

УДК 621.3.048

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

А. А. ДОВГУН, А. А. АЛФЕРОВ, Т. В. АЛФЕРОВА,
Ю. А. РУДЧЕНКО

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Повышение качества электрической энергии является важной народнохозяйственной задачей, решение которой позволит повысить экономическую эффективность производства за счет снижения потерь электроэнергии, увеличения срока службы электрооборудования и повышения надежности электроснабжения [1].

На современном этапе развития электроэнергетики решение этой проблемы стало возможно на новом техническом уровне. Созданы приборные средства измерения показателей и разработана система учета и контроля качества электрической энергии. На всех уровнях управления режимами в энергосистемах активно внедряются интеллектуальные автоматизированные системы диспетчерского управления на базе современных средств информационной и компьютерной техники. В связи с этим актуальное значение приобретает разработка эффективных методов и программ расчета показателей качества электроэнергии.

Целью работы является разработка программного обеспечения для автоматизации расчета высших гармоник в разветвленных электрических сетях сложной конфигурации.

Основная часть

Оценка влияния источников высших гармоник на несинусоидальность напряжения сети, обусловленного применением тех или иных средств или методов ограничения несинусоидальности напряжения (например, активных фильтро-компенсирующих устройств) и выбор параметров этих средств требуют расчета уровней высших гармоник в электрических сетях [2], [3].

Результатами расчета несинусоидальности токов и напряжений являются амплитудные спектры напряжений в узлах и токов в ветвях схемы замещения системы электроснабжения, а также коэффициенты несинусоидальности напряжения в узлах схемы замещения и эквивалентные действующие значения токов высших гармоник в ее ветвях.

Эти результаты получают на основании расчета установившегося режима высших гармоник. При этом принимают следующие допущения [4]:

- система электроснабжения предполагается симметричной и линейной, т. е. все фазы обладают одинаковыми одноименными параметрами;
- сопротивления элементов системы электроснабжения токам высших гармоник прямой и обратной последовательностей принимаются одинаковыми;
- источники гармоник представляются симметричными трехфазными нагрузками, генерирующими в сеть токи высших гармоник.

Принятые допущения позволяют рассматривать режим для каждой гармоники независимо от режима другой и использовать для определения амплитудных спектров токов и напряжений принцип наложения.

Расчеты уровней высших гармоник в сетях предприятия, отличающихся сложной конфигурацией и содержащих значительное количество элементов, практически возможны только при применении ЭВМ.

Для реализации данного расчета высших гармоник в системах электроснабжения предприятий в среде Delphi была разработана программа «Sigma», позволяющая выполнять расчеты несинусоидальности токов и напряжений в системах электроснабжения промышленных предприятий и коэффициента несинусоидальности напряжения, источником тока высших гармоник которых является вентильный преобразователь (6-, 12-пульсный), а также тот или иной источник, задающийся амплитудой и углом каждой гармоники.

Расчет производится для канонических гармоник ($\nu = 5; 7; 11; 13; \dots$). Если в системе электроснабжения имеются преобразователи только с 6-пульсной схемой выпрямления, то производится расчет для восьми гармоник ($\nu = 5; 7; 11; 13; 17; 19; 21; 25$). При наличии только преобразователей с 12-пульсной схемой выпрямления расчет производится для четырех гармоник ($\nu = 11; 13; 23; 25$).

Алгоритм расчета программы основывается на методе узловых потенциалов и реализуется в следующем порядке:

1. Составляется схема замещения системы электроснабжения для токов высших гармоник. Схема замещения составляется на одну фазу и имеет нейтраль, к которой присоединяются нулевые точки схем замещения генераторов, обобщенных нагрузок, двигателей, батарей конденсаторов и емкостных проводимостей кабельных и воздушных линий большой протяженности.

Вентильные преобразователи и другие источники гармоник замещают источниками токов высших гармоник бесконечной мощности. Если к одной секции (системе шин) подключено несколько источников высших гармоник, то производится их эквивалентирование.

