

DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-56-67

УДК 621.316.722.076.12

ББК 3261.8

Н.М. ДРЕЙ, А.Г. ЗИГАНШИН, Г.М. МИХЕЕВ

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНОГО ГРАФИКА СУММАРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯ

**Ключевые слова:** система электроснабжения, компенсация реактивной мощности, батарея конденсаторов, трёхмерный график, высшие гармоники, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, алгоритм, матрица.

В системе электроснабжения промышленных предприятий с малой установленной мощностью в качестве устройств компенсации реактивной мощности в большинстве случаев применяется батарея косинусных конденсаторов. Однако в определённых режимах работы в такой сети из-за наличия в ней электроприёмников, которые генерируют высшие гармоники, могут возникнуть резонансные явления. Поэтому в такой сети следует учитывать как наличие гармонических составляющих, так и их процентное соотношение.

Согласно ГОСТ 32144-2013 необходимо учитывать не только отдельные гармонические составляющие напряжения порядка 40 гармоник, но и суммарный коэффициент этих составляющих. По этой причине расчёт этого параметра в системе электроснабжения потребителей является актуальной задачей.

В работе раскрыт принцип построения трёхмерного графика суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения. Приведены доводы зависимости этого коэффициента от наиболее важных параметров электрической сети, таких как мощности короткого замыкания системы, конденсаторной батареи, потребляемой нагрузки.

Авторами разработан также алгоритм построения трёхмерного графика суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения. В качестве примера в статье представлены графические зависимости: суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от мощности короткого замыкания системы и мощности конденсаторных батарей; суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от мощности короткого замыкания системы и нагрузки 6(10) кВ; суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от мощности конденсаторных батарей и нагрузки 6(10) кВ.

В последние годы существует тенденция роста суммарной мощности устройств с частотно регулируемым приводом (ЧРП) и сварочными выпрямителями, которые вырабатывают реактивную мощность. При этом эти устройства генерируют гармоники с номерами 5, 7, 11, 13 и т.д. [3]. Как известно, для уменьшения потери активной мощности, увеличения напряжения на выводах электроприёмников, улучшения качества электроэнергии, разгрузки элементов систем электроснабжения (СЭС) применяют компенсацию реактивной мощности.

В СЭС промышленных предприятий с малой установленной мощностью (менее 5 МВт) компенсацию реактивной мощности, как правило, производят с помощью установки батарей конденсаторов (БК). Однако в такой сети в определённых режимах работы возможны резонансные явления на высоких частотах. Они, в свою очередь, являются причиной больших искажений токов

и напряжения в распределительной сети. Высшие гармоники могут вызвать повышение токов БК, в результате последние могут выйти из строя [1, 6–9].

Нами была поставлена задача исследования качества электрической энергии в сети 6(10) кВ по общему коэффициенту гармонических составляющих напряжения на соответствие ГОСТ 32144-2013. В связи с этим возникает необходимость разработки алгоритма построения трёхмерного графика суммарного коэффициента гармонических составляющих ( $k_U$ ).

В качестве исходных параметров следует рассматривать данные, влияние которых в наибольшей степени сказывается на резонансных процессах. С целью снижения объема исследований необходимо минимизировать количество варьируемых параметров. Все остальные параметры следует принять неизменными в процессе отдельного расчета с возможностью задавать их значения в начале вычислений. Очевидно, что параметры питающей системы являются основными и влияют на резонансные процессы.

В соответствии с данными [2], ударный коэффициент ( $k_{уд}$ ) тока короткого замыкания (КЗ) на выводах такого источника определяется точкой КЗ. На распределительном устройстве РУ-6(10) кВ  $k_{уд}$  может принимать значения в довольно узком диапазоне (1,60–1,94). Данное обстоятельство позволяет в пределах одного расчета учитывать его фиксированное значение.

Мощность КЗ системы ( $S_{КЗ}$ ) может находиться в широком диапазоне возможных значений, поэтому ее следует рассматривать в качестве варьируемого параметра источника питания.

