  $THDU$

Зависимости  $З_г = f(U_{к.ном})$  на рис. 2 и  $T_{ок} = f(U_{к.ном})$  на рис. 4 свидетельствуют о целесообразности применения в УКРМФ с частотой расстройки 189 Гц конденсаторов со значением номинального напряжения  $U_{к.ном} = 525$  и  $580$  В. Минимум приведенных годовых затрат для УКРМФ при обеспечивают конденсаторы  $U_{к.ном} = 525$  В.

Значительные отличия в форме кривых  $T_{ок} = f(U_{к.ном})$  вызваны двумя факторами. Во-первых, для конденсаторов с более высоким значением номинального напряжения в ряде случаев значение коэффициента изменения срока службы  $K_{и.сл} \geq 1,0$ . Соответственно, величина эксплуатационных затрат, связанных с необходимостью преждевременной замены конденсаторов, принималась равной нулю. Во-вторых, при значениях  $K_{и.сл} < 1,0$  для конденсаторов с  $U_{к.ном} = 480 \dots 580$  В на сроки окупаемости УКРМ с этими конденсаторами начинает влиять более высокая стоимость конденсаторов, учитываемая при расчете эксплуатационных затрат.

При среднем сроке службы УКРМ и косинусных СМПК  $T_{сл} = 15$  лет рассматриваемые альтернативные варианты имеют сроки окупаемости от 2 до 4 лет для УКРМ и от 3 до 7 лет для УКРМФ. Таким образом, применение конденсаторов с номинальным напряжением более высоким, чем в типовых решениях производителей, позволяет потребителю снизить приведенные годовые затраты и риски повреждения оборудования.

**Алгоритм выбора устройств компенсации неактивной мощности**

Сформулирован следующий алгоритм выбора устройств компенсации неактивной мощности с учетом электромагнитной обстановки в электрической сети.

1. Определяется доля полной мощности нелинейной нагрузки от номинальной полной мощности силового трансформатора, %:

$$N_{н.н} = \frac{S_{Pн.н}}{S_{тр.н}} \cdot 100,$$

где  $S_{тр.н}$  – номинальная мощность силового трансформатора;  $S_{Pн.н}$  – полная мощность нелинейных потребителей.

2. При  $N_{н.н} > 50$  % для компенсации неактивной мощности требуется применение активных фильтров гармоник (АФГ), для которых значение номинального тока, А:

$$I_{АФГ} = \sqrt{\sum_{i=1}^m I_{hi}^2},$$

где  $I_h$  – ток  $h$ -й гармонической составляющей, определяемый на этапе расчета электрических нагрузок;  $i$  – номер электроприемника в группе;  $m$  – количество электроприемников в группе.

3. При  $N_{н.н} < 50$  % возможно применение УКРМ или УКРМФ, для которых фактическая реактивная мощность определяется по выражению, кВАр,

$$Q_{\phi} = P_p (\text{tg } \varphi_p - \text{tg } \varphi_{ц}),$$

где  $P_p$  – расчетная активная мощность электрической нагрузки, кВт;  $\text{tg } \varphi_p$  – расчетный коэффициент реактивной мощности;  $\text{tg } \varphi_{ц}$  – целевой коэффициент реактивной мощности.

4. В соответствии с рекомендациями [10] определяется частота гармонической составляющей, для которой возможен резонанс в параллельном контуре силовой трансформатор – УКРМ:

$$f_{рез} = f_1 \cdot \sqrt{\frac{100 \cdot S_{тр.н}}{U_{к.з} \cdot Q_{УКРМ}}},$$

где  $S_{тр.н}$  – номинальная мощность силового трансформатора;  $Q_{УКРМ}$  – номинальная мощность УКРМ при номинальном напряжении электрической сети;  $f_1$  – номинальная частота переменного напряжения электрической сети;  $U_{к.з}$  – напряжение короткого замыкания силового трансформатора.

При наличии в гармоническом составе тока электрической нагрузки данной гармонической составляющей требуется применение в составе УКРМ антирезонансных дросселей с частотой расстройки  $f_{расс} < f_{рез}$ .

5. В соответствии с рекомендациями [11] определяется гармонический состав напряжения электрической сети в точке подключения УКРМ (УКРМФ):

$$U_h = Z_h \cdot I_{h\Sigma},$$

где  $Z_h$  – полное сопротивление системы и силового трансформатора на частоте  $h$ -й гармонической составляющей;  $I_{h\Sigma}$  – суммарное значение тока  $h$ -й гармонической составляющей во вторичной обмотке силового трансформатора, определяемое на этапе расчета электрических нагрузок по тем же рекомендациям.

