

Electric Power Loss Minimization in Power Supply Systems for the Suburban Houses

Averbukh M.A., Zhilin E.V., Prokopishin D.I.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.
Belgorod, Russian Federation

Abstract. The main purpose of the research is the development and improvement of methods for minimizing power losses for non-sinusoidal and asymmetric modes of operation of power supply systems for suburban houses. To achieve the goal, it has been necessary to make the analysis of existing ways and methods to reduce power losses during non-sinusoidal and asymmetric operation modes. It was proposed to minimize power loss due to the installation of passive and active harmonic filters. The choice of the installation site and the type of the passive harmonic filter was made for the currents of the 3rd and 5th harmonics based on the solution of the two-criteria optimization problem. The calculation of the 3rd and 5th harmonics was completed and after that the value of compensation current was obtained based on the solution of the first part of the optimization problem by the Lagrangian method. The solution of the problem of minimizing the reduced costs by the conjugate gradient method allowed us to choose the type of the passive harmonic filter. Based on the solution of the two-criteria optimization problem, it was proposed to install resonant passive harmonic filters on three supports beginning with the final one, every 100 m. At the same time, the total harmonic current component due to compensation of the 3rd and 5th harmonics decreased to 5.49 %. The installation of four shoulder active harmonic filter on the low-voltage buses of the transformer substation allowed to reduce the total coefficient of harmonic current components to 0.97%.

Keywords: electric power losses, non-sinusoidal, asymmetry, optimization, active harmonic filter, passive harmonic filter, simulation modeling, harmonic components.

DOI: 10.5281/zenodo.1343394

Reducerea pierderilor în sistemele de aprovizionare cu energie electrică a sectorului locativ individual

Averbukh M.A., Jilin E.V., Procopishin D.I.

Universitatea tehnologică de Stat din Belgorod V.G. Shuhov.
or. Belgorod, Federația Rusă

Rezumat. Obiectivul principal al lucrării este dezvoltarea și perfecționarea metodelor de reducere a pierderilor de energie electrică în regimurile nesinusoidale și asimetrice la funcționarea sistemelor de aprovizionare cu energie electrică a sectorului locativ individual. Pentru atingerea scopului propus s-a efectuat analiza metodelor și procedeele existente de reducere a pierderilor de energie electrică la regimurile de funcționare nesinusoidale și asimetrice, totodată fiind efectuate cercetări experimentale ale parametrilor principali ai rețelei și ai indicilor de calitate a energiei electrice. Se propune minimizarea pierderilor de energie electrică din contul instalării filtrelor armonice pasive și active. Alegerea locului și a tipului de instalare a filtrului armonic pasiv se efectuează pentru curenții armonicilor 3 și 5 în baza soluției problemei bi-criteriale de optimizare. A fost efectuat calculul curenților armonicilor 3 și 5 prin metoda potențialelor în noduri și obținute valorile curenților de compensare, în baza soluției primei părți a problemei de optimizare prin metoda Lagrange. Soluționarea problemei de optimizare a minimului de costuri actualizate prin metoda gradientului combinat permite alegerea tipului filtrului armonic pasiv. În baza soluției problemei bi-criteriale de optimizare se propune instalarea filtrelor armonice pasive de rezonanță pe trei piloni, începând cu cel din capăt, peste fiecare 100m. În urma acestora coeficientul sumar al armonicilor componentelor curentului, din contul compensării armonicilor 3 și 5 s-a redus până la 5,49%. Instalarea filtrului armonic activ la barele de joasă tensiune a stației de transformare a permis reducerea coeficientului sumar al armonicilor componentelor curentului până la $K_I = 0,97$ %.

Cuvinte-cheie: sectorul locativ individual, pierderi de energie electrică, nesinusoidalitate, asimetrie, optimizare, filtru armonic activ, filtru armonic pasiv, modelarea prin simulare.

Минимизация потерь электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства

Авербух М.А., Жилин Е.В., Прокопишин Д. И.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
г. Белгород, Российская Федерация

Аннотация. Основной целью работы является развитие и совершенствование методов минимизации потерь электроэнергии при несинусоидальных и несимметричных режимах работы систем электроснабжения индивидуального жилищного строительства. Для достижения поставленной цели

