

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СТЕПЕНИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И НАЛИЧИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

Коваленко Д.В.

*ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», Омск,  
e-mail: Dmitrii\_Kovalenko92@mail.ru*

В статье были рассмотрены негативные последствия от влияния высших гармоник и резонанса токов на частотах, близких к частотам высших гармоник (ВГ) в системах электроснабжения (СЭС). Кроме того, в статье исследовалась СЭС, питающая электроприемники с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Роль нелинейной нагрузки в СЭС выполнял частотно-регулируемый электропривод, работающий с низким коэффициентом активной мощности ( $\cos\phi$ ). Для повышения  $\cos\phi$  в сети использовалась регулируемая батарея статических конденсаторов (БСК). В работе представлен алгоритм, вычисляющий все возможные резонансные частоты в зависимости от степени компенсации реактивной мощности (при переключении ступеней БСК) при работе СЭС в режиме резонанса токов. Произведен расчет частот резонанса как при учете активного сопротивления элементов СЭС, так и без его учета.

**Ключевые слова:** система электроснабжения, высшие гармоники, резонанс токов, резонансная частота, батарея статических конденсаторов, качество электрической энергии

## DETERMINING THE RESONANCE FREQUENCY OF THE POWER SUPPLY SYSTEM WHEN CHANGING THE DEGREE OF COMPENSATION OF REACTIVE POWER AND HIGHER HARMONICS

Kovalenko D.V.

*Omsk State Technical University, Omsk, e-mail: Dmitrii\_Kovalenko92@mail.ru*

In the article negative effects from the influence of higher harmonics and resonance currents at frequencies close to the frequencies of higher harmonics in power supply systems were considered. In addition, the article examined, which supplies electric receivers with a nonlinear current-voltage characteristic. The role of the nonlinear load in the power supply system was performed by a frequency-regulated electric drive operating with a low active power factor ( $\cos\phi$ ). To increase the  $\cos\phi$  in the network, we used an adjustable capacitor bank. In this paper, an algorithm is presented that calculates all possible resonance frequencies depending on the degree of reactive power compensation (when switching the capacitor bank) during the operation of the power supply system in the mode of current resonance. The calculation of the resonance frequencies is carried out both with regard to the active resistance of the elements of the power supply system, and without taking it into account.

**Keywords:** power supply system, higher harmonics, current resonance, resonance frequency, capacitor bank, the quality of electric power

Нелинейная нагрузка является источником высших гармоник (ВГ) в СЭС при условии синусоидальности напряжения источника питания. ВГ приводят к различным негативным последствиям для элементов СЭС: чрезмерный нагрев проводов воздушных линий электропередачи (ЛЭП), ускоренное старение внутренней изоляции электрических машин и кабельных ЛЭП (включая чрезмерный нагрев и выход из строя нулевых жил кабелей на класс напряжения менее 1 кВ). Они способны вызвать значительную токовую перегрузку (перегрев) БСК, которая приведет к аварийным ситуациям (начиная с разрушения изоляции, вслучивания банок и заканчивая взрывом конденсаторной батареи). В стандартах ГОСТ ИЕС 60931-1-2013 и ГОСТ ИЕС 61921-2013 [1, 2] говорится, что конденсаторные батареи не допускаются эксплуатировать при токовой перегрузке, превышающей номинальный ток установки в 1,3 раза. Рассмотрению этих и многих аспектов негативного влияния ВГ как на

различные элементы, так и на всю СЭС целиком посвящено достаточно большое количество работ, например [3–5]. Учитывая эти аспекты, а также постоянный рост электроприёмников, имеющих нелинейную вольт-амперную характеристику, можно сказать, что актуальность проблемы влияния ВГ на СЭС не вызывает сомнений.

Согласно действующему в России стандарту на качество электроэнергии ГОСТ 32144-2013 [6] воздействие нелинейной нагрузки на СЭС характеризуется изменением величины и формы питающего напряжения (отклонением напряжения от идеальной синусоиды). Для их оценки используются следующие показатели качества электрической энергии:

– коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения (определяется отдельно для каждой гармоники)

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100\% \text{ при } n \leq 40;$$

– общее содержание высших гармоник напряжения в СЭС

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} \cdot 100\%,$$

где  $n$  – номер гармоники,  
 $U_n$  – действующее значение напряжения  $n$ -й гармоники,  
 $U_1$  – действующее значение напряжения первой (основной) гармоники (при 50 Гц),  
 $K_{U(n)}$  – коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей напряжения,  
 $K_U$  – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения.

