

**РАСЧЕТ РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ
ПРИ НАЛИЧИИ ИСТОЧНИКОВ ВЫСШИХ ГАРМОНИК**

Ощепков Владимир Александрович
кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Омский государственный
технический университет»,
Омск, Россия
E-mail: energoowa@mail.ru

Логунова Яна Юрьевна
ведущий специалист отдела планирования
учета и реализации энергоресурсов,
ООО «РН-Юганскнефтегаз»,
Нефтеюганск, Россия
E-mail: jana_logunova@mail.ru

Предмет исследования: резонансные режимы в электрических сетях 35/6/0,4 кВ нефтедобывающих предприятий.

Цель исследования: расчет частот, на которых возможно возникновение резонансных режимов, определение кратности перенапряжений в узлах электрической сети.

Объект исследования: распределительные электрические сети 35/6 кВ, группы нелинейных электроприемников 0,4 кВ, являющихся источниками гармонических искажений.

Основные результаты исследования: представлена методика расчета резонансных режимов при наличии источников высших гармоник. Определены частоты, на которых возможно возникновение резонансов, для каждого класса напряжения определены кратности возникающих перенапряжений. Проведены физические измерения уровней несинусоидальности с применением сертифицированного оборудования. На основании сравнения результатов расчета и фактического уровня высших гармоник в электрической сети, принимается технически обоснованное решение по установке фильтрокомпенсирующих устройств для подавления высших гармоник и недопущения аварийной ситуации.

Ключевые слова: резонанс токов, высшие гармоники, качество электроэнергии, батареи статических конденсаторов.

**CALCULATION OF RESONANT MODES IN ELECTRIC NETWORKS
IN CASE OF SOURCES OF HIGHER HARMONICS**

Vladimir A. Oshchepkov
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Omsk State Technical University
Omsk, Russia
E-mail: energoowa@mail.ru

Jana Yu. Logunova

Leading Specialist of the Department of
Planning, Accounting and Sales of Energy Resources
Limited Liability Company "RN-Yuganskneftegaz"
Nefteyugansk, Russia
E-mail: jana_logunova@mail.ru

Subject of research: resonant modes in electrical networks 35/6/0.4 kV of oil producing enterprises.

Purpose of research: calculation of frequencies at which the occurrence of resonant modes is possible, determination of the multiplicity of overvoltages in the nodes of the electrical network.

Object of research: distribution electrical networks 35/6 kV, groups of non-linear electrical receivers 0.4 kV, which are sources of harmonic distortion.

Main results of research: a method for calculating resonant modes in the presence of sources of higher harmonics is presented. The frequencies at which the occurrence of resonances is possible are determined; for each voltage class, the multiplicity of arising overvoltages is determined. Physical measurements of non-sinusoidality levels were carried out using certified equipment. Based on a comparison of the calculation results and the actual level of higher harmonics in the electrical network, a technically sound decision is made to install filter-compensating devices to suppress higher harmonics and prevent an emergency.

Keywords: current resonance, higher harmonics, power quality, static capacitor banks.

Введение

Качество электрической энергии влияет на размещение БСК в узлах систем электроснабжения. При наличии в системах электроснабжения крупных нелинейных нагрузок может произойти перегрузка конденсаторных батарей в присутствии токов высших гармоник питающей сети [6].

В частности, при наличии широкого спектра высших гармоник в кривой питающего напряжения может возникнуть режим резонанса на частотах, близких к частотам одной или нескольких высших гармоник, содержащихся в питающей сети. Возникающие резонансные режимы производят эффект усиления влияния высших гармоник на работу электрооборудования в частности, на БСК, усугубляя их перегрузку токами гармоник [5, 7]. В конечном счете, такая токовая перегрузка отрицательно сказывается на сроках эксплуатации конденсаторов, что приводит к перегреву и преждевременному выходу из строя конденсаторных батарей.

В работе [1] предложена и апробирована на практике авторская методика по определению резонансных режимов в узлах сети и порядков высших гармоник, на которых этот режим может возникнуть.

Авторы работы [4] провели исследование, доказавшее, что причиной периодических отключений и перегрузок БСК в системе электроснабжения ОАО «Ачинский НПЗ ВНК» было возникновение режима резонанса в контуре «БСК–понижающие трансформаторы 6/0,4 кВ».