2. Выполняется расчет параметров схем замещения элементов систем электроснабжения для каждой гармоники. Количество гармоник, для которых рассчитываются параметры схем замещения, определяется в соответствии с исходными данными о типе источника высших гармоник.

3. Определяется спектральный состав токов источников высших гармонических составляющих.

4. По заданной информации (парам узлов и сопротивлений для каждой ветви схемы замещения сети) формируется матрица проводимостей узлов $[Y_U]$ и комплексная столбцовая матрица эквивалентных узловых токов источников высших гармоник $[J_\nu]$. Диагональный элемент Y_{vij} равен сумме проводимостей тех ветвей, которые инцидентны узлу схемы. Недиagonalный элемент Y_{vij} равен проводимости ветви, соединяющей узлы i и j схемы, взятой с противоположным знаком.

5. Решается система узловых уравнений в матричной форме для ν -х гармоник:

$$|Y_{vij}| \cdot |\varphi_{vi}| = |I_{vi}|. \quad (1)$$

6. Определяется эквивалентное значение напряжения ν -й гармоники в i -м узле схемы:

$$U_{vi} = \sqrt{|\varphi_{vi}|^2}. \quad (2)$$

7. По результатам расчета эквивалентных значений гармоник напряжения в узлах определяются коэффициенты несинусоидальности напряжения.

8. Рассчитывается действующее значение токов ν -й гармоники в ветвях схемы замещения:

$$I_{\nu i} = \frac{\sqrt{|\varphi_{\nu i} - \varphi_{\nu j}|^2}}{Z_{\nu i}}. \quad (3)$$

9. Определяется эквивалентное значение токов высших гармоник в ветвях схемы замещения:

$$I_{\Sigma i} = \sqrt{\sum_{\nu=1}^n I_{\nu i}^2}. \quad (4)$$

На рис. 1 представлен вид главного окна программы.

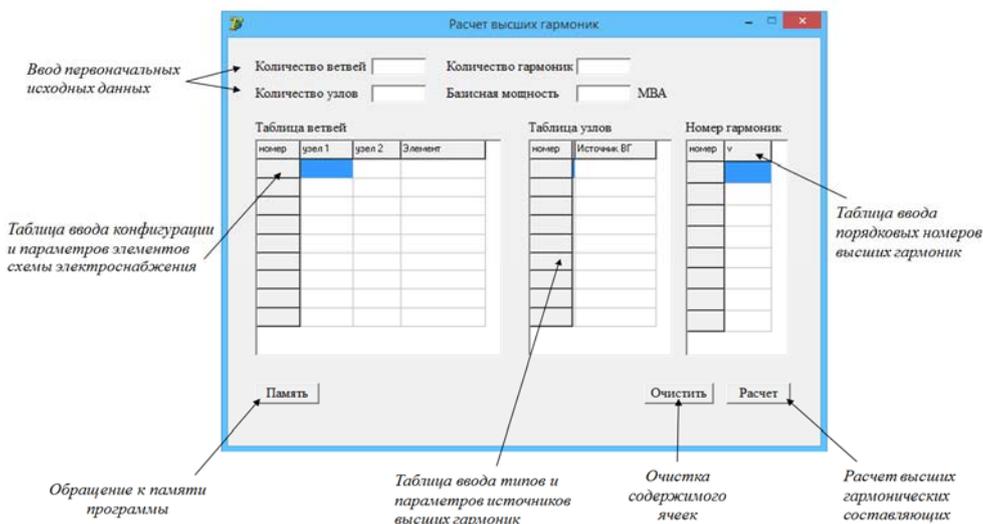


Рис. 1. Главное окно программы

Любую конфигурацию схемы электроснабжения промышленного предприятия в программе можно представить в виде определенного набора ветвей и узлов. Каждая ветвь имеет начальный и конечный узел, что используется в программе для ввода конфигурации схемы электроснабжения. В качестве примера рассмотрим расчет уровней высших гармоник для системы электроснабжения предприятия, однолинейная схема которой представлена на рис. 2.