**Теория и моделирование**

Резонансные явления, так же как и ВГ, негативно сказываются на работе СЭС, так как они способны спровоцировать аварию, которая является следствием чрезмерного нагрева различных элементов сети (трансформаторов, ЛЭП, БСК) или вызвать пробой изоляции при возникновении коммутационных перенапряжений. Анализ резонансных режимов, возникающих на ВГ сети и определению частот, на которых возможен резонанс токов, посвящены работы [7–10].

Резонанс токов – это режим работы СЭС с параллельным соединением индуктивных и емкостных элементов. Цепи, в которых может возникнуть резонансный режим, называются резонансными контурами. Он характеризуется нулевым значением суммарной реактивной проводимости резонансного контура [11]. В качестве примера следует отметить, что резонанс токов способен возникнуть при подключении на одну секцию шин частотно-регулируемого электропривода (нагрузку, имеющую активно-индуктивный характер потребляемого тока) и БСК, имеющую емкостный характер тока.

Следует отметить, что резонансные условия практически не выполняются на основной частоте сети, однако на частотах, близких к частотам ВГ могут легко выполняться. Авторы работы [12] отмечают, что в большинстве случаев электротехнический персонал, обслуживающий сети не имеет четкого представления об условиях возникновения резонансов на ВГ при изменении конфигурации СЭС, поэтому при определенном сочетании включенных ячеек на подстанции возможен выход из строя силового электропривода по причине возникновения резонанса токов на частотах ВГ сети.

Рассмотрим СЭС (см. рис. 1). Схема замещения такой СЭС на основной ча-

стоте представлена на рис. 2, на ВГ – на рис. 3. В качестве нагрузки, являющейся источником ВГ в сети, рассмотрим частотно-регулируемый электропривод, который генерирует широкий спектр гармоник в СЭС. Также, к шинам 0,4 кВ подключена БСК, предназначенная для компенсации реактивной мощности и повышения коэффициента активной мощности нагрузки ( $\cos\varphi$ ) в сети.

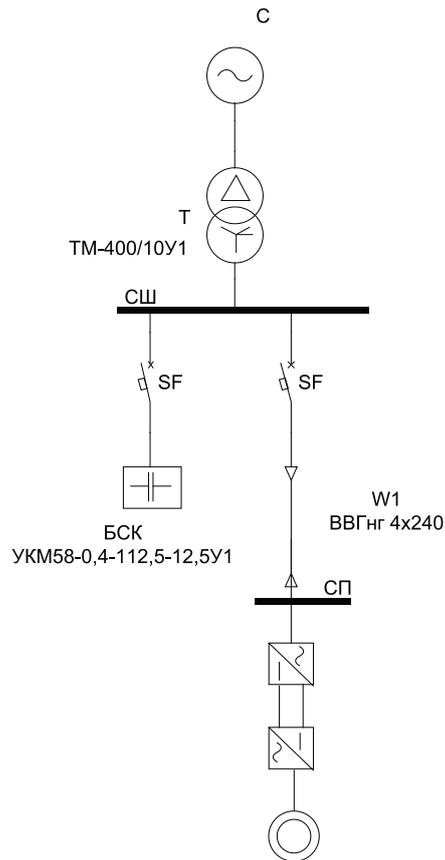


Рис. 1. Схема СЭС

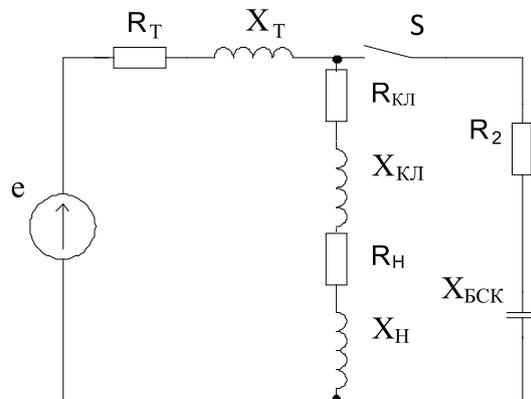


Рис. 2. Схема замещения СЭС на основной гармонике сети

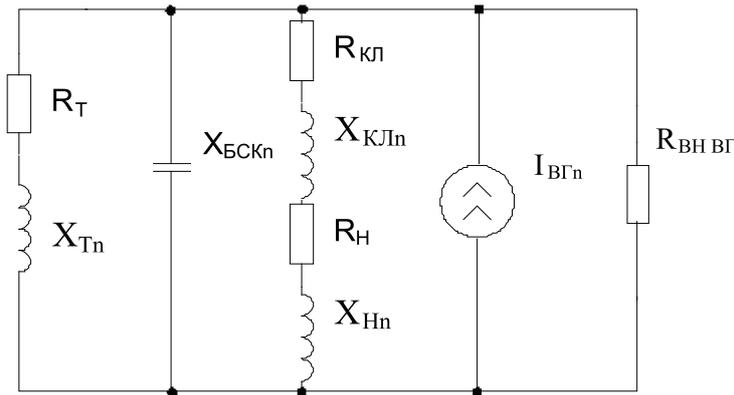


Рис. 3. Схема замещения резонансного контура СЭС (на ВГ)