Сопrotивления БК в схеме замещения рассчитываются на основе таких данных, как номинальная реактивная мощность ( $Q_{БК}$ ) и удельные потери активной мощности ( $\Delta P_{уд}$ ) на выработку реактивной мощности. Известно, что современные косинусные конденсаторы имеют малую долю активных потерь (0,005 Вт/квар), которую допустимо принять как фиксированное значение независимо от генерируемой мощности. Поэтому с точки зрения исследования резонансных явлений переменным параметром БК является ее номинальная мощность  $Q_{БК}$ .

Нагрузка предприятия определяется параметрами потребителей и может меняться в широком диапазоне: от  $P_{нг\ min}$  до  $P_{нг\ max}$ . С учетом этого следует исследовать зависимость  $k_U$  от мощности нагрузки  $P_{нг}$ . Значение коэффициента мощности нагрузки в общем случае также нестабильно, но с учетом типа производства ее предельные значения значительно сужаются. В соответствии с этим в качестве  $\cos\varphi_{нг}$  возможно принять его среднестатистическое значение [2].

Таким образом, при исследовании резонансных явлений в качестве варьируемых параметров следует принять мощности элементов системы электропитания:

- питающей системы  $S_{КЗ}$ ;
- косинусных конденсаторов  $Q_{БК}$  и потребляемой нагрузки  $P_{нг}$ .

Очевидно, что любой трехмерный график функции показывает динамику ее изменения в зависимости от значения двух ее исходных параметров. Поэтому исходные параметры для построения графиков значений суммарного коэффици-

ента гармонических составляющих напряжения  $k_U$  следует рассматривать по парам, т.е. необходимо построить графики следующих функций:

- $k_U = f(S_{КЗ}, Q_{БК});$
- $k_U = f(S_{КЗ}, P_{нг});$
- $k_U = f(Q_{БК}, P_{нг}).$

В общем случае каждую функцию следует рассматривать как зависимость  $k_U$  от параметров  $x$  и  $y$ , т.е.  $k_U = f(x, y)$ . Алгоритм расчета  $k_U$  основан на алгоритме «Расчет тока конденсаторных батарей с учетом высших гармоник» [11].

С точки зрения простоты реализации, объема расчетов, наглядности и восприятия информации оптимальным является метод каркасного (проволочного) представления поверхности [12]. Достоинством данного метода является простота алгоритма. Поверхность при таком моделировании не теряет своей информативности в черно-белом представлении, что имеет место, например, в случае применения точечных методов с использованием цветовых гамм [4].

График функции  $k_U = f(x, y)$  представляет собой поверхность, непрерывную в рассматриваемой области. Довольно часто для представления таких поверхностей используется сетчатый каркас, построенный через фиксированный шаг изменения исходных параметров  $\Delta x$  и  $\Delta y$  (см. рис. 1).

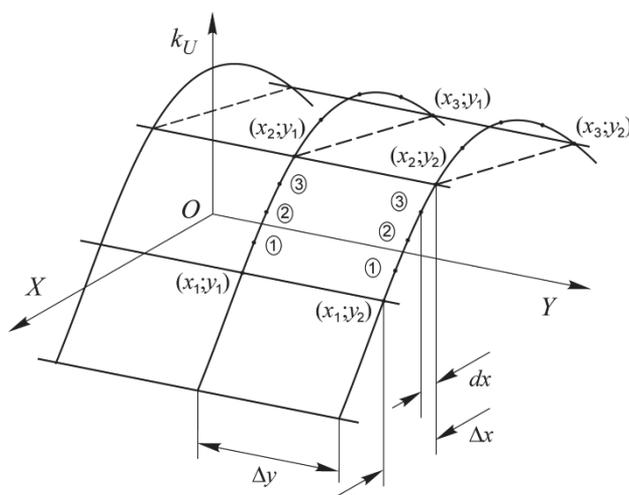


Рис. 1. Использование сетчатого каркаса для представления графика поверхности, заданной уравнением  $k_U = f(x, y)$

Точность графика при таком представлении исследуемой поверхности зависит от шага изменения исходных параметров  $x$  и  $y$ . Линии  $k_U = f(x, y = \text{const})$  и  $k_U = f(y, x = \text{const})$  пересекаются в так называемых узловых точках. Наиболее простым способом построения поверхности является расчет координат узловых точек сетки с последующим соединением смежных точек между собой. На фрагменте графика поверхности, заданного уравнением  $k_U = f(x, y)$  и построенного по узловым точкам, в узловых точках линии сетки имеют место скачкообразные изменения значений производной.

