

УДК 621.314.672

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ
АДМИНИСТРАТИВНО-БЫТОВЫХ
ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ, ПОТРЕБЛЯЮЩИХ
РЕЗКО НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЙ ТОК**

К. М. МЕДВЕДЕВ

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

Д. В. МАКСИМЕНКО

*Филиал РУП «Гомельэнерго» Гомельские электрические сети,
Республика Беларусь*

Введение

Интерес к проблеме качества электроэнергии в последние годы является общемировой тенденцией. Одной из причин тому является бурный, часто плохо контролируемый рост числа промышленных и бытовых электроустановок и приборов, содержащих в качестве блоков питания преобразователи, выполненные на базе современных устройств силовой электроники. К таким электроприемникам (ЭП) можно отнести преобразователи частоты в установках электропривода, современную компьютерную и бытовую технику (телевизоры, компьютеры, холодильники, стиральные машины, микроволновые печи и т. д.), энергосберегающие компактные люминесцентные лампы и т. д.

Специфика работы таких современных устройств заключается в потреблении ими из питающей сети импульсных, сильно искаженных несинусоидальных токов, содержащих в себе высшие гармоники (ВГ), уровни которых довольно высоки [2], [3], [5]. В качестве примера на рис. 1 представлены осциллограммы токов i , потребляемых из сети некоторыми, всем известными бытовыми электроприемниками, и их гармонические спектры ($I_{(k)}$ – относительные значения токов k -х гармоник). Из рис. 1 видно, что уровни токов ВГ данных электроприемников достаточно высоки и сопоставимы с токами основной частоты.

Анализ характера современной административно-бытовой нагрузки позволяет сделать вывод о том, что в современных жилых домах и административных зданиях практически не осталось приборов и техники, потребляющих из сети чисто синусоидальный ток [1], [2]. Данное обстоятельство дает повод задуматься о вероятных проблемах, связанных с ВГ в электрических сетях таких потребителей. Ведь, несмотря на то, что мощность каждого отдельного такого прибора или устройства мала, суммарная мощность искажений большого их количества может негативно сказаться на работе системы электроснабжения (СЭС).

Можно отметить некоторые негативные последствия проектирования и эксплуатации СЭС новых административных и жилых комплексов без учета нелинейного характера вольт-амперных характеристик современных офисных и бытовых электроприборов:

– заметное искажение синусоидальности кривой питающего напряжения, вследствие чего возрастает частота выхода из строя чувствительного к ВГ оборудования;

- недопустимая перегрузка токами нечетных ВГ, кратных трем (а также токами других ВГ при неравномерной загрузке фаз), нулевых рабочих проводников сети;
- перегрузка и перегрев силовых трансформаторов, мощность и конструкция которых выбраны без учета того, что питаемые электроприемники генерируют высокие значения ВГ;
- ускоренный износ изоляции проводов и кабелей;
- снижение точности показаний счетчиков электроэнергии, которые обычно не рассчитаны на такую высокую степень искажения тока сети.