Резонансные режимы могут возникнуть при изменении конфигурации СЭС, подключении (отключении) БСК, линий электропередачи, изменения нагрузки. Резонансные режимы могут существовать не только на высших гармоник, рекомендуемых для учета согласно ГОСТ 32144-2013, но и на частотах высокого порядка ($n > 40$). В работе [2] авторами было проведено исследование, которое показало существование резонансных на частотах выше 40-й гармоники.

Результаты и обсуждение

Произведем расчет резонансных режимов в электрической сети 110/35/6 кВ, питающей объекты нефтедобычи в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре. Схема исследуемой сети представлена на рисунке 1.

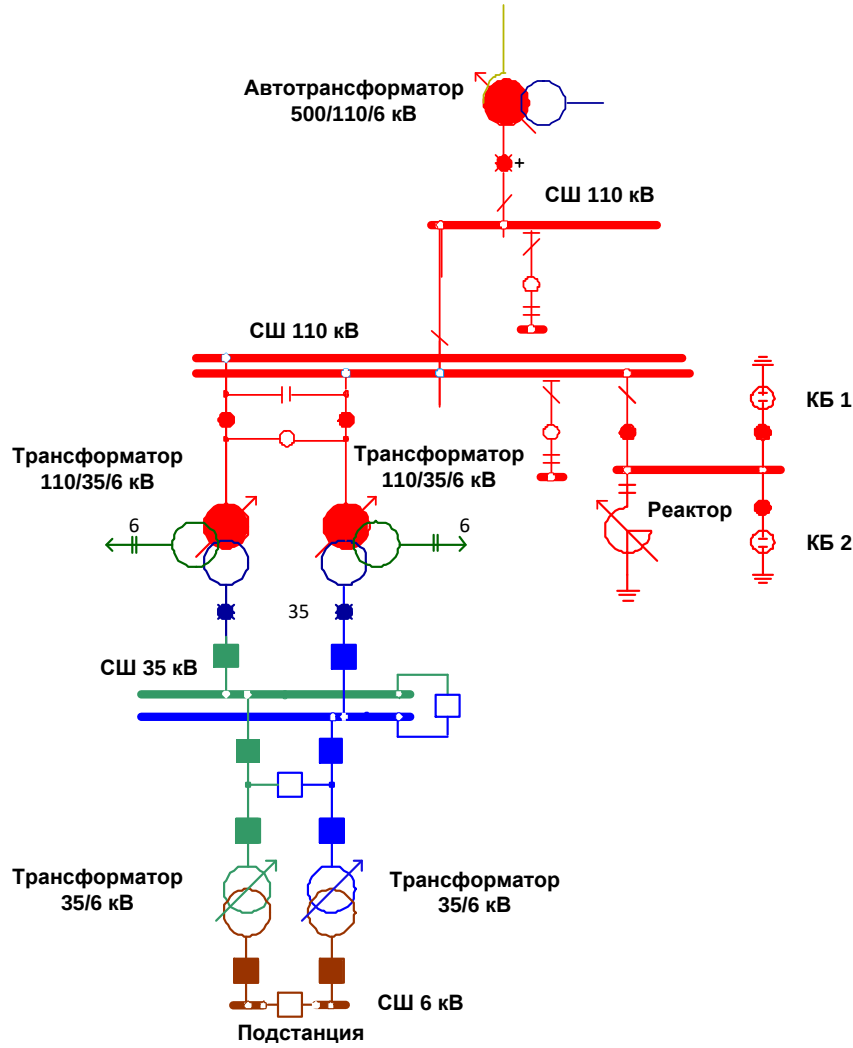


Рисунок 1 – Схема исследуемой электрической сети

На исследуемом объекте к шинам 0,4 кВ подключена нагрузка, питаемая через преобразователи напряжения. Для оценки возможности существования резонансных режимов (резонанса токов) в исследуемой системе на основании имеющейся схемы электрической сети составим схему замещения. Схема замещения исследуемой электрической сети приведена на рисунке 2.