Исходные данные к рис. 2

Система: $S_{кз} = 2000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$;

узел 1: трансформатор $S_{Т1} = 63 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_k = 12 \%$, $\Delta P_k = 250 \text{ кВт}$;

узел 2: кабельная линия $L_1 = 2 \text{ км}$, 4 кабеля, $r_0 = 0,028 \text{ Ом/км}$, $x_0 = 0,075 \text{ Ом/км}$, трансформатор $S_{Т3} = 2500 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $U_k = 10 \%$, $\Delta P_k = 10 \text{ кВт}$; кабельная линия $L_2 = 4,8 \text{ км}$, 4 кабеля, $r_0 = 0,028 \text{ Ом/км}$, $x_0 = 0,075 \text{ Ом/км}$, нагрузка $S_{Н3} = 25 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $\cos(\varphi) = 0,8$; 12-пульсный преобразователь $S_{П3} = 5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $\varphi = 30^\circ$; БК $Q_{БК3} = 15 \text{ Мвар}$; ТЭЦ $S_{ТЭЦ} = 15 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $X_d = 0,15$;

узел 3: нагрузка $S_{Н1} = 15 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $\cos(\varphi) = 0,8$; 6-пульсный преобразователь $S_{П1} = 15 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $\varphi = 10^\circ$; БК $Q_{БК1} = 15 \text{ Мвар}$;

узел 4: нагрузка $S_{Н4} = 2 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $\cos(\varphi) = 0,8$; БК $Q_{БК4} = 1 \text{ Мвар}$;

узел 5: трансформатор $S_{T2} = 2500 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $U_k = 10 \%$, $\Delta P_k = 10 \text{ кВт}$;
 узел 6: нагрузка $S_{H2} = 1,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $\cos(\varphi) = 0,8$; 6-пульсный преобразователь $S_{H2} = 200 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $\varphi = 20^\circ$; БК $Q_{\text{БК}2} = 800 \text{ квар}$.

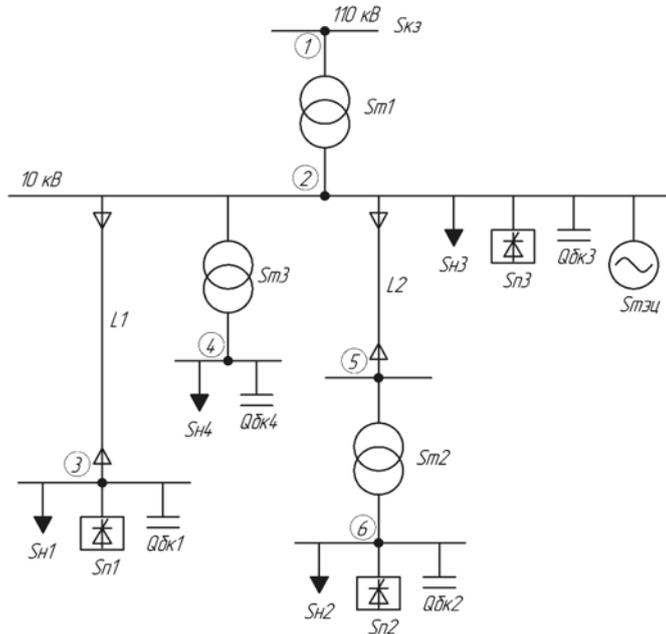


Рис. 2. Однолинейная схема электроснабжения предприятия

Схема замещения системы электроснабжения предприятия для расчета токов высших гармоник представлена на рис. 3.

Схема замещения имеет 15 ветвей и 6 узлов, а также два 6-пульсных и один 12-пульсный преобразователь, следовательно, расчет будем производить для восьми гармоник (5; 7; 11; 13; 17; 19; 23; 25).