Особенно значительные изменения значений производной возникают в точках, близких к точкам перегиба графика. С целью сглаживания графика в каркас поверхности необходимо ввести дополнительные расчетные точки.

Ввод дополнительных точек 1, 2 и 3 по оси  $OX$  (рис. 1) позволяет рассчитать каждую соответствующую линию сетки со значительно меньшим шагом  $dx$ , что существенно сглаживает расчетную поверхность графика зависимости  $k_U = f(x, y)$ . Аналогично следует ввести дополнительные точки в состав линий сетки по оси  $OY$ . Количество таких точек определяется исходя из необходимой точности визуализации исследуемой поверхности.

В результате график поверхности  $k_U = f(x, y)$ , выполненный таким способом, значительно ближе к графику реальной исследуемой поверхности.

Как показывают предварительные вычисления, каждой отдельной гармонике канонического ряда источника гармоник соответствует некоторая кривая на графике поверхности  $k_U = f(x, y)$ , содержащая точки, в которых  $k_U$  принимает максимальные значения. Необходимо такие максимумы объединить в группы, соединив каждый ряд точек отдельной линией.

Вид трехмерного изображения определяется ее ориентацией относительно наблюдателя. В определенных случаях возможны такие положения графика, что отдельные области окажутся перекрытыми для обзора другими его участками. С целью исключения таких неопределенностей следует предусмотреть возможность изучения графика под разными углами обзора путем вращения исследуемой поверхности относительно вертикальной и горизонтальной осей, параллельных плоскости экрана.

Любой объемный объект, которым в нашем случае является исследуемая поверхность  $k_U = f(x, y)$ , можно рассматривать относительно разных систем координат. Для получения изображения объекта на экране применяются две прямоугольные системы координат: объектная  $XYZ$  и экранная  $xuz$  [4] (рис. 2).

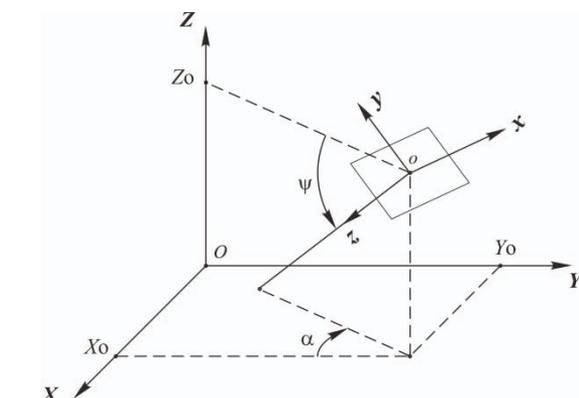


Рис. 2. Пространственное расположение систем координат и правила определения углов

Исследуемая поверхность рассматривается относительно правой прямоугольной системы координат  $XYZ$ . В правой системе координат при повороте

оси  $OX$  по часовой стрелке на  $90^\circ$  ее направление совпадет с направлением оси  $OY$ , если этот поворот наблюдать с точки начала координат в сторону положительного направления оси  $OZ$ .

Система координат экрана  $xuz$  выбирается таким образом, чтобы ось  $oz$  была направлена на исследуемую поверхность, в то время плоскость  $xou$  должна совпасть с поверхностью экрана. Согласно классической геометрии, оси  $ox$  и  $ou$  располагают соответственно вправо и вверх. В результате образуется левая прямоугольная система координат.

В данной системе координат проекция поверхности на плоскость экрана однозначно определяется ее координатами по двум осям –  $ox$  и  $ou$ . Координаты объекта по оси  $oz$  не отражаются на форме изображения. Пространственное расположение систем координат исследуемой поверхности  $XYZ$  и экрана  $xuz$ , а также правила определения углов обзора  $\alpha$  и  $\psi$  показаны на рис. 2.