проведен анализ существующих способов и методов снижения потерь электроэнергии при несинусоидальных и несимметричных режимах работы, а также выполнены экспериментальные исследования основных параметров сети и показателей качества электроэнергии. Разработана имитационная модель системы электроснабжения индивидуального жилищного строительства, позволяющая производить исследования режимов работы с использованием различных вариантов технических средств компенсации высших гармоник и токов небаланса. Сформулирована и решена задача оптимизации потерь электроэнергии при несинусоидальных и несимметричных режимах работы системы электроснабжения индивидуального жилищного строительства и обоснован выбор технических средств по минимизации потерь электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства. Предлагается минимизировать потери электроэнергии за счёт установки пассивных и активных фильтров гармоник. Выбор места установки и типа пассивного фильтра гармоник производится для токов 3-й и 5-й гармоник на основании решения двухкритериальной задачи оптимизации. Произведён расчёт токов 3-й и 5-й гармоники, методом узловых потенциалов и получены значения токов компенсации, на основании решения первой части оптимизационной задачи методом Лагранжа. Решение задачи оптимизации минимума приведенных затрат методом сопряжённого градиента, позволяет выбрать тип пассивного фильтра гармоник. На основании решения двухкритериальной задачи оптимизации предлагается установить резонансные пассивные фильтры гармоник, на трех опорах, начиная с конечной, через каждые 100 м. При этом суммарный коэффициент гармонических составляющих тока, за счет компенсации 3-й и 5-й гармоники снизился до 5,49 %. Установка четырехплечевого активного фильтра гармоник на шинах низкого напряжения трансформаторной подстанции позволила снизить суммарный коэффициент гармонических составляющих тока до $K_T = 0,97\%$.

Ключевые слова: индивидуальное жилищное строительство, потери электроэнергии, несинусоидальность, несимметрия, оптимизация, активный фильтр гармоник, пассивный фильтр гармоник, имитационное моделирование.

Введение

В Российской Федерации с 2015 – 2020 годы намечено широкое развитие индивидуального жилищного строительства (ИЖС), которое сопровождается расширением систем электроснабжения и ростом электропотребления. Основными потребителями электроэнергии ИЖС являются бытовые однофазные электроприемники (ОЭП), большинство из которых имеют нелинейные вольтамперные характеристики: энергосберегающие лампы; кондиционерные установки; импульсные источники питания (персональные компьютеры, телевизоры, аудиосистемы); двигатели с регулируемой скоростью вращения (дрели, стиральные машины, пылесосы); установки бесперебойного питания. Как показано в [1 – 3] все они являются источниками высших гармоник тока и напряжения, генерируемых в систему электроснабжения ИЖС. Кроме того, все перечисленные ОЭП являются электроприемниками, питающимися от трехфазной четырехпроводной сети, что приводит к несимметрии токов и напряжений и протеканию тока небаланса в нулевом проводе. В [4 – 6] рассмотрены способы оценки потерь электроэнергии от несимметричного режима работы.

Минимизация потерь электроэнергии в системах электроснабжения ИЖС возможна за счет компенсации несинусоидальных и несимметричных режимов. Для этого используются различные типы фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ): пассивные, гибридные и активные фильтры гармоник.

В [7 – 21] рассматриваются различные подходы к оптимизации пассивных фильтров гармоник. Они подразделяются на одноцелевые задачи [7-13], в которых определяют оптимальные параметры и расположение фильтров и многоцелевые задачи [14 – 21], учитывающие несколько условий: минимальная величина тока искажения, минимальные издержки и т.д.

В данной работе предлагается минимизировать потери электроэнергии за счет решения двухкритериальной задачи оптимизации, позволяющей выбрать место установки ФКУ и тип фильтра с учетом его стоимости, издержек, эксплуатационных затрат и активных потерь в фильтре. Предлагается установка пассивных фильтров гармоник (ПФГ) для компенсации наибольших гармонических составляющих тока искажения, а именно 3-ю и 5-ю гармонику. Остальные включительно по 40-ю

компенсировать с помощью активного фильтра гармоник (АФГ).

В качестве примера на рис.1 представлена однолинейная схема системы электроснабжения ИЖС.

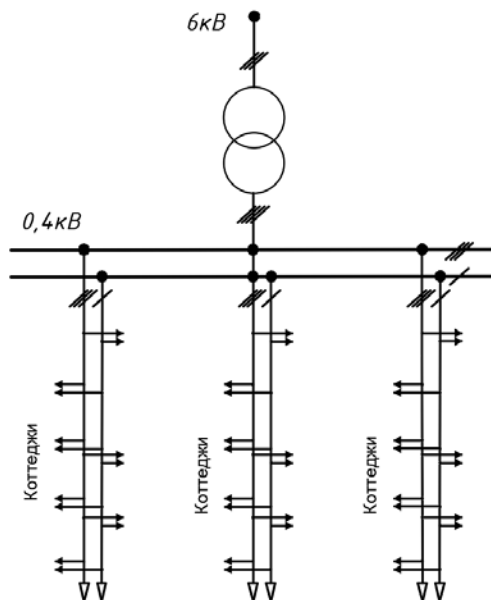


Рис. 1. Однолинейная схема системы электроснабжения ИЖС.