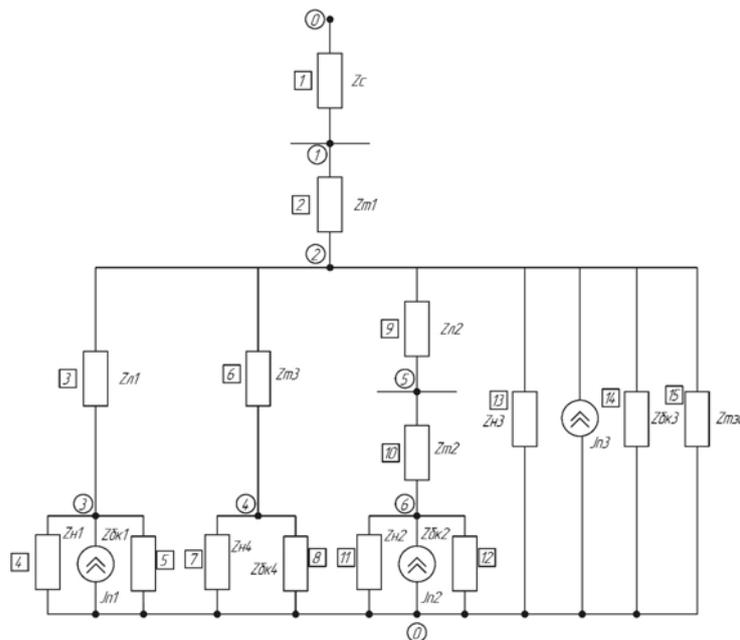


Рис. 3. Схема замещения системы электроснабжения предприятия

Для ввода в программу сведений о параметрах ветвей схемы электроснабжения предусмотрена форма в главном окне программы (рис. 4, а), при этом каждая строка соответствует одной ветви, где указывается начальный и конечный узел, соединяющий данную ветвь, а также тип элемента схемы замещения. Ввод параметров элементов схемы замещения предусмотрен в отдельном окне программы (рис. 4, б).

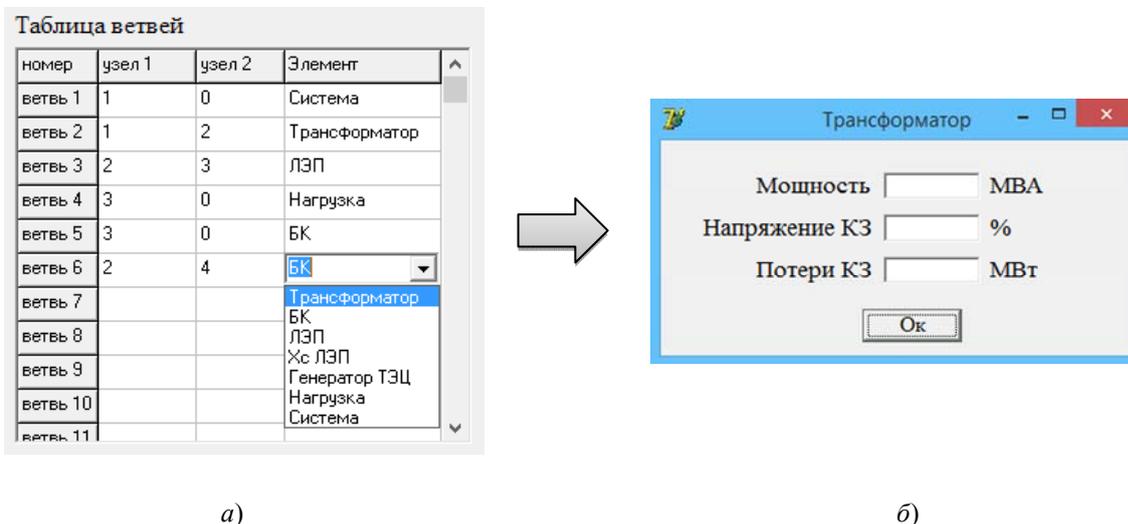


Рис. 4. Форма ввода данных в таблицу:
а – ветвей; б – параметров элементов схемы замещения

Для ввода в программу сведений о параметрах источников высших гармоник предусмотрена таблица узлов в главном окне программы (рис. 5, а). В каждой строке таблицы можно задать один источник высших гармоник, расположенный в данном узле. Если в данном узле отсутствует источник высших гармоник тока, то из списка следует выбрать параметр «нет».

