УДК 62

Каменнов Е.Ю.
магистрант 2 курса
кафедра промышленной электроники
Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина
(г. Рязань, Россия)

Научный руководитель:
Махмудов М.Н.
кандидат технических наук, доцент
кафедра промышленной электроники
Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина
(г. Рязань, Россия)

ВЫБОР КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЦЕХОВОЙ ПОДСТАНЦИИ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

Аннотация: *в статье рассмотрен выбор конденсаторных установок для цеховой трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ, от которой питаются установки гидроабразивной и плазменной резки. Определена требуемая мощность компенсирующих устройств, обеспечивающая коэффициент реактивной мощности не выше 0,4. Показано, что при ступенчатом регулировании резонансная частота контура «трансформатор — конденсаторная установка» смещается по всему диапазону характерных гармоник преобразователей и в отдельных режимах совпадает с 11-й и 17-й гармониками. Обоснован выбор установок с антирезонансными дросселями 7%, исключающих резонанс на высших гармониках.*

Ключевые слова: *компенсация реактивной мощности, конденсаторная установка, высшие гармоники, резонанс, антирезонансный дроссель, нелинейная нагрузка, цеховая подстанция.*

Компенсация реактивной мощности на промышленных предприятиях снижает потери электроэнергии в трансформаторах и линиях, разгружает их по току и позволяет выполнить требования сетевой организации к коэффициенту реактивной мощности. Для потребителей, присоединённых к сети 10 кВ, предельное значение tg φ составляет 0,4 [5]. Наиболее распространённое решение – автоматические конденсаторные установки на шинах 0,4 кВ цеховых подстанций со ступенчатым регулированием мощности [3, 4, 7].

В последние годы состав нагрузки цеховых подстанций заметно изменился. Привычные асинхронные двигатели всё чаще работают от частотных преобразователей, а в цехах появляются установки с инверторными источниками питания: станки плазменной и гидроабразивной резки, сварочные инверторы, индукционные нагреватели. Ток таких электроприёмников содержит высшие гармоники 5, 7, 11, 13-го и более высоких порядков [2]. Конденсаторы образуют с индуктивностью трансформатора параллельный колебательный контур, и если его резонансная частота окажется близка к частоте одной из гармоник, ток этой гармоники в контуре многократно усиливается. Следствием становятся перегрев и выход из строя конденсаторов, срабатывание защит и рост искажения напряжения.

Цель работы – показать на примере реальной цеховой подстанции, как при выборе конденсаторных установок учесть высшие гармоники, если гармонический состав тока электроприёмников заранее неизвестен и выполнить его измерение до проектирования нельзя.

Объект рассмотрения – двухтрансформаторная подстанция 10/0,4 кВ производственного предприятия в г. Коломне с трансформаторами ТМГ11-400/10 ($u_к$ = 4,5%, $I_{хх}$ = 2,1% [8]). Расчётная нагрузка на шинах 0,4 кВ составляет $P_р$ = 200,9 кВт, $Q_р$ = 135,1 квар, $S_р$ = 242,1 кВА, коэффициент мощности cos φ = 0,83. Значительную часть нагрузки создают две установки гидроабразивной резки мощностью по 50 кВт с частотно-регулируемым приводом насосов и две установки плазменной резки мощностью по 15 кВт.

Потери реактивной мощности в трансформаторах зависят от их загрузки:

$$\Delta Q_{\text{т}} = N \cdot \left(\frac{I_{\text{хх}}}{100} + \frac{u_{\text{к}}}{100} \cdot \beta^2\right) \cdot S_{\text{ном}} \text{ (1).}$$

где N – число трансформаторов, β – коэффициент загрузки, $S_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора. При β = 0,303 потери составляют 20,1 квар, и на стороне 10 кВ нагрузка равна P_{10} = 203,6 кВт, Q_{10} = 155,2 квар, tg φ = 0,762, что почти вдвое превышает предельное значение. Требуемая мощность компенсирующих устройств:

$$Q_{\text{ку}} = Q_{\text{р}} + \Delta Q_{\text{т}} - \text{tg}\varphi_{\text{пр}} \cdot \left(P_{\text{р}} + \Delta P_{\text{т}}\right) \text{ (2).}$$

где $\text{tg}\ \varphi_{пр}$ = 0,4 – предельное значение коэффициента реактивной мощности. Поскольку потери в трансформаторах после компенсации уменьшаются, расчёт выполнен последовательными приближениями, получено $Q_{ку}$ = 73 квар. Приняты две автоматические установки по 40 квар со ступенью регулирования 10 квар, по одной на каждую секцию шин 0,4 кВ. После компенсации полная нагрузка на шинах 0,4 кВ снижается с 242,1 до 208,3 кВА, cos φ повышается до 0,964, а tg φ на стороне 10 кВ – до 0,365, что удовлетворяет требованию [5].