### Предлагаемый алгоритм. Численный эксперимент

Сопротивление трансформатора с ростом частоты увеличивается и в комплексном виде может быть представлено как

$$Z_{Tn} = R_T + jnX_T,$$

где  $R_T$  – активное сопротивление трансформатора,  
 $X_T$  – индуктивное сопротивление трансформатора на основной частоте,  
 $n$  – номер гармоники.

Аналогично можно записать и сопротивление кабельной линии в комплексном виде:

$$Z_{кЛn} = R_{кЛ} + jnX_{кЛ},$$

где  $R_{кЛ} = r_0L$ ,  
 $X_{кЛ} = x_0L$ ,  
 $r_0, x_0$  – активное и индуктивное сопротивление кабельной ЛЭП на километр длины, Ом/км,  
 $L$  – длина кабеля, км

Сопротивление БСК, наоборот, с ростом частоты уменьшается, т.е. имеет место следующее соотношение:

$$Z_{БСКn} = -j \frac{1}{n\omega C_{БСКn}},$$

где  $C_{БСКn}$  – емкость БСК на выбранной ступени,  
 $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота,  
 $f$  – частота питающей сети (50 Гц).

Емкость БСК ( $C_{БСКn}$ ) связана с величиной вырабатываемой реактивной мощности конденсаторной батареи ( $Q_{БСК}$ ) следующим образом:

$$C_{БСКn} = \frac{Q_{БСК}}{\omega U^2},$$

где  $U$  – напряжение сети.

По определению резонанса мы имеем равенство проводимостей параллельных

ветвей сети, т.е. для нашего случая мы можем записать:

$$b_L = b_C.$$

Условия возникновения резонанса токов в рассматриваемой СЭС принимают следующий вид:

$$\frac{\omega L_{\Sigma n}}{R_1^2 + \omega^2 L_{\Sigma n}^2} = \frac{1/\omega C_{БСКn}}{R_2^2 + \frac{1}{\omega^2 C_{БСКn}^2}},$$

где  $L_{\Sigma n}$  – суммарная индуктивность СЭС на частоте  $n$ -й гармоники,  
 $R_1$  – суммарное активное сопротивление кабельной линии и нагрузки,  
 $R_2$  – активное сопротивление БСК.

Если в последнем выражении пренебречь активным сопротивлением конденсаторной батареи ( $R_2$ ), тогда условие резонанса примет следующий вид:

$$\frac{\omega L_{\Sigma n}}{R_1^2 + \omega^2 L_{\Sigma n}^2} = \omega C_{БСКn},$$

где  $\omega$  – резонансная частота, рад.

Выразив из предыдущего выражения  $\omega$ , получим формулу для определения резонансной частоты:

$$\omega = \sqrt{\frac{L_{\Sigma n} - C_{БСКn} \cdot R_{\Sigma}^2}{C_{БСКn} \cdot L_{\Sigma n}^2}},$$

где  $R_{\Sigma}$  – суммарное активное сопротивление СЭС.

Если пренебречь активным сопротивлением СЭС, тогда условие резонанса существенно упрощается и примет следующий вид:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{C_{БСКn} \cdot L_{\Sigma n}}}.$$

Мы получили резонансную частоту в радианах. Если мы хотим получить частоту в герцах, тогда можно воспользоваться следующей формулой:

$$f = \frac{\omega}{2\pi}.$$

Рассмотрим на простом примере возможность возникновения резонанса. В СЭС, изображенной на рис. 1, может возникнуть резонанс токов, так как одновременно с решением проблемы компенсации реактивной мощности у нас образуется параллельный резонансный контур, в который входит нелинейная нагрузка с одной стороны, и БСК – с другой. В табл. 1 приведены параметры элементов СЭС необходимых для расчета всех возможных резонансных частот.

В рассматриваемой работе нелинейная нагрузка рассматривается как стационарно включенная, а изменение режима работы СЭС происходит посредством изменением степени компенсации реактивной мощ-

ности, а именно переключением ступеней БСК (рис. 4).