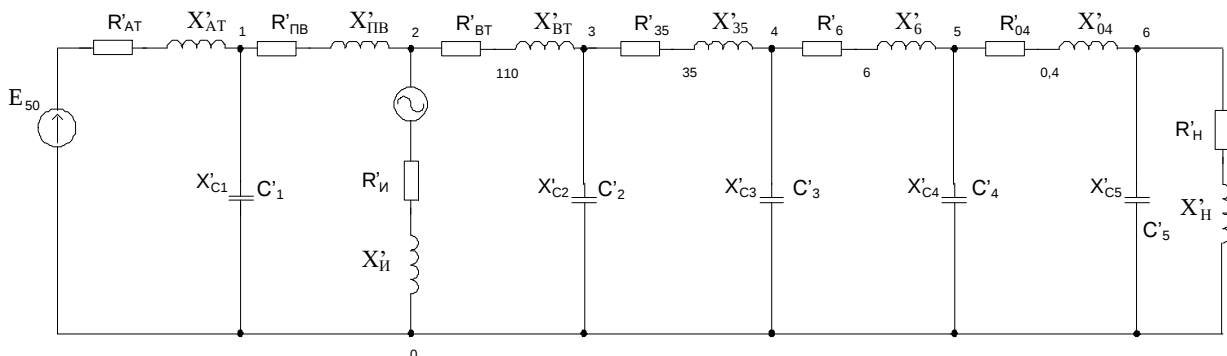


Рисунок 2 – Схема замещения участка электрической сети

На основании полученной схемы замещения, параметров трансформаторов, линий электропередачи и нагрузок составим уравнение в операторной форме для расчета режима по методу узловых потенциалов. Перед выполнением процедуры свертки схемы замещения представим реактивные сопротивления (индуктивные и емкостные) в операторной форме.

Индуктивное сопротивление в операторной форме имеет следующий вид:

$$X_L(p) = pL, \quad (1)$$

емкостное сопротивление выражается формулой:

$$X_C(p) = \frac{1}{pC}. \quad (2)$$

Далее необходимо произвести операцию свертки правой части схемы замещения относительно узлов «2» и «0». Рассмотрим в качестве примера первый этап преобразования схемы замещения. Параллельно нагрузке 0,4 кВ (представлена активно-индуктивной ветвью схемы замещения – R_n, X_n) подключена батарея статических конденсаторов, предназначенная для компенсации реактивной мощности (представлена емкостным сопротивлением X_{C5}). Результирующее сопротивление этого участка сети по правилу параллельного соединения элементов в операторной форме будет равно:

$$Z_6 = \frac{\frac{1}{pC_5} (R_f + pL_f)}{\frac{1}{pC_5} + R_f + pL_f} = \frac{R_f + pL_f}{1 + pC_5 R_f + p^2 C_5 L_f} \quad (3)$$

Дальнейшие действия, направленные на преобразование схемы замещения электрической сети, будут выполняться аналогично с применением правил преобразования последовательно и параллельно соединенных ветвей.

В результате преобразования правая часть схемы замещения будет представлять собой одно эквивалентное сопротивление ($Z_{ЭКВ}$) в операторной форме. Левая часть схемы замещения содержит следующие элементы: активное ($R_{АТ}$) и индуктивное ($X_{АТ}$) сопротивления автотрансформатора, установленного на подстанции 1 (ПС 1), активное ($R_{ПВ}$), индуктивное ($X_{ПВ}$) сопротивления и емкость (C_1) ЛЭП, связывающей ПС 1 и секции шин (СШ) распределительного пункта (РП), активное ($R_{И}$) и индуктивное ($X_{И}$) сопротивления источника высших гармоник и источника питания (E_{50}). Полученная схема замещения представлена на рисунке 3, а параметры её элементов – в таблице 1.