Координаты поверхности в объектной системе  $XYZ$  известны по результатам расчета  $k_U$ . Поверхность, заданная  $k$  точками, представляется в виде нормализованной матрицы  $A$  размером  $k \times 4$ , где первые три столбца являются соответствующими координатами  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . При этом четвертый столбец заполняется единицами. Объектная  $XYZ$  и экранная  $xuz$  системы взаимосвязаны через матрицы элементарных преобразований, которыми являются

- матрица сдвига

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -X_0 & -Y_0 & -Z_0 & 1 \end{bmatrix};$$

- матрица проекций

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

- матрица поворота относительно вертикальной оси экрана ( $ou$ )

$$\mathbf{R}_\alpha = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

- матрица поворота относительно горизонтальной оси экрана ( $ox$ )

$$\mathbf{R}_\psi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где  $X_0, Y_0, Z_0$  – координаты центра экрана относительно объектной системы  $XYZ$ .

Координаты исследуемой поверхности пересчитываются относительно экранной системы  $xuz$ . Для этого используется матрица преобразований  $\mathbf{M}$  размером  $4 \times 4$ , связывающая объектную и экранную системы. Результатом этой матрицы является произведение четырех матриц элементарных преобразований [5, 10]:

$$\mathbf{M} = \mathbf{T} \mathbf{S} \mathbf{R}_\alpha \mathbf{R}_\psi,$$

или в развернутом виде

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -X_0 & -Y_0 & -Z_0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

С целью сокращения количества операций матрица преобразований приводится к более компактному виду

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -\cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 \\ -\sin \alpha \sin \psi & -\cos \alpha \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ -\sin \alpha \cos \psi & -\cos \alpha \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ X_0 & Y_0 & Z_0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрица координат изображения  $\mathbf{B}$  исследуемой поверхности на экране получается путем произведения матрицы  $\mathbf{A}$  на матрицу  $\mathbf{M}$

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \mathbf{M}.$$

Любая ненулевая квадратная матрица имеет обратную матрицу [5]

$$\mathbf{M}^{-1} = \begin{bmatrix} -\cos \alpha & -\sin \alpha \sin \psi & -\sin \alpha \cos \psi & 0 \\ \sin \alpha & -\cos \alpha \sin \psi & -\cos \alpha \cos \psi & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ A & B & C & 1 \end{bmatrix},$$

где коэффициенты  $A, B, C$  определяются выражениями [4]:

$$A = X_0 \cos \alpha - Y_0 \sin \alpha;$$

$$B = -Z_0 \cos \psi + \sin \psi (X_0 \sin \alpha + Y_0 \cos \alpha);$$

$$C = Z_0 \sin \psi + \cos \psi (X_0 \sin \alpha + Y_0 \cos \alpha).$$

В случае необходимости координаты экрана могут быть пересчитаны в координаты объекта применением матрицы, обратной матрице преобразований

$$\mathbf{A} = \mathbf{B} \mathbf{M}^{-1}.$$

На рис. 3 приведены основные блоки алгоритма расчета и построения трехмерного графика  $k_U = f(x, y)$ .

Основными вычислительными блоками являются:

- расчет и сохранение координат линий сетки, расположенных вдоль оси  $OX$ ;
- расчет и сохранение координат линий сетки, расположенных вдоль оси  $OY$ ;
- перерасчет координат сетки с объектной системы в экранную систему с учетом угла обзора.