Кроме того, на этом же рисунке видно, что одновременно с увеличением степени компенсации уменьшается величина потребляемой реактивной мощности из системы. Рассмотрение именно такого режима работы необходимо для определения всех возможных резонансных частот для данной схемы.

Отметим основные допущения, которые были применены автором статьи при определении резонансных частот.

1. БСК была представлена емкостным сопротивлением (активное сопротивление не учитывалось ввиду его малости).

2. Частотно-регулируемый электропривод (частотный преобразователь) представлен источником тока с внутренним сопротивлением.

3. КЛЭП представлена в виде комплексного RL-сопротивления (без учета зарядной мощности).

Таблица 1

Паспортные данные трансформатора и кабельной линии

Трансформатор ТМ-400/10 У1								
S <sub>ном</sub> , кВА	P <sub>хх</sub> , кВт	P <sub>кз</sub> , кВт	U <sub>кз</sub> , %	I <sub>хх</sub> , %	R <sub>p</sub> , мОм	X <sub>тр</sub> , мОм	U <sub>вн</sub> , кВ	U <sub>нн</sub> , кВ
400	0,95	5,5	4,5	2,1	5,5	17,1	10,5	0,4
Кабельная линия ВВГнг 4х240								
r <sub>0</sub> , Ом/км			x <sub>0</sub> , Ом/км			I <sub>доп</sub> , А		
0,077			0,077			421		

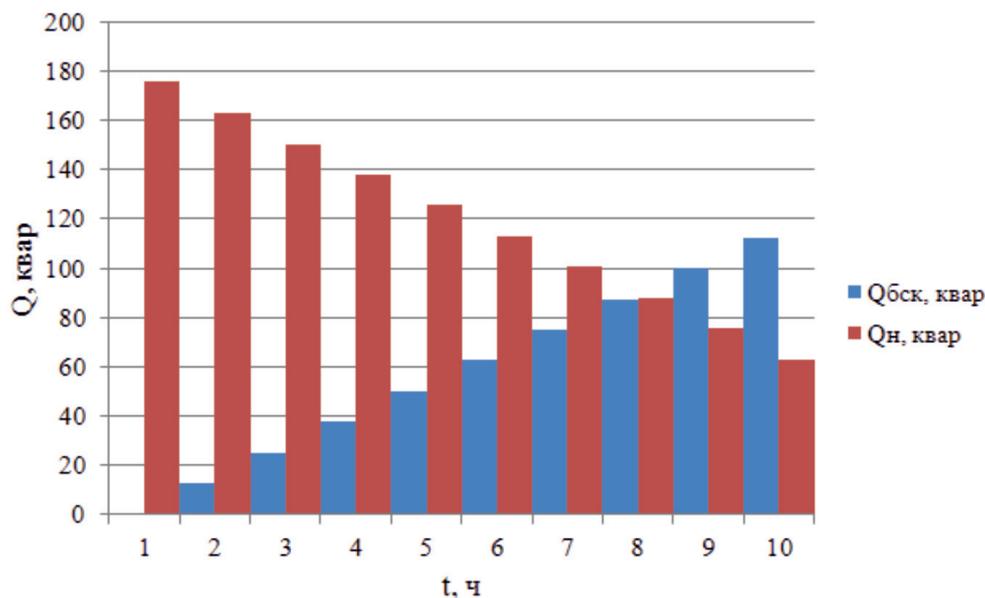


Рис. 4. График реактивной мощности нагрузки и ступеней БСК (за рабочую смену)

Таблица 2

Значения коэффициента активной мощности и резонансной частоты с учетом ( $f_{1рез}$ ) и без учета ( $f_{2рез}$ ) активной составляющей сопротивления элементов СЭС

$Q_{БСК}$ , квар	$\cos \varphi$	$f_{1рез}$ , Гц	$f_{2рез}$ , Гц	$\varepsilon$ , %
0	0,76	—	—	—
12,5	0,783	1312,713	1312,818	0,008
25	0,807	928,15	928,299	0,016
37,5	0,83	757,767	757,949	0,024
50	0,853	656,19	656,401	0,032
62,5	0,876	586,866	587,101	0,04
75	0,898	535,688	535,946	0,048
87,5	0,919	495,908	496,187	0,056
100	0,939	463,84	464,137	0,064
112,5	0,956	437,277	437,593	0,072