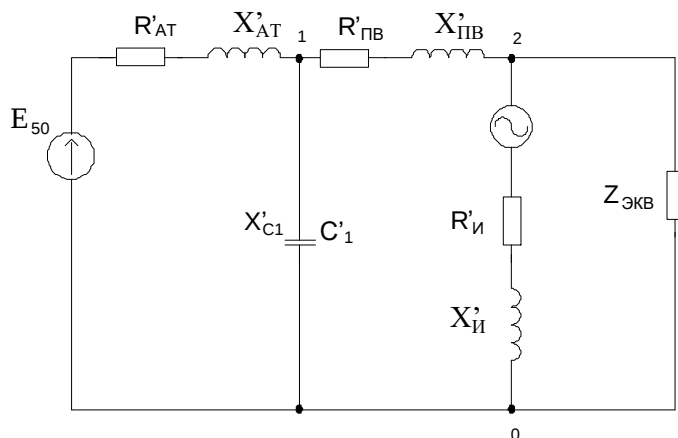


Рисунок 3 – Схема замещения после ряда эквивалентных преобразований

Таблица 1

Параметры элементов схемы замещения

$R_{АТ}, \text{Ом}$	$X_{АТ}, \text{Ом}$	$R_{ПВ}, \text{Ом}$	$X_{ПВ}, \text{Ом}$	$C_1, \text{Ф}$
0,024	$5,949 \cdot 10^{-3}$	2,531	0,014	$8,593 \cdot 10^{-6}$

Система уравнений, составленная по методу узловых потенциалов для рассматриваемой схемы (рисунок 3), имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \phi_1(Y_{AT} + Y_{PB} + Y_{C1}) - \phi_2 Y_{PB} &= 0 \\
 \phi_2(Y_{PB} + Y_{BT} + Y_{II}) - \phi_1 Y_{PB} - \phi_3 Y_{BT} &= E_{II} Y_{II} \\
 \phi_3(Y_{BT} + Y_{35} + Y_{C2}) - \phi_2 Y_{BT} - \phi_4 Y_{35} &= 0 \\
 \phi_4(Y_{35} + Y_6 + Y_{C3}) - \phi_3 Y_{35} - \phi_5 Y_6 &= 0 \\
 \phi_5(Y_6 + Y_{04} + Y_{C4}) - \phi_4 Y_6 - \phi_6 Y_{04} &= 0 \\
 \phi_6(Y_{04} + Y_H + Y_{C5}) - \phi_5 Y_{04} &= 0
 \end{aligned} \tag{4}$$

Графические зависимости кратности перенапряжения от частоты для различных классов напряжения представлены на рисунках 4–7. Максимальные кратности перенапряжения (K_U), частоты, на которых возможен режим резонанса (f) и порядок ВГ, на частотах которых возможен резонанс (n) при различных классах напряжения (U) (в различных точках рассматриваемой сети), представлены в таблице 2.