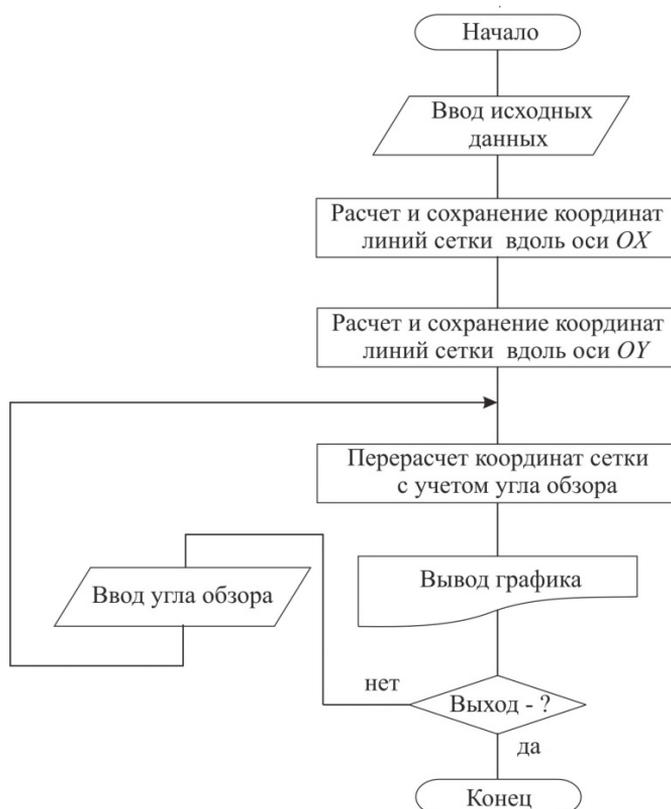


Рис. 3. Схема алгоритма создания трехмерного графика  $k_U = f(x, y)$

Основная часть исходных данных вводится на начальном этапе работы программы. Угол обзора исследуемой поверхности принимается по умолчанию. В случае необходимости имеется возможность корректировки ее значения с учетом результатов визуального контроля и выполняется повторный перерасчет координат изображения исходя из трехмерных значений, хранящихся в памяти компьютера. Такой алгоритм позволяет значительно уменьшить время определения координат поверхности на экране и тем самым увеличить скорость отклика вычислительной системы (компьютера) на изменение угла обзора исследуемой поверхности.

В качестве примера на рис. 4 приведен подробный алгоритм расчета координат линий сетки вдоль оси  $OX$  с последующим сохранением в оперативной памяти компьютера в виде массива данных.

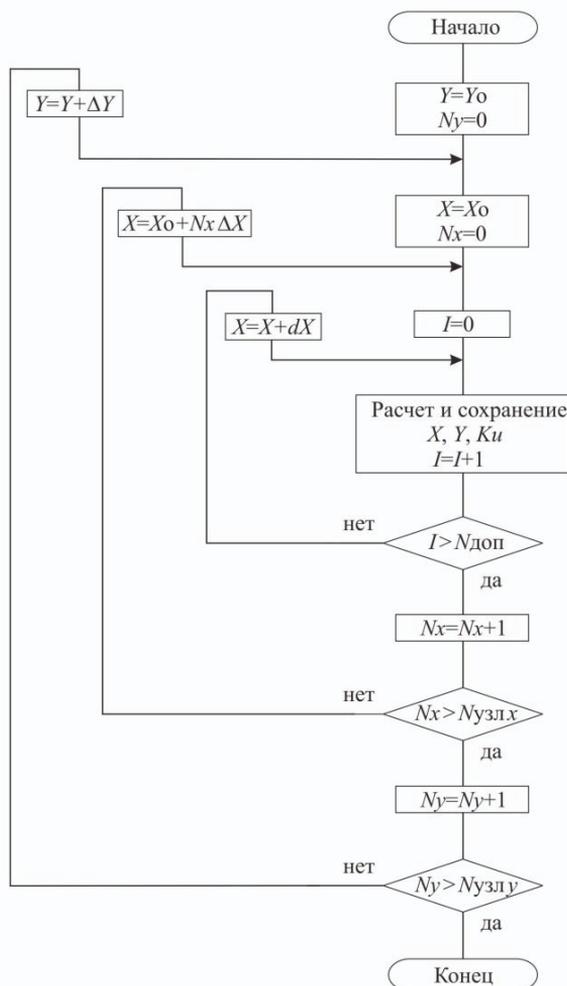
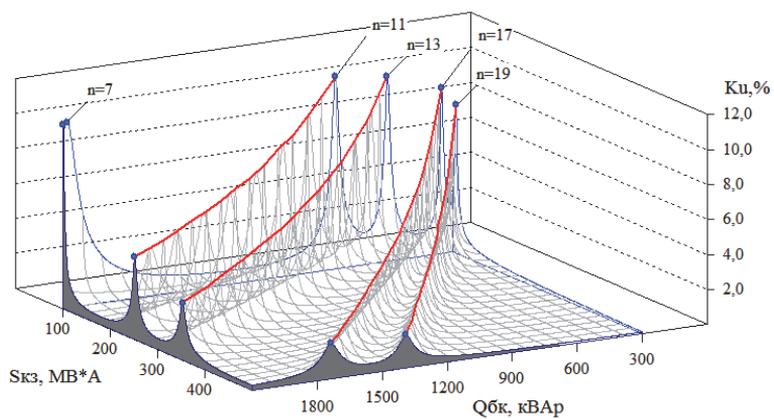