6. Выбирается номинальное напряжение косинусных СМПК в составе УКРМ и УКРМФ по двум критериям:

$$SNL_k \leq 100\% \text{ и } Z_r \rightarrow \min,$$

где  $SNL_k$  – определяется по выражению (4);  $Z_r$  – определяется по выражению (9) или приближенно с использованием графиков (см. рис. 1, 2).

7. При формировании опросного листа (технического задания) на изготовление УКРМ (УКРМФ) необходимо указывать, что фактическая реактивная мощность  $Q_{факт}$  должна обеспечиваться при фактическом напряжении электрической сети  $U_{ф.сети}$ . Дополнительно рекомендуется указать номинальную мощность УКРМ (УКРМФ)  $Q_{ном}$  при работе на номинальном напряжении конденсатора  $U_{к.ном}$ . Определение  $Q_{факт}$  и  $Q_{ном}$  выполняется с использованием выражений (7) и (8) соответственно.

### Выводы

1. Выбор конденсаторов и устройств компенсации неактивной мощности необходимо осуществлять с использованием данных, характеризующих электромагнитную обстановку

в электрической сети. Для этого на стадии расчета электрических нагрузок требуется определение расчетной полной мощности электроприемников, имеющих нелинейную вольт-амперную характеристику, гармонического состава тока нагрузки и гармонического состава напряжения в точке подключения устройств компенсации.

2. Важнейшим этапом выбора устройств компенсации неактивной мощности является определение номинального напряжения конденсаторов для обеспечения номинального срока службы при максимально возможном коэффициенте использования по реактивной мощности. В качестве основных критериев выбора номинального напряжения конденсаторов УКРМ (УКРМФ) необходимо использовать коэффициент гармонической перегрузки конденсатора и приведенные годовые затраты.

3. В рассмотренных случаях применения УКРМ и УКРМФ для обеспечения нормативного срока службы косинусных СМПК и эффективности мероприятий по компенсации неактивной мощности номинальное напряжение конденсаторов должно быть увеличено на 10...20% (по сравнению с типовыми решениями производителей) в зависимости от гармонического состава тока напряжения электрической сети. Срок окупаемости таких решений составляет от 3 до 6 лет при нормативном сроке службы оборудования 15 лет.

4. Предложенный алгоритм выбора конденсаторов и устройств компенсации неактивной мощности может быть использован в составе методики расчета электрических нагрузок и выбора силового электрооборудования при проектировании трансформаторных подстанций для промышленных объектов, инфраструктурных объектов, жилых и общественных зданий.

### Библиографические ссылки

1. Неактивная мощность в электроэнергетических системах / А. А. Шпота, Д. В. Орлов, Р. А. Набиуллин, А. А. Планков // Технические науки – от теории к практике. 2015. № 45. С. 65–71.
2. Расчет параметров и анализ работы пассивного фильтра гармоник / М. Н. Атаманов, Н. М. Дрей, А. Г. Зиганшин, Г. М. Михеев // Вестник Чувашского университета. 2020. № 1. С. 17–25.
3. Вагин Г. Я., Севостьянов А. А., Юртаев С. Н. Повышение качества электрической энергии и компенсация реактивной мощности на металлургических предприятиях с дуговыми печами // Главный энергетик. 2017. № 2. С. 43–48.
4. Савельев Н. В., Рожков В. В. Моделирование работы активного фильтра гармоник в электрической сети под нагрузкой с нелинейной вольт-амперной

характеристикой // Вестник Московского энергетического института. 2016. № 3. С. 41–49.

5. Фокеев А. Е., Сибгатуллин Б. И., Мартынов А. В. Конденсаторы для повышения коэффициента мощности напряжением до 1000 В // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2018. № 1-2. С. 58–64.

6. Фокеев А. Е., Ушаков Д. В. Анализ режимов работы косинусных самовосстанавливающихся пленочных конденсаторов // Энергетик. 2020. № 4. С. 16–22.

7. Булатенко М. А., Лозенко В. К. Методика выбора устройств компенсации реактивной мощности по критерию «минимальная стоимость совокупного владения» с учетом качества // Век качества. 2013. № 1. С. 66–68. ISSN: 2219-8210; eISSN: 2500-1841.

8. Выбор параметров конденсаторной батареи устройства компенсации реактивной мощности по экономическим критериям / Д. В. Ишутин, Е. Н. Малышев, Н. С. Сластихин, В. В. Рычков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 9. Ч. 1. С. 518–524.

9. Ли В. Н., Шнурова Н. К. К методике выбора оптимального потребления электрической энергии из тяговой сети // Электротехника. 2016. № 2. С. 42–44.