Для таблицы узлов ввод параметров источников высших гармоник предусмотрен в отдельном окне программы (рис. 5, б).

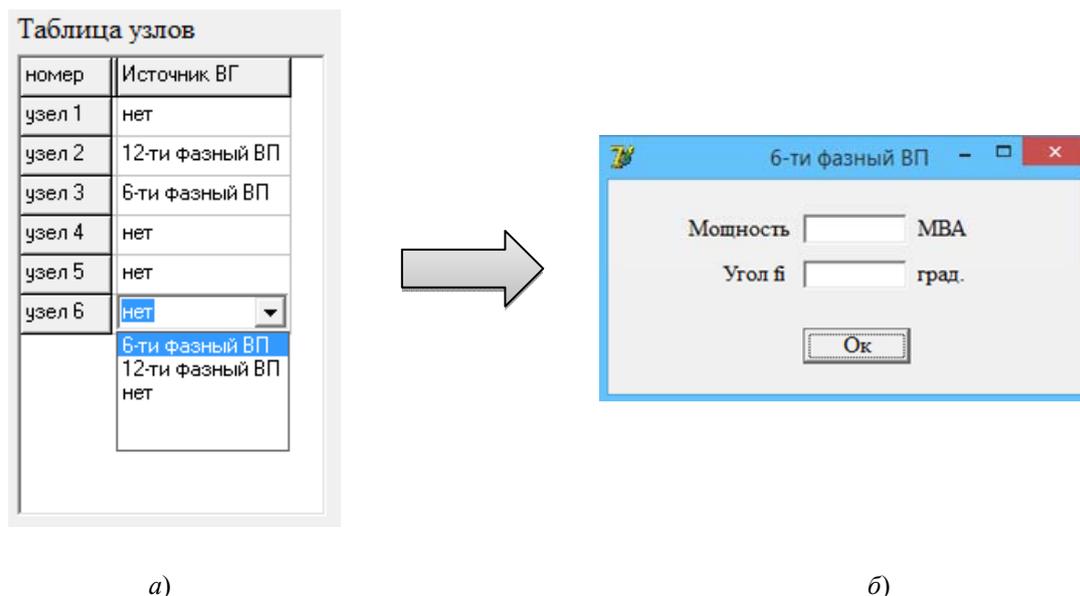


Рис. 5. Форма ввода данных в таблицу:
а – узлов; б – параметров источников высших гармоник

В программе предусмотрен ввод количества и номеров гармоник, для которых следует выполнить расчет.

Программа рассчитывает последовательно для каждой гармоники ток в ветвях и напряжение в узлах схемы.

Результаты расчета программы выводятся в виде таблиц (рис. 6).

Полученные результаты расчета высших гармоник в относительных единицах представляются в виде трех таблиц:

– таблицы действующих значений напряжений каждой гармонической составляющей, а также действующих значений несинусоидальных напряжений в узлах схемы;

– коэффициента несинусоидальности кривой напряжения в узлах схемы;

– таблицы действующих значений токов каждой гармонической составляющей, а также действующих значений несинусоидальных токов в ветвях схемы.

Расчет высших гармонических составляющих для приведенной схемы электропитания показал, что коэффициенты несинусоидальности кривой напряжения в узлах 3 и 4 составляют соответственно 5,63 и 7,69 %, что превышает допустимое значение 5 % (рис. 6).