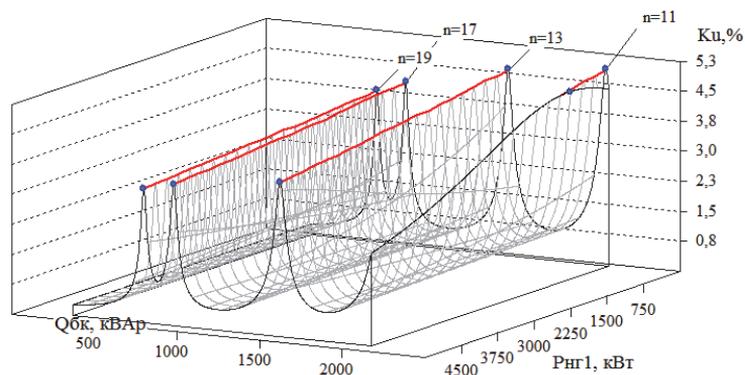
Рис. 4. Схема алгоритма расчета и сохранения координат линий сетки вдоль оси  $OX$

Аналогичный алгоритм реализован для линий сетки вдоль оси  $OY$ . Основные шаги изменения исходных параметров по осям  $OX$  и  $OY$  равны соответственно  $\Delta X$  и  $\Delta Y$ . При этом шаг по оси  $OX$ , вдоль которой рассчитываются координаты линии сетки, делится на ряд дополнительных шагов  $dx$ , меньших по значению ( $dy$  при расчете координат линий сетки по оси  $OY$ ). Процедура на основе данных алгоритмов выполняется один раз перед запуском программы.

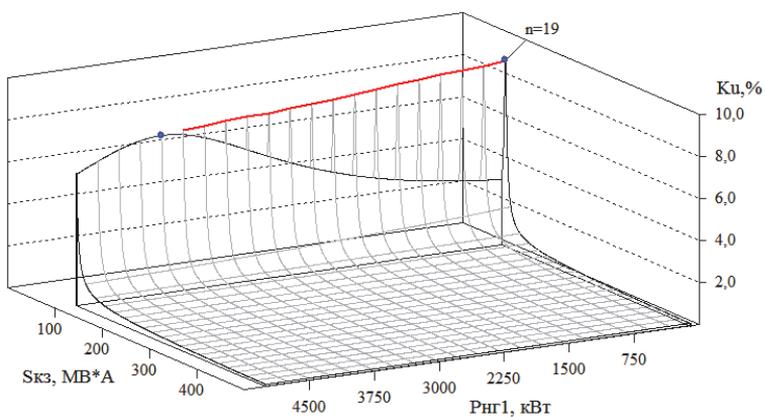
На рис. 5 в качестве примера представлено трёхмерное изображение зависимостей  $k_U = f(S_{КЗ}, Q_{БК})$ ;  $k_U = f(Q_{БК}, P_{нг})$ ;  $k_U = f(S_{КЗ}, P_{нг})$ .



а



б



в

Рис. 5. Зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ( $n$  – номер гармоники):  
 $a - k_U = f(S_{K3}, Q_{BK})$ ;  $b - k_U = f(Q_{BK}, P_{иг1})$ ;  $в - k_U = f(S_{K3}, P_{иг1})$ ,

**Выводы.** 1. Выявлено, что для исследования резонансных явлений в системе электроснабжения в качестве варьируемых параметров следует принять мощности элементов: питающей системы  $S_{кз}$ , косинусных конденсаторов  $Q_{БК}$  и потребляемой нагрузки  $P_{нг}$ .