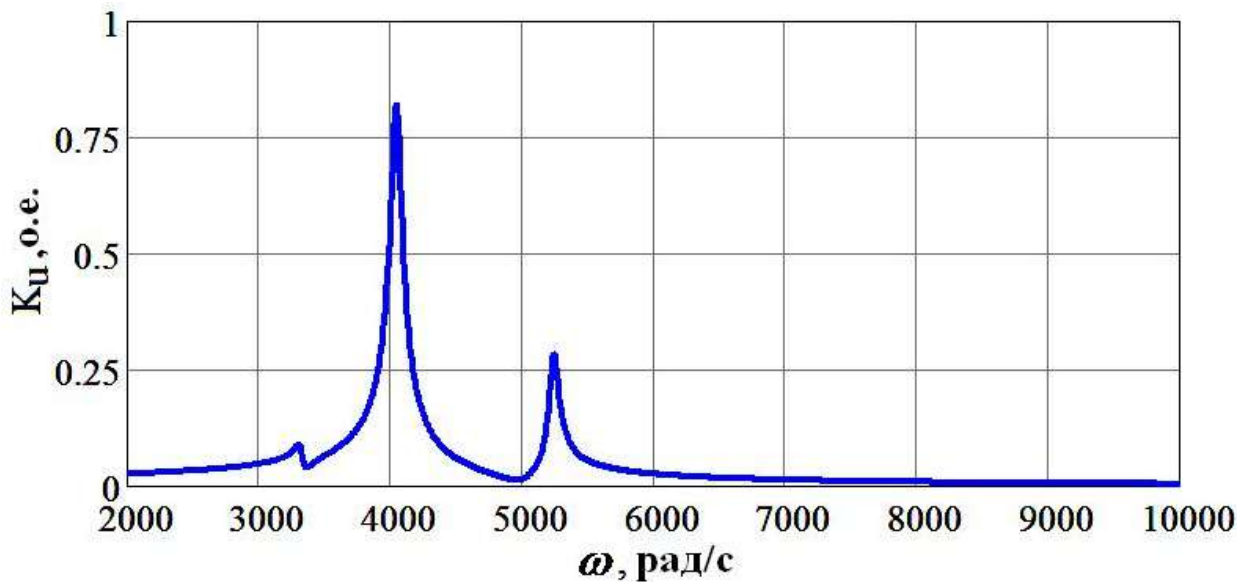


Рисунок 4 – Зависимость кратности перенапряжения от частоты (класс напряжения 110 кВ)

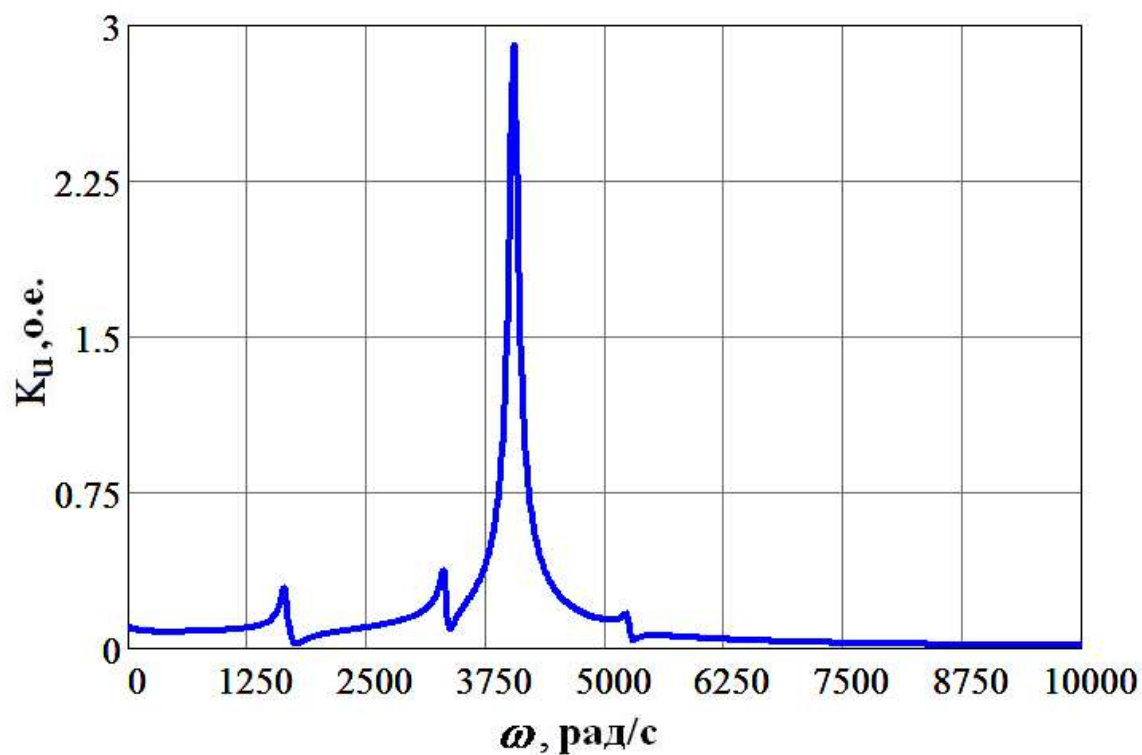


Рисунок 5 – Зависимость кратности перенапряжения от частоты (класс напряжения 35 кВ)