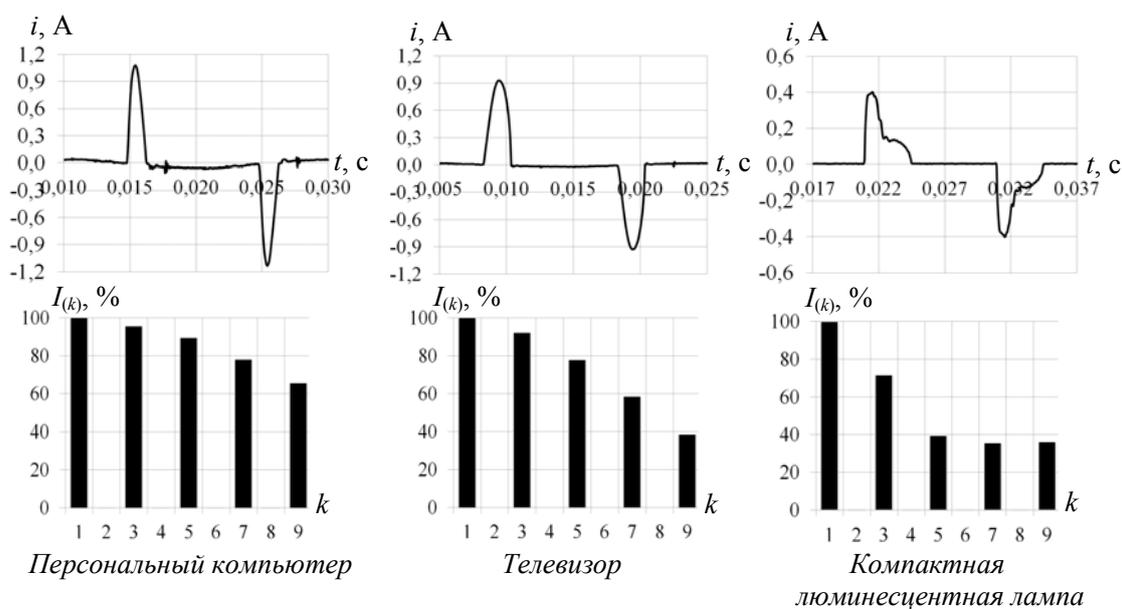


Рис. 1. Осциллограммы и гармонические спектры токов, потребляемых из сети некоторыми однофазными административно-бытовыми электроприемниками

Теоретическая сторона изучения проблемы ВГ в СЭС жилых и административных зданий невозможна без использования математического моделирования, которое позволит получить представление о формах и гармонических спектрах кривых токов и напряжений и возможность анализировать их [4], [6]. В литературных источниках данная проблема освещена не слишком широко, что, с учетом перспективного роста однофазной административно-бытовой нагрузки, делает поиск путей ее решения весьма актуальной задачей.

В данной статье предлагается методика моделирования современных однофазных административно-бытовых ЭП с учетом их работы в условиях конкретной СЭС.

Методика моделирования

Основой моделирования являются аналитические выражения для токов и напряжений административно-бытовых ЭП и СЭС, полученные посредством решения дифференциальных уравнений, а также специальные единичные коммутационные функции, позволяющие выделить и рассчитать отдельные интервалы работы модели. Расчет и построение результирующих кривых токов и напряжений производится с помощью компьютерной программы, написанной в среде MatLab.

Процесс моделирования реализуется в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Для СЭС, показанной на рис. 2, составляется схема замещения с указанием всех параметров (рис. 3): u_c , $u_{тр}$, $u_{эп}$ – напряжения питающей сети, на выходе трансформатора и на зажимах электроприемника; i_c – ток, потребляемый ЭП из сети; $R_{тр}$,

$L_{тр}$, $\Delta u_{тр}$ – активное сопротивление и индуктивность трансформатора, а также падение напряжения на них; $R_{п.ф}$, $L_{п.ф}$, $\Delta u_{п.ф}$ – активное сопротивление и индуктивность фазы питающего проводника, а также падение напряжения на них; $R_{пN}$, $L_{пN}$, $\Delta u_{пN}$ – активное сопротивление и индуктивность нулевого рабочего проводника, а также падение напряжения на них; L_{ϕ} – индуктивность сетевого фильтра; $C_{к}$ – емкость конденсатора фильтра ЭП; $i_{к}$ – ток конденсатора фильтра ЭП; $R_{н}$ – эквивалентное сопротивление нагрузки ЭП; $u_{н}$ – напряжение на конденсаторе фильтра ЭП; $i_{н}$ – ток в эквивалентной нагрузке ЭП.