Далее необходимо выбрать исполнение установок. Точный расчёт коэффициента искажения синусоидальности напряжения требует знания спектра тока каждого преобразователя, который определяется измерениями или по паспортным данным. На этапе проектирования таких данных обычно нет, поэтому исполнение выбирается по двум оценочным показателям: доле нелинейной нагрузки в мощности трансформатора и положению резонансной частоты.

Суммарная мощность нелинейных электроприёмников, питающихся от одного трансформатора,

$$G_h = \sum n \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{\cos \varphi} \text{ (3).}$$

для рассматриваемой подстанции составляет $G_h = 2 \cdot 50/0{,}85 + 2 \cdot 15/0{,}8 = 155{,}1$ кВА, то есть 39% мощности трансформатора. Согласно рекомендациям [9] для трансформаторов мощностью до 2 МВА при отношении $G_h/S_{\text{ном}}$ до 10% применяются установки стандартного исполнения, от 10 до 20% – с конденсаторами повышенного напряжения, от 20 до 50% – с антирезонансными дросселями, свыше 50% – с фильтрами высших гармоник. Рассматриваемый случай относится к третьей группе.

Второй показатель – порядок гармоники, на которой наступает резонанс. Мощность короткого замыкания на шинах 0,4 кВ без учёта сопротивления сети 10 кВ:

$$S_{\text{к}} \approx \frac{S_{\text{ном}}}{u_{\text{к}}/100} \text{ (4).}$$

равна $400/0{,}045 = 8889$ кВА. Порядок резонансной гармоники [2, 9]:

$$n_{\text{рез}} = \sqrt{\frac{S_{\text{к}}}{Q_{\text{к}}}} \text{ (5).}$$

где $Q_{\text{к}}$ – мощность включённых конденсаторов. При автоматическом регулировании число включённых ступеней меняется, и вместе с ним смещается резонансная частота. Результаты расчёта для всех режимов приведены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1. Резонансные частоты контура «трансформатор – конденсаторная установка».

Мощность конденсаторов, квар	**Режим**	**$n_{рез}$**	**$f_{рез}$, Гц**	**Ближайшая гармоника**
10	1 ступень	29,8	1491	25-я
20	2 ступени	21,1	1054	23-я
30	3 ступени	17,2	861	17-я
40	4 ступени	14,9	745	13-я
80	обе установки от одного трансформатора	10,5	527	11-я

Из таблицы 1 видно, что при изменении числа ступеней порядок резонансной гармоники меняется от 10,5 до 29,8, то есть резонансная частота перемещается по всему диапазону характерных гармоник преобразователей. При трёх включённых ступенях она практически совпадает с 17-й гармоникой, а при работе обеих установок от одного трансформатора (в аварийном режиме или в режиме выходных дней, когда второй трансформатор отключён) – с 11-й. Выбрать такое число ступеней, при котором резонанс заведомо не наступит, невозможно: регулятор включает ступени в зависимости от нагрузки.

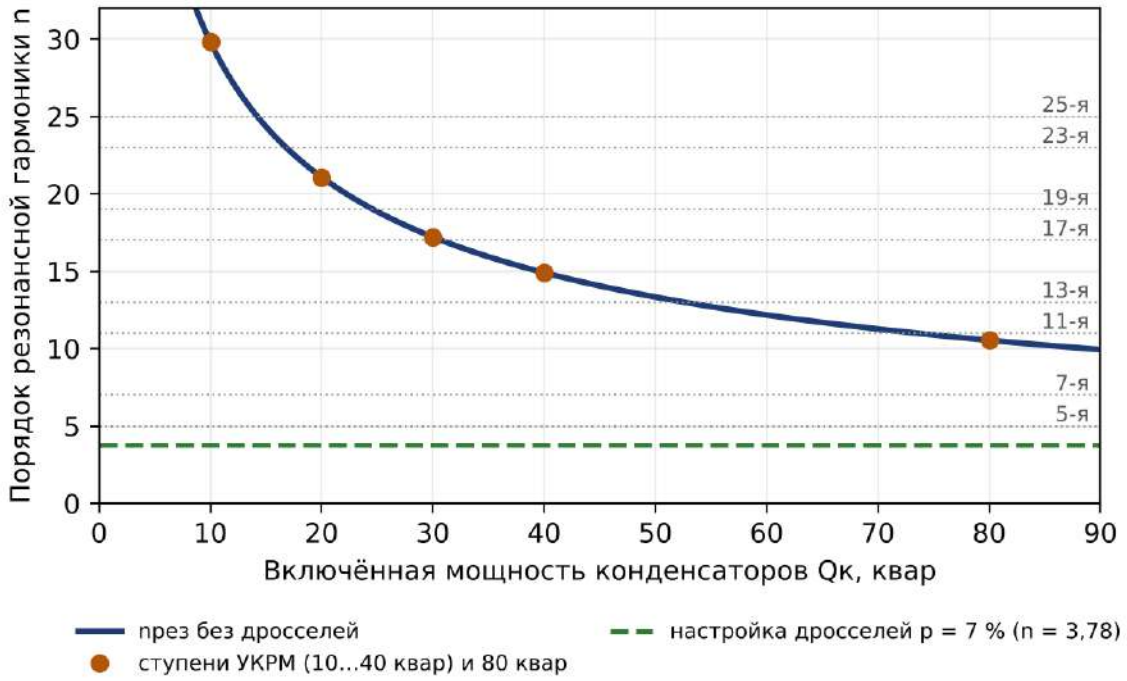


Рисунок 1. Порядок резонансной гармоники в зависимости от мощности включённых конденсаторов.