I. РЕШЕНИЕ ДВУХКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ

Целевая функция, минимизации потерь мощности в элементах сети, записывается следующим образом (1), где R'_i — активное сопротивление i -го участка ЛЭП системы электроснабжения ИЖС, $R'_i = R_i \cdot \sqrt{v}$; $I_{(v)i}$ — величина тока искажения на i -м участке линии электропередач (ЛЭП); $I_{k(v)i}$ — требуемая величина тока компенсации на i -м участке ЛЭП.

$$\begin{aligned} \Delta P = & R'_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^n I_{(v)i} - \sum_{i=1}^n I_{k(v)i} \right)^2 + \\ & + R'_2 \cdot \left(\sum_{i=2}^n I_{(v)i} - \sum_{i=2}^n I_{k(v)i} \right)^2 + \\ & + R'_i \cdot \left(\sum_i I_{(v)i} - \sum_i I_{k(v)i} \right)^2 + \\ & + \dots + R'_n \cdot \left(I_{(v)n} - I_{k(v)n} \right)^2 \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (1)$$

Область ограничений целевой функции определена следующими условиями:

$$\begin{cases} |U_1(I_{k(v)})| \leq U_{(1)\Psi} \\ K_U(I_{k(v)}) \leq K_{U\Psi}; \\ K_{2U}(I_{k(v)}) \leq K_{2U\Psi}; \\ K_{0U}(I_{k(v)}) \leq K_{0U\Psi}; \\ \sum_{i=1}^n I_{k(v)i} - I_{k(v)} \approx 0; \\ I_{k(v)} \geq 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $U_{(1)}$ — текущее напряжение прямой последовательности в узле сети; $U_{(1)\Psi}$ — допустимое напряжение прямой последовательности в узле сети; K_{2U} , K_{0U} , K_U — соответственно текущее значение коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности и нулевой последовательности, суммарного коэффициента гармонических составляющих по напряжению. $K_{2U\Psi}$, $K_{0U\Psi}$, $K_{U\Psi}$ — соответственно допустимое значение коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности и нулевой последовательности, суммарного коэффициента гармонических составляющих по напряжению.

Абсолютный экстремум целевой функции находится методом Лагранжа, описанный в [22]. В результате функция принимает следующий вид (3).

Токи искажения v -й гармоники определяются методом узловых потенциалов на основании схемы замещения рис. 2:

$$\begin{aligned} L = & R'_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^n I_{(v)i} - \sum_{i=1}^n I_{k(v)i} \right)^2 + \\ & + R'_2 \cdot \left(\sum_{i=2}^n I_{(v)i} - \sum_{i=2}^n I_{k(v)i} \right)^2 + \\ & + R'_i \cdot \left(\sum_i I_{(v)i} - \sum_i I_{k(v)i} \right)^2 + \\ & \dots + R'_n \cdot \left(I_{(v)n} - I_{k(v)n} \right)^2 + \\ & + \lambda \left(\sum_{i=1}^n I_{k(v)i} - I_{k(v)} \right) \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{(v)} = & \underline{Y}_{B(v)} \cdot (M^T \cdot \\ & \cdot (M \cdot \underline{Y}_{B(v)} \cdot M^T)^{-1} \cdot \\ & \cdot (\dot{J}_{(v)} - M \cdot \underline{Y}_{B(v)} \cdot \dot{E}_{(v)}) + \dot{E}), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\underline{Y}_{B(v)}$ — диагональная матрица комплексных проводимостей ветвей схемы

замещения для ν -й гармоники; M — первая матрица инцидентий; \vec{J} — вектор-столбец комплексных задающих токов в узлах схемы замещения для ν -й гармоники; \vec{E} — вектор-столбец комплексных заданных ЭДС ветвей схемы замещения для ν -й гармоники.

Значения ЭДС для 3-й и 5-й гармоник определены по результатам

экспериментальных данных, представленных в [23], и составили $E_{(3)} = 50$ В и $E_{(5)} = 30$ В.

Результаты расчета токов 3-й и 5-й гармоники, а также результаты решение задачи оптимизации минимума потерь мощности для Линии №1 системы электроснабжения ИЖС представлены в табл.1.