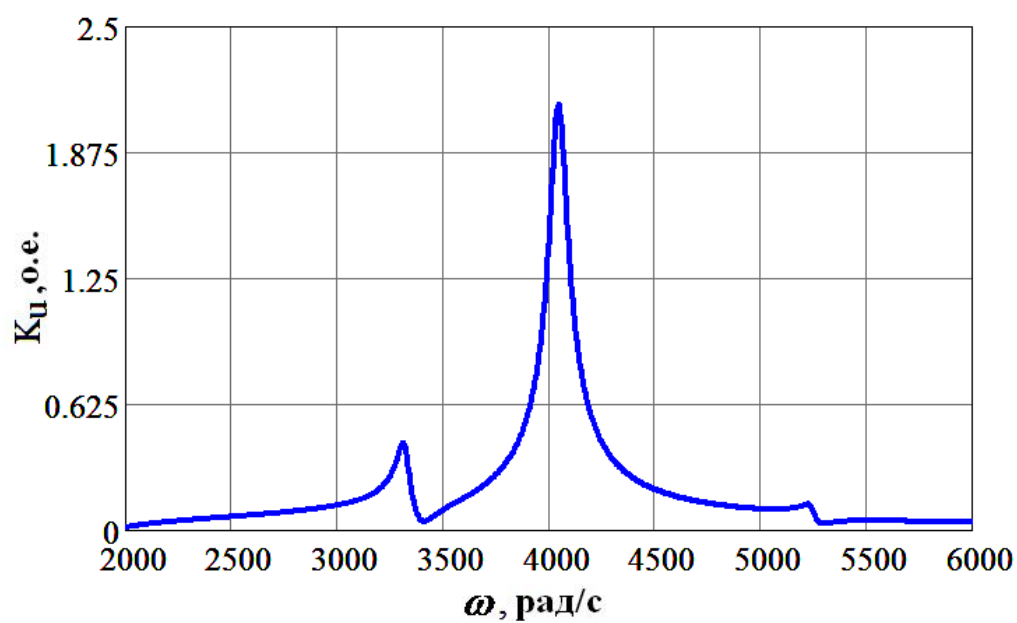


Рисунок 6 – Зависимость кратности перенапряжения от частоты (класс напряжения 6 кВ)

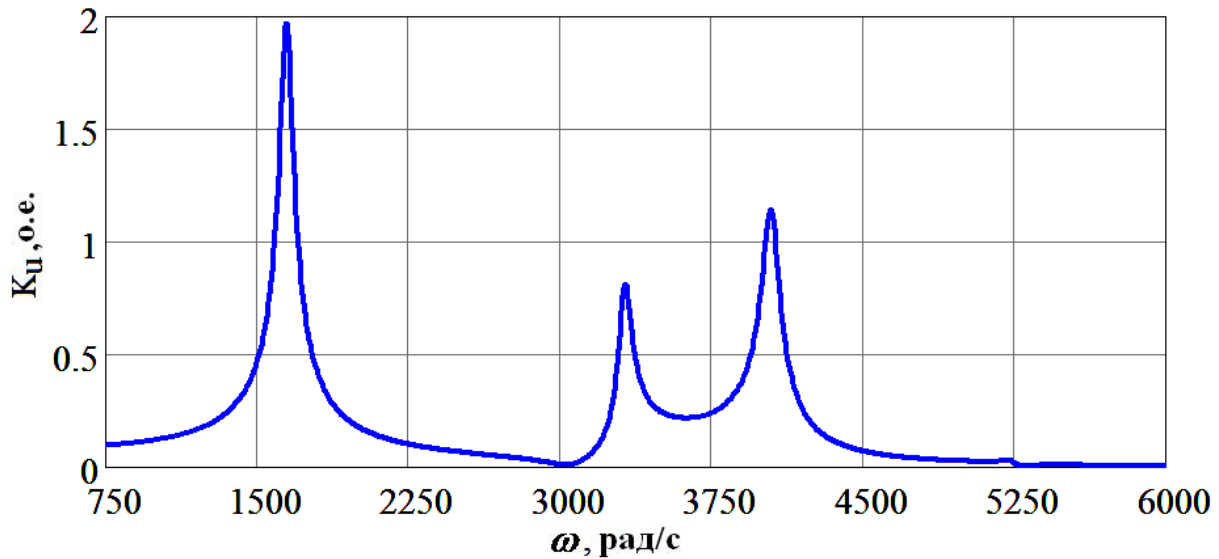


Рисунок 7 – Зависимость кратности перенапряжения от частоты (класс напряжения 0,4 кВ)