2. Разработаны алгоритм и принцип построения трёхмерного графика суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения.

#### Литература

1. Атаманов М.Н., Дрей Н.М., Зиганшин А.Г., Михеев Г.М. Расчет параметров и анализ работы пассивного фильтра гармоник // Вестник Чувашского университета. 2020. № 1. С. 17–25.
2. Бырыбин Б.Ю. Справочник по проектированию электроснабжения. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 331 с.
4. Иванов В.П., Батраков А.С. Трёхмерная компьютерная графика / под ред. Г.М. Полищука. М.: Радио и связь, 1995. 225 с.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1973. 832 с.
6. Михеев Г.М., Атаманов М.Н., Афанасьева О.В., Дрей Н.М. Расчёт тока конденсаторных батарей с учётом источников высших гармоник // Вестник Чувашского университета. 2017. № 1. С. 145–155.
7. Михеев Г.М., Атаманов М.Н., Дрей Н.М. Алгоритм расчёта тока высших гармоник в системе электроснабжения промышленных предприятий // Промышленная энергетика. 2018. № 3. С. 40–45.
8. Михеев Г.М., Атаманов М.Н., Дрей Н.М. Электромагнитная совместимость технических средств предприятий по гармоническому составу напряжения // Электрические станции. 2019. № 8. С. 41–45.
9. Михеев Г.М., Атаманов М.Н., Афанасьева О.В., Дрей Н.М. О компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения с косинусными конденсаторами // Электротехника. 2019. № 4. С. 32–41.
10. Мостовской А.П. Численные методы и система Mathematica. Мурманск, 2009. 249 с.
11. Программа для ЭВМ «Расчет тока конденсаторных батарей с учетом высших гармоник» / Михеев Г.М., Атаманов М.Н., Дрей Н.М. Свидетельство о гос. регистрации № 2017614711; заявл. № 2017610657 от 24.01.2017; опубл. 02.05.2017.
12. Разработка САПР: в 10 кн. Кн. 7. Графические системы САПР / В.Е. Климов; под ред. А.В. Петрова. М.: Выш. шк., 1990. 142 с.

---

**ДРЕЙ НАДЕЖДА МИХАЙЛОВНА** – аспирантка кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (drey\_nadezhda@mail.ru).

**ЗИГАНШИН АЙРАТ ГАБДУЛХАКОВИЧ** – аспирант кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (ZiganshinAG@gridcom-rt.ru).

**МИХЕЕВ ГЕОРГИЙ МИХАЙЛОВИЧ** – доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (mikheevg@rambler.ru).

---

**Nadezhda M. DREY, Ayrat G. ZIGANSHIN, Georgi M. MIKHEEV**  
**DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR CREATING**  
**A THREE-DIMENSIONAL GRAPH OF THE TOTAL HARMONIC**  
**OF VOLTAGE COMPONENTS RATIO**

**Key words:** power supply system, reactive power compensation, capacitor battery, three-dimensional graph, higher harmonics, total harmonic factor of voltage components, algorithm, matrix.

*In the power supply system of industrial enterprises with low installed capacity, a battery of cosine capacitors is used as reactive power compensation devices in most cases. However, in certain modes of operation in such a network due to the presence of electrical receivers, which generate the highest harmonics, there may be resonance phenomena. Therefore, in such a network you should know both the presence of harmonic components and their percentage.*

*It is known that according to GOST 32144-2013 it is necessary to take into account not only the individual harmonic components of the voltage of about 40 harmonics, but also the total ratio of these components. For this reason, the calculation of this parameter in the power supply system of consumers is an urgent task.*

*In this paper the principle of structure of the three-dimensional graph of the total factor of harmonic components of voltage is revealed. The arguments for the dependence of this factor on the most important parameters of the electrical network, such as system short-circuit power, capacitor bank, load consumption are given.*