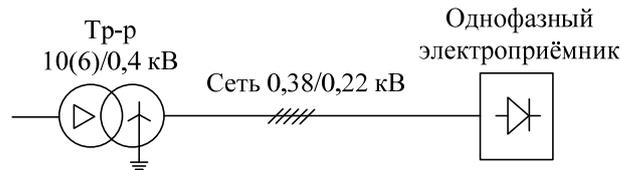


Рис. 2. Система электроснабжения однофазного электроприемника

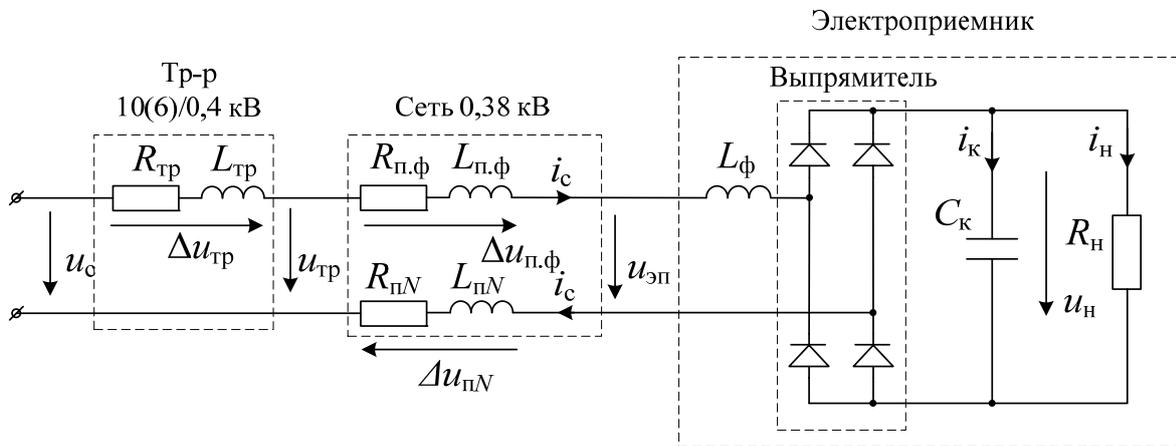


Рис. 3. Схема замещения СЭС и ЭП

2. По схеме на рис. 3 составляются эквивалентные расчетные схемы замещения для двух характерных интервалов работы диодного мостового двухполупериодного выпрямителя, установленного на входе ЭП – интервала проводимости выпрямителя (рис. 4, а) и интервала отсутствия тока в сети (рис. 4, б): R_c , L_c – эквивалентные активное сопротивление и индуктивность СЭС, включающие соответствующие параметры трансформатора и проводников; Δu_c – суммарное падение напряжения на элементах СЭС; ΔU_B – падение напряжения на каждом из двух открытых диодов выпрямителя блока питания ЭП.

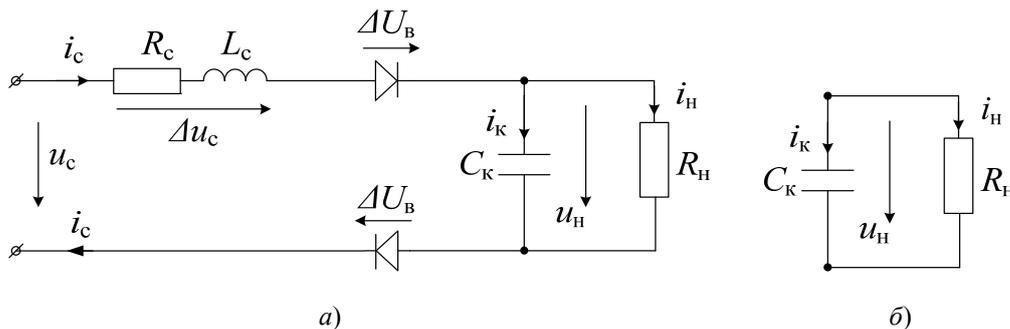


Рис. 4. Расчетные схемы замещения СЭС и ЭП

Интервал проводимости выпрямителя начинается в момент открытия двух из четырех диодов выпрямителя от положительной полуволны фазного напряжения сети, который соответствует углу $\Theta_{отк+}$, и заканчивается в момент их закрытия – $\Theta_{зак+}$ (рис. 5). Этот же угол $\Theta_{зак+}$ соответствует началу интервала отсутствия тока в сети, когда все диоды выпрямителя закрыты.