10. Коваленко Д. В. Определение резонансной частоты системы электроснабжения при изменении степени компенсации реактивной мощности и наличии высших гармоник // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 8. Ч. 1. С. 16–21

11. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.: ил.

### References

1. Shpota A.A., Orlov D.V., Nabiullin R.A., Plankov A.A. [Inactive power in electric power systems]. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike*, 2015, no. 45, pp. 65-71 (in Russ.). ISSN: 2308-5991/

2. Atamanov M.N., Drey N.M., Ziganshin A.G., Mikheev G.M. [Calculation of parameters and analysis of the passive harmonic filter]. *Vestnik Chuvashskogo*

*Universiteta*, 2020, no. 1, pp. 17-25 (in Russ.). ISSN: 1810-1909.

3. Vagin G.Ya., Sevostyanov A.A., Yurtaev S.N. [Enhancing quality of the electric energy and reactive power compensation in metallurgical companies with arc furnaces]. *Glavnyj energetik*, 2017, no. 2, pp. 43-48 (in Russ.). ISSN: 2074-7489.

4. Savelyev N.V., Rozhkov V.V. [Modeling of the active harmonic filter in mains with load with nonlinear current-voltage characteristics]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 2016, no. 3, pp. 41-49 (in Russ.).

5. Fokeev A.E., Subgatullin B.I., Martynov A.V. [Capacitors to increase the power factor up to 1000V]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2018, no. 1-2. ISSN: 2074-9635

6. Fokeev A.E., Ushakov. [Analysis of the operation modes of cosine self-healing film capacitors]. *Energetik*, no. 4, pp. 16-22 (in Russ.). ISSN: 0013-7278.

7. Bulatenko M.A., Lozenko V.K. [The methodology for choosing reactive power compensation devices according to the criterion of “minimum cost of total ownership” taking into account quality]. *Vek kachestva*, 2013, no. 1, pp. 66-68 (in Russ.). ISSN: 2219-8210; eISSN: 2500-1841.

8. Ishutinov D.V., Malyshev E.N., Slastihin N.S., Rychkov V.V. [Choice of parameters of the capacitor bank reactive power compensation devices by economic criteria]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 9, part 1, pp. 518-524 (in Russ.). ISSN: 2071-6168.

9. Li V.N., Shnurova N.K. [On the methodology for choosing the optimal consumption of electric energy from the traction network]. *Elektrotekhnik*, 2016, no. 2, pp. 42-44 (in Russ.). ISSN: 0013-5860.

10. Kovalenko D.V. [Determining the resonance frequency of the power supply system when changing of compensation of reactive power and higher harmonics]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2017, no. 8, part 1, pp. 16-21 (in Russ.). ISSN: 1996-3955.

11. Zhezhenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatij* [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 160 p. (in Russ.).

### Selecting Shunt Power Capacitors and Non-active Power Compensation Devices for Voltage 1000V

A.E. Fokeev, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

N.A. Vyatkin, Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*Factors affecting the choice of capacitors and non-active power compensation devices with a voltage up to 1000V are considered. The review of conceptual approaches to the selection of technical solutions for non-active power compensation, taking into account the electromagnetic environment in the electrical network is given.*

*The results of selecting the nominal voltage of capacitors for non-active power compensation devices are analyzed. The choice of capacitors and devices for compensation of non-active power was made for three typical objects characterized by the different harmonic composition of the electric network voltage and load current. It is established that to ensure the standard service life of inactive power compensation devices in the considered cases, the rated voltage of capacitors should be increased by 10-20% compared to conventional solutions of manufacturers. The payback period for such solutions is from 3 to 6 years, with a standard service life of 15 years. For objects with*

*a share of the total power of a nonlinear load of more than 50%, it is advisable to use active harmonic filters as devices for non-active power compensation.*

*An algorithm for selecting capacitors and non-active power compensation devices is proposed, taking into account the electromagnetic situation in the electrical network, which assumes the use of the following parameters: the coefficient of harmonic overload of the capacitor and the given annual costs.*

*The proposed algorithm for selecting inactive power compensation devices can be used as part of the methodology for calculating electrical loads and selecting electrical power equipment when designing transformer substations for industrial facilities, infrastructure facilities, residential and public buildings.*

**Keywords:** shunt power capacitors, nonlinear loads, non-active power, non-active power compensation devices

Получено 02.06.2020

#### Образец цитирования

Фокеев А. Е., Вяткин Н. А. Выбор конденсаторов и устройств компенсации неактивной мощности напряжением до 1000 В // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 3. С. 84–92. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-84-92.

#### For Citation

Fokeev A.E., Vyatkin N.A. [Selecting Shunt Power Capacitors and Non-active Power Compensation Devices for Voltage 1000V]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 84-92 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-84-92.