Таблица 2

Высшие гармоники, в окрестности которых возможен резонанс

U, кВ	K _U , о.е.	f, Гц	N
110	0,821	638	13
		537	11
		844	17
35	2,905	638	13
		258	5
		537	11
6	2,1	844	17
		638	13
		537	11
0,4	1,97	844	17
		258	5
		537	11
		638	13

Из таблицы 2 и графиков (рисунки 4–7) видно, что резонансный режим будет наблюдаться при частотах 258 Гц (5 гармоника), 537 Гц (11 гармоника), 638 Гц (13 гармоника) и 844 Гц (17 гармоника). Иными словами, при наличии нелинейной нагрузки, генерирующей 5, 11, 13 и 17 гармонику в сеть, будет наблюдаться режим резонанса.

Для оценки необходимости фильтрации высших гармоник в исследуемой системе электроснабжения (рис. 1) были проведены физические измерения показателей качества электроэнергии. Измерения производились в соответствии с действующей нормативной документацией. Были использованы приборы Fluke 435 и Metrel 2792A. Измерения производились на СШ 6 кВ, осциллограмма и спектральный состав напряжений приведены на рисунках 8 и 9 соответственно.

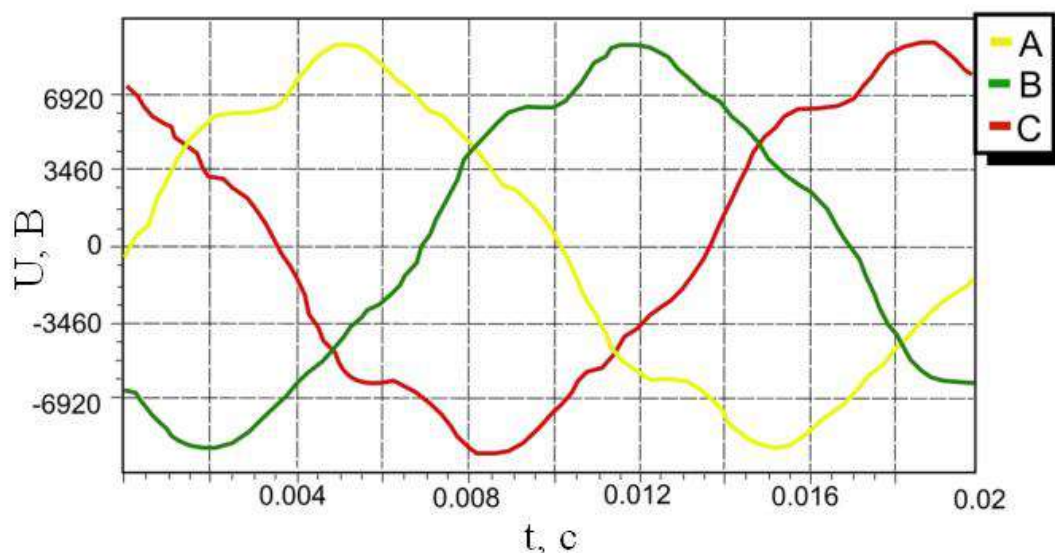


Рисунок 8 – Осциллограмма напряжений на СШ 6 кВ

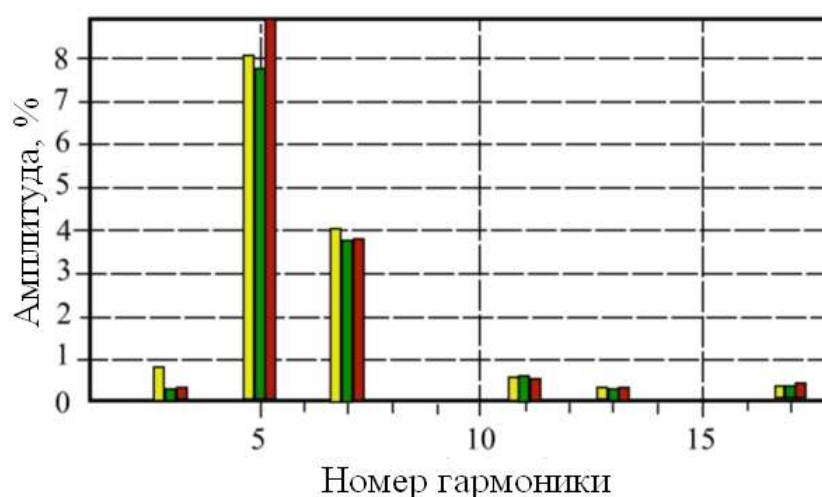


Рисунок 9 – Спектральный состав сигнала напряжения на СШ 6 кВ

Результаты измерений показывают, что в сети 6 кВ присутствуют гармоники, на которых возможен режим резонанса и опасные перенапряжения. Для защиты электрических сетей и уменьшения влияния высших гармоник в данном случае необходимо применение фильтров [3].

Заключение и выводы

1. В электрических сетях нефтедобывающих предприятий постоянно растет доля электрических нагрузок, имеющих нелинейную вольт-амперную характеристику, что, в конечном счете, является причиной появления высокочастотных составляющих (высших гармоник) тока и напряжения. Высшие гармоники приводят к перегрузке токоведущих частей, а для батарей статических конденсаторов – могут стать причиной преждевременного выхода из строя или даже физического разрушения.

2. В работе представлена методика расчета резонансных режимов в электрической сети 110/35/6 кВ. Основные источники гармонических искажений представлены на классе напряжения 0,4 кВ. Такими источниками являются станции управления погружными электродвигателями. Существенная доля нелинейной нагрузки 0,4 кВ вызывает искажения несинусоидальности на стороне 6 кВ. При этом возможны двукратные перенапряжения.