В момент $\Theta_{отк-}$ происходит открытие двух других диодов выпрямителя от отрицательной полуволны напряжения и начинается второй интервал проводимости выпрямителя, и т. д.

Таким образом, интервал проводимости выпрямителя – от $\Theta_{отк+}$ до $\Theta_{зак+}$, интервал отсутствия тока – от $\Theta_{зак+}$ до $\Theta_{отк-}$.

Токи и напряжения на каждом из двух характерных интервалов описываются своими аналитическими выражениями.

3. В соответствии со схемами замещения на рис. 4 для каждого из двух интервалов составляются уравнения: интервал проводимости – система уравнений (1), интервал отсутствия тока – уравнение (2).

$$\begin{cases} R_c i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + 2\Delta U_B + R_H i_H = u_c; \\ R_c i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + 2\Delta U_B + u_H = u_c; \\ i_c = i_H + i_K; \end{cases} \quad (1)$$

$$C_K \frac{du_H}{dt} + \frac{u_H}{R_H} = 0. \quad (2)$$

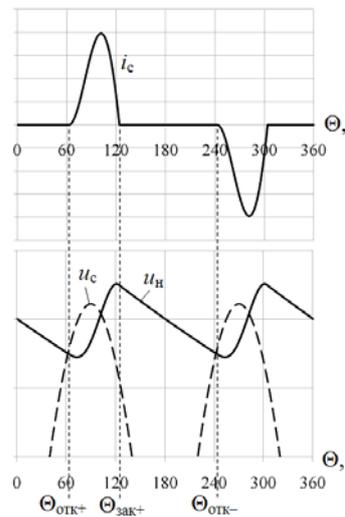


Рис. 5. Интервалы моделирования

Решение системы (1) относительно величины i_c дает аналитическое выражение (3) для тока в сети в режиме проводимости выпрямителя, а решение (2) относительно u_H – аналитическое выражение (4) для напряжения на конденсаторе фильтра на интервале отсутствия тока i_c .

Подставляя (3) и (4) в уравнения (1) и (2), можно получить аналогичные аналитические выражения для всех остальных токов и напряжений, указанных на рис. 3 и 4, для обоих интервалов.

$$i_c(\Theta) = D e^{(\Theta - \Theta_{\text{отк}+})\alpha} \sin [(\Theta - \Theta_{\text{отк}+})\beta + \gamma] + B \sin (\Theta + \varphi + \delta + \psi) - I_d; \quad (3)$$

$$u_n(\Theta) = U_{\text{н max}} e^{(\Theta - \Theta_{\text{зак}+})z}, \quad (4)$$

где Θ – угол, град; $D, \alpha, \beta, \gamma, \delta, \psi, z, I_d$ – параметры, полученные в процессе решения уравнений (1) и (2) и соответствующих преобразований; φ – фазовый угол напряжения питающей сети u_c , град; $U_{\text{н max}}$ – напряжение на конденсаторе фильтра в момент закрытия диодов выпрямителя.

4. Непосредственно перед моделированием задается первое приближение эквивалентного сопротивления нагрузки R_n по выражению

$$R_n = \frac{U_n^2}{P_{\text{ном}}}, \quad (5)$$

где U_n – среднее значение выпрямленного напряжения на конденсаторе фильтра ЭП, которое изначально можно принять близким к амплитудному значению фазного напряжения питающей сети; $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность ЭП.

5. Определяются границы интервала проводимости выпрямителя и интервала отсутствия тока, т. е. находятся углы $\Theta_{\text{отк}+}$, $\Theta_{\text{зак}+}$ и $\Theta_{\text{отк}-}$. Вычисление значений этих углов производится посредством численного решения трансцендентных уравнений, составленных по выражениям (3) и (4) исходя из условий (6), последовательно для нескольких периодов основной частоты до тех пор, пока не закончится переходный процесс:

$$i_c(\Theta_{\text{зак}+}) = 0; \quad u_n(\Theta_{\text{отк}-}) = u_c(\Theta_{\text{отк}-}); \quad \Theta_{\text{отк}+} = \Theta_{\text{отк}-} - 180^\circ. \quad (6)$$