*The authors have developed an algorithm for creating a three-dimensional graph of the total harmonic voltage components coefficient with the disclosure of the principles of its construction. As an example, the paper presents graphical dependencies:  $k_U = f(S_{KZ}, Q_{BK})$ ;  $k_U = f(S_{KZ}, P_{NG})$ ;  $k_U = f(Q_{BK}, P_{NG})$ .*

#### References

1. Atamanov M.N., Drei N.M., Ziganshin A.G., Mikheev G.M. *Raschet parametrov i analiz raboty passivnogo fil'tra garmonik* [Calculation of Parameters and Analysis of the Passive Harmonic Filter]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2020, no. 1, pp. 17–25.
2. Byrybin B.Yu. *Spravochnik po proektirovaniyu elektrosnabzheniya* [Electricity Design Handbook]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990, 576 p.
3. Zhezhel'enko, I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatii. 4-e izd., pererab. i dop.* [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises. 4<sup>th</sup> ed.]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000, 331 p.
4. Polishchuk G.M., ed., Ivanov V.P., Batrakov A.S. *Trekhmernaya komp'yuternaya grafika* [3D computer graphics]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1995, 225 p.
5. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov)* [Mathematics Handbook (for scientists and engineers)]. Moscow, 1973, 832 p.
6. Mikheev G.M., Atamanov M.N., Afanas'eva O.V., Drei N.M. *Raschet toka kondensatornykh batarei s uchetom istochnikov vysshikh garmonik* [Calculation of Current Rating in Capacitor Banks in Consideration of Sources of Higher Harmonics]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2017, no. 1, pp. 145–155.
7. Mikheev G.M., Atamanov M.N., Drei N.M. *Algoritm rascheta toka vysshikh garmonik v sisteme elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii* [Algorithm for calculating the current of higher harmonics in the electricity supply system of industrial enterprises]. *Promyshlennaya energetika*, 2018, no. 3, pp. 40–45.
8. Mikheev G.M., Atamanov M.N., Drei N.M. *Elektromagnitnaya sovместimost' tekhnicheskikh sredstv predpriyatii po garmonicheskomu sostavu napryazheniya* [Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment of Enterprises by Harmonic Voltage Composition]. *Elektricheskie stantsii*, 2019, no. 8, pp. 41–45.
9. Mikheev G.M., Atamanov M.N., Afanas'eva O.V., Drei N.M. *O kompensatsii reaktivnoi moshchnosti v sistemakh elektrosnabzheniya s kosinusnymi kondensatorami* [On reactive power compensation in power supply systems with cosine capacitors]. *Elektrotehnika*, 2019, no. 4, pp. 32–41.

10. Mostovskoi A.P. *Chislennyye metody i sistema Mathematica* [Mathematica Numerical Methods and System]. Murmansk, 2009, 249 p.

11. Mikheev G.M., Atamanov M.N., Drei N.M. *Programma dlya EVM «Raschet toka kondensatornykh batarei s uchedom vysshikh garmonik»*. *Svidetel'stvo o gosregistratsii № 2017614711, 2017* [The program for the computer "Calculation of the current of capacitor batteries taking into account the higher harmonics". Certificate of State Registration No. 2017614711, 2017].

12. Petrov A.V., ed., Klimov V.E. *Razrabotka SAPR: v 10 kn. Kn. 7. Graficheskie sistemy SAPR* [Developed CAD. 10 books. Book 7: CAD Graphics Systems ]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990, 142 p.

---

**NADEZHDA M. DREY – Post-Graduate Student of Electric Power Industry Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (drey\_nadezhda@mail.ru).**

**AYRAT G. ZIGANSHIN– Post-Graduate Student of Electric Power Industry Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (ZiganshinAG@gridcom-rt.ru).**

**GEORGI M. MIKHEEV– Doctor of Technical Sciences, Professor of Electric Power Industry Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (mikheevg@rambler.ru).**

---

**Формат цитирования:** Дрей Н.М., Зиганшин А.Г., Михеев Г.М. Разработка алгоритма для построения трехмерного графика суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения // Вестник Чувашского университета. – 2021. – № 1. – С. 56–67. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-56-67.