3. В работе представлены зависимости кратности перенапряжений от частоты, что позволило определить резонансные частоты, способные нанести ущерб электрооборудованию.

Результат физических измерений показателей качества электроэнергии с применением сертифицированного оборудования, показал наличие высших гармоник, способных привести к резонансу в электрической сети.

Результаты работы могут быть использованы для расчета режимов электрических сетей на стадии проектирования или при планировании установки технических устройств по фильтрации высших гармоник в распределительных сетях 0,4-6 кВ.

Литература

1. Коверникова, Л. И. Один из подходов к поиску резонансных режимов на высших гармониках / Л. И. Коверникова, С. С. Смирнов. – Текст : непосредственный // *Электричество*. – 2005. – № 10. – С. 62–69.
2. Николаев, А. А. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А. А. Николаев, Г. П. Корнилов, Т. Р. Храмшин, Г. Никифоров, Ф. Ф. Муталлапова. – Текст : непосредственный // *Вестник МГТУ им. Г. И. Носова*. – 2016. – Т. 14, № 4. – С. 96–105.
3. Расчет резонансных режимов систем электроснабжения и разработка мероприятий по фильтрации высших гармоник / В. А. Ощепков [и др.]. – Текст : непосредственный // *Промышленная энергетика*. – 2018. – № 9. – С. 10–16.
4. Павлов, И. В. Изучение электромагнитной совместимости конденсаторных установок в системе электроснабжения ОАО «Ячинский НПЗ ВНК» при наличии высших гармоник / И. В. Павлов, О. А. Дружинин, Д. А. Скакунов, В. П. Твердохлебов, Ф. А. Бурюкин. – Текст : непосредственный // *Технологии нефти и газа*. – 2011. – № 1. – С. 41–43.
5. Atkinson-Hope, G. Decision theory process for making a mitigation decision on harmonic resonance / G. Atkinson-Hope, K. A. Folly // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – Vol. 19, Issue 3. – Pp.1393-1399, July 2004. – DOI: 10.1109/TPWRD.2004.829142.
6. Osipov, D. S. Calculation of currents resonance at higher harmonics in power supply systems based on wavelet packet transform / D. S. Osipov, D. V. Kovalenko, N. N. Dolgikh // *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)* (14–16 Nov, 2017) // *IEEE Conference Publications*. Omsk, Russia. – DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239492.
7. Huang, Z. A practical harmonic resonance guideline for shunt capacitor applications / Z. Huang, W. Xu, V. R. Dinavahi // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – Vol. 18, Issue 4. – Pp.1382-1387, Oct 2003. – DOI: 10.1109/TPWRD.2003.817726.