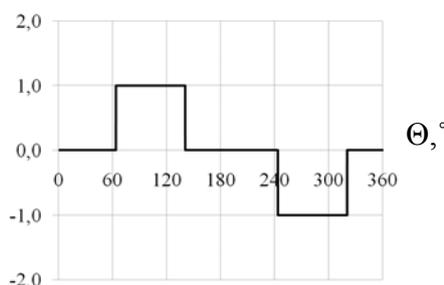


Рис. 6. Единичная коммутационная функция

6. Вычисляются единичные коммутационные функции (рис. 6), умножение которых на соответствующие аналитические выражения токов и напряжений позволяет отображать только те из них, которые необходимо показать именно на данном интервале – интервале проводимости или интервале отсутствия тока.

7. Рассчитывается кривая напряжения на конденсаторе фильтра ЭП u_n , находится его среднее значение U_n , после чего вычисляется следующее приближение сопротивления нагрузки R_n по выражению (5).

Расчеты по пп. 4–7 алгоритма повторяются необходимое число раз до тех пор, пока разница значений U_n на текущем и предыдущем шагах не станет меньше требуемой точности расчета. Таким образом, реализуется итерационный подход к расчету модели.

8. Рассчитываются и строятся кривые всех токов и напряжений, после чего выполняется их гармонический анализ. Результирующие кривые получаются путем умножения суммы соответствующих кривых для каждого из двух интервалов на единичную коммутационную функцию, которая визуализирует ток или напряжение на одном интервале и обнуляет на другом.

Результаты моделирования и их анализ

В качестве примера с помощью разработанной модели был выполнен расчет кривых токов и напряжений в системе электроснабжения группы зданий, в которых одновременно работают 300 компьютеров мощностью 100 Вт каждый, распределенные равномерно между тремя фазами. Здания получают питание от трансформатора 10/0,4 кВ мощностью 100 кВ · А. Таким образом, суммарная полная мощность всех компьютеров составит примерно 50 % мощности трансформатора. Результаты моделирования показаны на рис. 7 и 8.