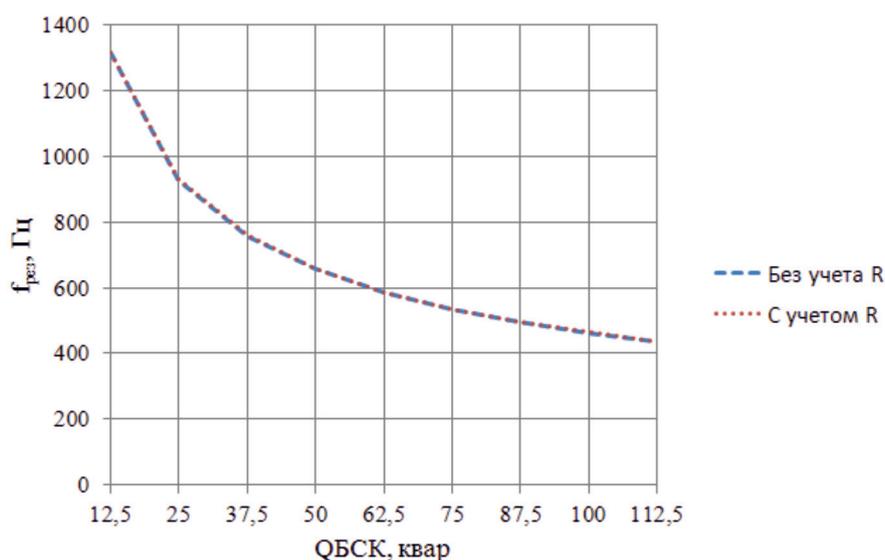


Рис. 5. График зависимости резонансной частоты от степени компенсации реактивной мощности

Предлагаемый алгоритм вычисляет: коэффициенты активной мощности нагрузки СЭС (как перед проведением компенсации реактивной мощности, так и после), коэффициенты загрузки питающего трансформатора (до и после компенсации), а также определяет резонансную частоту для каждого из режимов работы СЭС. Стоит отметить, что авторами производилось сравнение полученных резонансных частот, определенных как с учетом активных составляющих сопротивления системы, так и без их учета, что нашло отражение в табл. 2.

Расчет показал, что погрешность определения частоты резонанса не превышает 0,1%, если мы пренебрегаем активным сопротивлением резонансного контура. На

рис. 5 приведены графики, наглядно показывающие нам, что погрешность определения резонансной частоты без учета активной составляющей сопротивления резонансного контура будет незначительной (оба графика совпадают). То есть при проведении практических расчетов мы вправе пренебречь активной составляющей сопротивления контура.

### Выводы

На основании расчетов были определены все возможные частоты, на которых будет выполняться условие резонанса токов. Также, расчетным путем была определена погрешность определения резонансной частоты при пренебрежении активной со-

ставляющей проводимости контура, которая составила менее 0,1%. Выявление резонансных частот необходимо для подбора и настройки фильтров, предназначенных для снижения уровня токов ВГ в сети (для фильтрации ВГ с частотами, близкими к резонансным). Кроме того, определение возможных частот резонанса необходимо для оценки целесообразности применения фильтров гармоник.

#### Список литературы

1. ГОСТ ИЕС 60931-1-2013. Конденсаторы шунтирующие силовые несамовосстанавливающегося типа для систем переменного тока на номинальное напряжение до 1000 В включительно. Часть 1. Общие положения. Рабочие характеристики, испытания и номинальные параметры. Требования техники безопасности. Руководство по установке и эксплуатации. – Введ. 2015-01-01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 27 с.
2. ГОСТ ИЕС 61921-2013. Конденсаторы силовые. Конденсаторные батареи для коррекции коэффициента мощности при низком напряжении. – Введ. 2015-01-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000 – 331 с.
4. Шидловский А.К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А.К. Шидловский, А.Ф. Жаркин. – Киев: Наукова Думка, 2005. – 211 с.
5. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
6. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014-07-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
7. Павлов И.В. Изучение электромагнитной совместимости конденсаторных установок в системе электроснабжения ОАО «Ачинский НПЗ ВНК» при наличии высших гармоник / И.В. Павлов, О.А. Дружинин, Д.А. Скакунов [и др.]. // Технологии нефти и газа. – 2011. – № 1. – С. 41–43.
8. Коверникова Л.И. Один из подходов к поиску резонансных режимов на высших гармониках / Л.И. Коверникова, С.С. Смирнов // Электричество. – 2005. – № 10. – С. 62–69.
9. Huang Z. A practical harmonic resonance guideline for capacitor applications / Z. Huang, W. Xu, V. R. Dinavahi // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2003. – Vol. 18, Issue 4. – P. 1382–1387.
10. IEEE Std. 519-2014. IEEE Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. – Approved 2014-03-27. – IEEE, 2014. – 29 p.
11. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник / Л.А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с.
12. Николаев А.А. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храшин [и др.]. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2016. – Т. 14, № 4. – С. 96–105.