Поэтому приняты конденсаторные установки с антирезонансными дросселями, включёнными последовательно с каждой ступенью. При относительном сопротивлении дросселя p = 7% частота настройки контура «дроссель – конденсатор»:

$$f_{\text{н}} = \frac{50}{\sqrt{p/100}} = \frac{50}{\sqrt{0{,}07}} = 189 \text{ Гц (6).}$$

что ниже частоты 5-й гармоники (250 Гц). На частотах всех высших гармоник ступень установки имеет индуктивный характер, и резонанс с индуктивностью трансформатора становится невозможным при любом числе включённых ступеней. На частоте 50 Гц установка по-прежнему выдаёт требуемую реактивную мощность. Дополнительно дроссель частично ограничивает гармонические токи, протекающие через конденсаторы.

Последовательно включённый дроссель повышает напряжение на конденсаторах:

$$U_C = \frac{U}{1 - p/100} \quad (7).$$

При p = 7% напряжение возрастает в 1,075 раза, то есть до 430 В при номинальном напряжении сети 400 В. Поэтому в установках с дросселями применяются конденсаторы на номинальное напряжение не ниже 440 В, а номинальная мощность ступеней подбирается с учётом этого повышения. Требования к размещению и защите конденсаторных установок определяются главой 5.6 ПУЭ [6].

Норма коэффициента искажения синусоидальности напряжения в сети 0,38 кВ по ГОСТ 32144-2013 [1] составляет 8%. После ввода подстанции в работу целесообразно выполнить измерения показателей качества электроэнергии на шинах 0,4 кВ анализатором класса А. Если коэффициент искажения превысит допустимое значение, на секции, к которой присоединены установки резки, может быть дополнительно установлен активный фильтр гармоник. Установки с дросселями при этом заменять не потребуется.

Таким образом, при выборе конденсаторных установок для цеховой подстанции с заметной долей нелинейной нагрузки недостаточно определить их мощность. Оценка доли нелинейной нагрузки и расчёт резонансных частот для всех ступеней регулирования не требуют данных о спектре тока и выполняются по каталожным данным трансформатора. Для рассмотренной подстанции доля нелинейной нагрузки составила 39%, а резонансная частота в отдельных режимах совпадала с 11-й и 17-й гармониками. Применение установок с антирезонансными дросселями 7% исключает резонанс во всех режимах и обеспечивает требуемый коэффициент реактивной мощности 0,365 при предельном 0,4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014
2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
3. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов: учебное пособие. М.: Академия, 2004
4. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для вузов. 2-е изд. М.: Интермет Инжиниринг, 2006
5. О Порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии: приказ Минэнерго России от 23.06.2015 № 380
6. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2013
7. Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю.Г. Барыбина, Л.Е. Федорова, М.Г. Зименкова, А.Г. Смирнова. М.: Энергоатомиздат, 1990
8. Трансформаторы масляные герметичные классов напряжения до 35 кВ. Серия ТМГ11 [Электронный ресурс] // ОАО «Минский электротехнический завод имени В.И. Козлова». URL: https://metz.by/wp-content/uploads/2025/06/TMG11.pdf (дата обращения: 27.10.2026)
9. Electrical Installation Guide. According to IEC International Standards [Электронный ресурс] / Schneider Electric. 2018. Chapter L: Power factor correction, Chapter M: Harmonic management. URL: https://www.electrical-installation.org (дата обращения: 27.10.2026)

Kamennov E.Yu.
master's degree student of 2nd year
Department of Industrial Electronics
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin
(Ryazan, Russia)

Scientific advisor:
Makhmudov M.N.
PhD in Engineering, Associate Professor
Department of Industrial Electronics
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin
(Ryazan, Russia)

SELECTION OF CAPACITOR BANKS FOR A WORKSHOP SUBSTATION WITH NONLINEAR LOADS

Abstract: *this article examines the selection of capacitor banks for a 10/0.4 kV workshop transformer substation supplying abrasive waterjet and plasma cutting equipment. Required compensation capacity is determined to maintain a reactive power factor of no more than 0.4. Stepwise adjustment is shown to shift the resonant frequency of the «transformer–capacitor bank» circuit across the full range of characteristic converter harmonics, under certain operating conditions, it coincides with the 11th and 17th harmonics. The selection of capacitor banks equipped with 7% detuning reactors is justified as a means of preventing resonance at higher harmonics.*

Keywords: *reactive power compensation, capacitor bank, higher harmonics, resonance, detuning reactor, nonlinear load, workshop substation.*