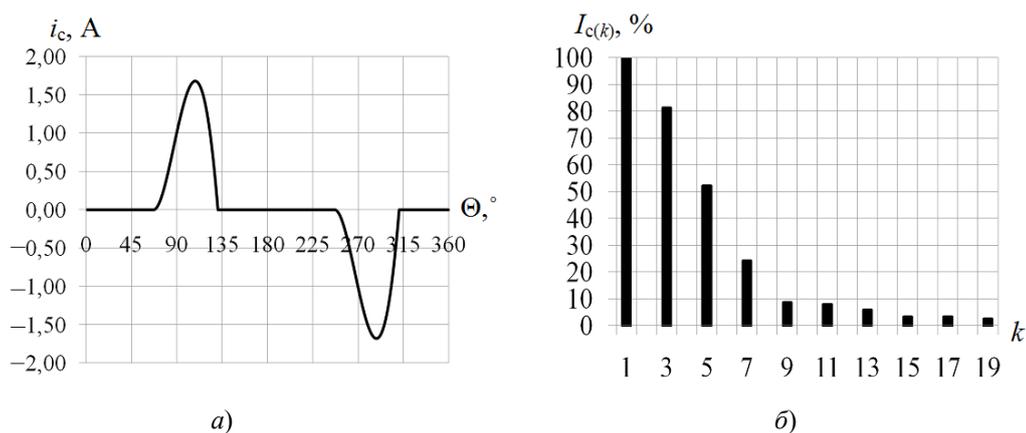


Рис. 7. Кривая (а) и спектр (б) тока компьютера мощностью 100 Вт

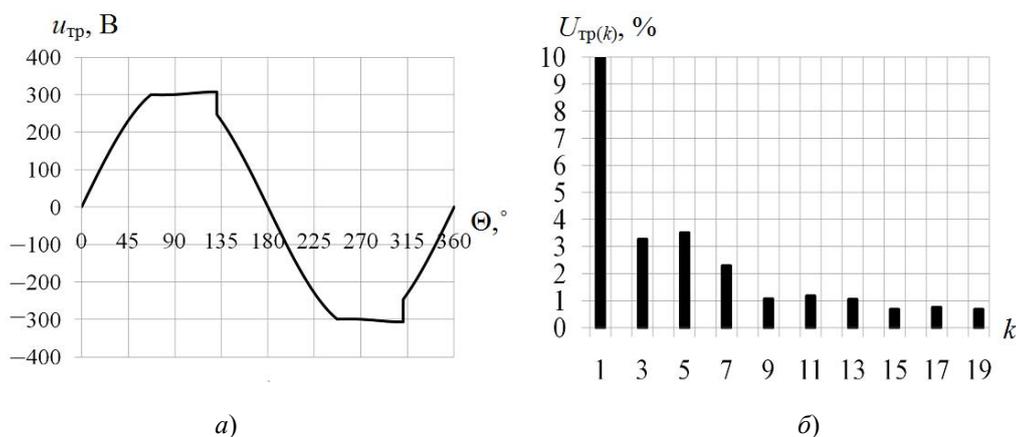


Рис. 8. Кривая (а) и спектр (б) напряжения $u_{тр}$ на выходе трансформатора

Заключение

Авторами статьи разработана математическая модель, позволяющая рассчитывать и анализировать формы кривых токов и напряжений однофазных административно-бытовых электроприемников, потребляющих из питающей сети резко несинусоидальный ток, и СЭС, в условиях которой они работают.

Анализируя результаты моделирования на рассмотренном примере, можно сделать следующие выводы:

– разработанная модель качественно достаточно хорошо отражает форму тока и уровень ВГ однофазных ЭП (рис. 7, а) в сравнении с экспериментальными кривыми (рис. 1); количественные различия обусловлены конструктивными особенностями схемы блока питания каждого отдельного устройства в зависимости от его типа и фирмы-производителя, а также характеристиками конкретной СЭС;

– уровень ВГ тока, потребляемого ЭП (рис. 7, б), достаточно высок: в частности, значение 3-й гармоники сравнимо с током основной частоты, а уровень 5-й гармоники в данном конкретном случае превышает 50 %;

– рассчитанная и построенная кривая напряжения на шинах низшего напряжения трансформатора (рис. 8, а) имеет сильно искаженную форму, что отражается на уровне ее ВГ (рис. 8, б); и хотя уровни отдельных гармоник не превышают значений норм по ГОСТ 13109–97, это не может быть гарантией отсутствия проблем в конкретной ситуации, поэтому исследования в данном направлении должны продолжаться.

Литература

1. Петров, В. М. О влиянии бытовых электроприемников на работу смежных электротехнических устройств / В. М. Петров, Е. Ф. Щербаков, М. В. Петрова // Пром. энергетика. – 1998. – № 4. – С. 28–30.
2. Arrillaga, J. Power system harmonics / J. Arrillaga, N. R. Watson. – Chichester : John Wiley & Sons, Ltd., 2003. – 399 p.
3. Высшие гармоники в системах электроснабжения административных зданий / И. И. Артюхов [и др.] // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки / Національна Академія наук України, Відділення фізико-технічних проблем енергетики. – Київ, 2004. – Частина 4. – С. 28–31.
4. Фираго, Б. И. Исследование входных токов системы «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» в режиме прерывистых токов и несимметрии питающего напряжения / Б. И. Фираго, К. М. Медведев, L. Pawlaczuk // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки / Національна Академія наук України, Відділення фізико-технічних проблем енергетики. – Київ, 2006. – Частина 1. – С. 28–35.
5. Петухов, В. С. Энергосберегающие лампы как источник гармоник тока / В. С. Петухов // Новости электротехники. – 2009. – № 5 (59). – С. 64–66.
6. Svinkunas, G. Simulation of Frequency Converters Operation in Industrial Power Net / G. Svinkunas, K. Medvedev // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas : Technologija, 2012. – No. 1 (117). – P. 65–70.

Получено 08.11.2012 г.