Из таблицы действующих значений напряжений каждой гармонической составляющей видно, что коэффициент несинусоидальности кривой напряжения в узлах 3 и 4 увеличился из-за 11-й и 13-й гармонических составляющих. Поэтому для снижения коэффициента несинусоидальности кривой напряжения до допустимого значения необходимо установить в этих узлах фильтры 11-й и 13-й гармоник.

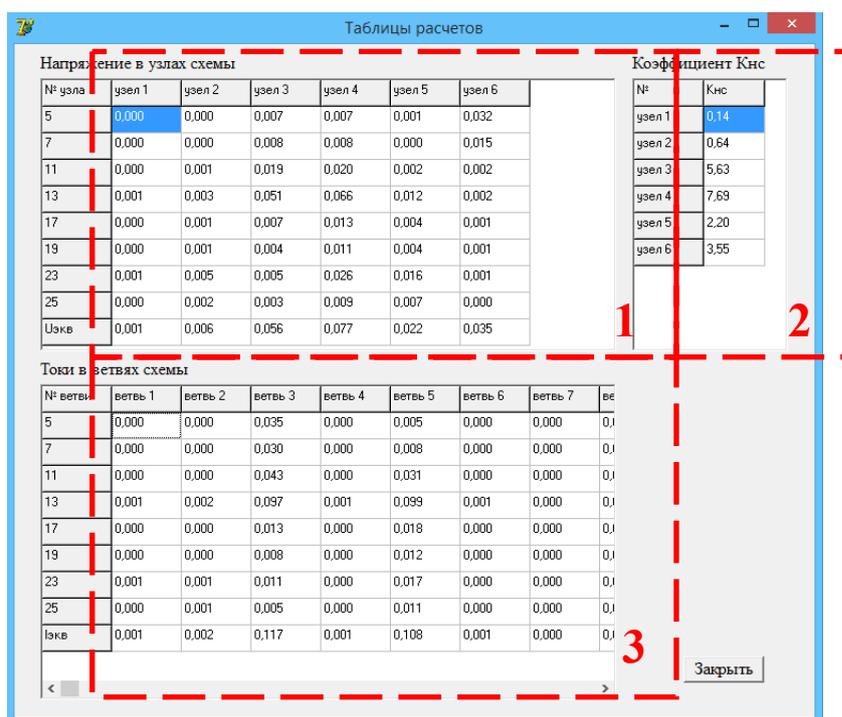


Рис. 6. Результаты расчета программы

Таблица действующих значений токов каждой гармонической составляющей в ветвях схемы показывает, какие ветви наиболее загружены токами высших гармоник. Из анализа полученных расчетов следует, что наиболее загруженными являются 3-я и 5-я ветви. В спектральном составе токов этих ветвей сильно выражены 11-я и 13-я гармоники.

Заключение

Таким образом, разработанное программное обеспечение позволяет:

- оценить степень влияния источников высших гармоник на несинусоидальность напряжения сети;
- сократить время выполнения расчетов за счет автоматизации;
- рассчитать действующее значение напряжения (тока) каждой гармонической составляющей в узлах (ветвях) схемы, а также их эквивалентное значение;
- определить коэффициент несинусоидальности кривой напряжения в узлах схемы;
- прогнозировать значения высших гармоник тока и напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий с нелинейной нагрузкой.

Литература

1. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 331 с. : ил.
2. Гераскин, О. Т. Применение вычислительной техники для расчета высших гармоник в электрических сетях / О. Т. Гераскин, В. В. Черепанов. – М. : ВИПКэнерго, 1987. – 53 с. : ил.
3. Черепанов, В. В. Методы расчета и контроля показателей качества электрической энергии / В. В. Черепанов, В. А. Черепанова. – Горький : ГГУ, 1982. – 92 с.
4. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И. В. Жежеленко [и др.] ; под ред. И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 2007. – 296 с. : ил.

Получено 29.07.2016 г.