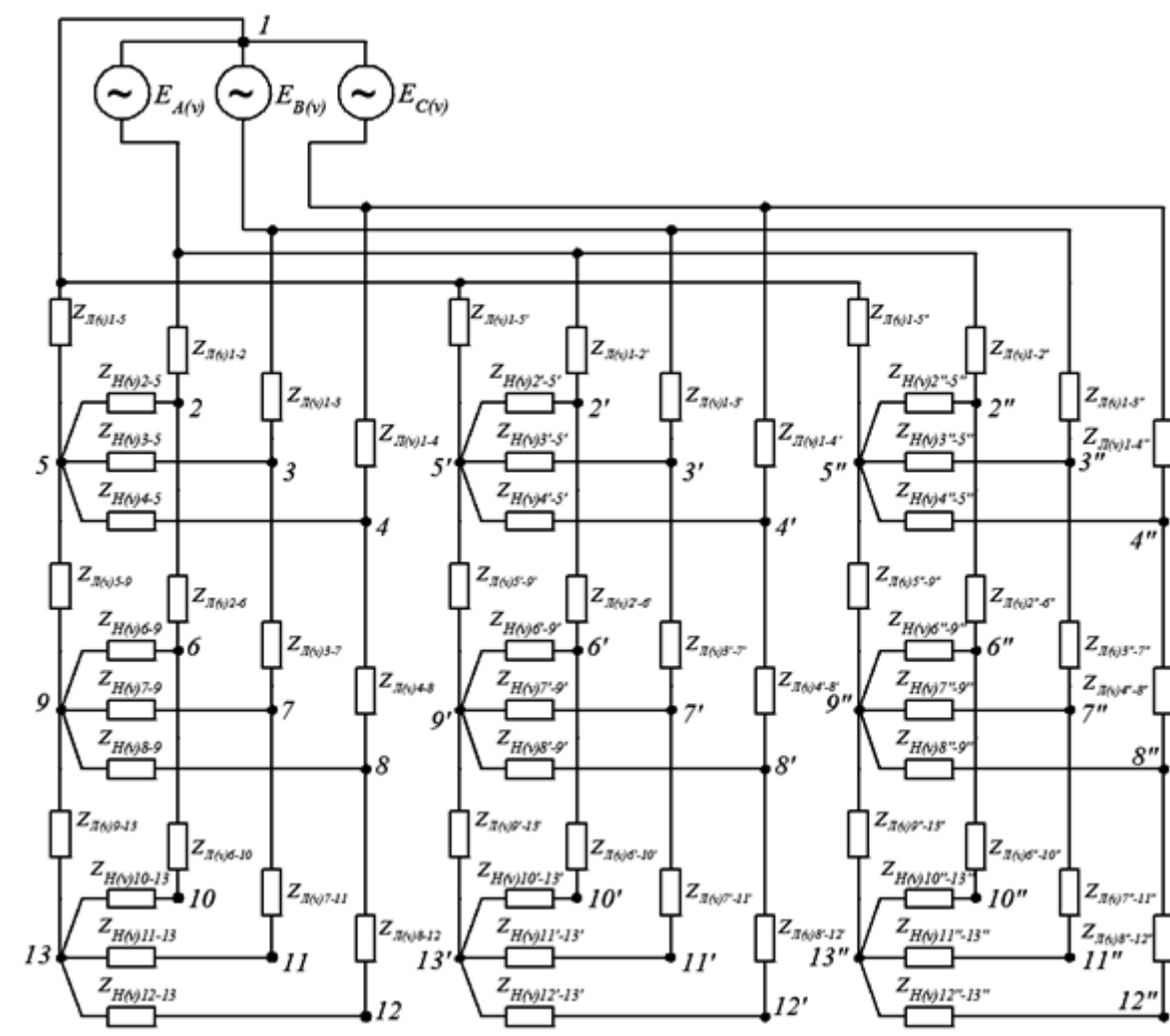


Рис. 2. Схема замещения системы электроснабжения ИЖС для расчёта тока искажения ν -ой гармоники, где $Z_{Н(\nu)}$ и $Z_{Л(\nu)}$ – полное сопротивление нагрузки и ЛЭП, $Z = R \cdot \sqrt{\nu} + jX \cdot \nu$.

Таблица 1

Потери электроэнергии от высших гармоник

ветви	$I_{(3)}$, А	$I_{(5)}$, А	$I_{k(3)}$, А	$I_{k(5)}$, А	ΔP до компенсации, кВт	ΔP после компенсации, кВт
1-2	9,137	3,833	6,382	2,654	12,298	1,193
1-3	8,644	3,602	6,466	2,698	10,974	1,654
1-4	9,135	3,836	6,148	2,551	12,297	1,193
2-5	3,523	1,489			0	
3-5	3,110	1,300			0	
4-5	3,285	1,388			0	
5-1	0,575	0,266			0	
2-6	5,617	2,345	2,943	1,236	4,637	0,965
3-7	5,534	2,302	2,789	1,157	4,495	1,252
4-8	5,852	2,449	2,854	1,191	5,039	1,058
6-9	2,943	1,236			0	
7-9	2,789	1,157			0	
8-9	2,854	1,191			0	
9-5	0,264	0,122			0	
6-10	2,675	1,11	2,675	1,11	1,05	0,332
7-11	2,746	1,145	2,746	1,145	1,11	0,313
8-12	2,998	1,258	2,998	1,258	1,324	0,391
10-13	2,675	1,11			0	
11-13	2,746	1,1449			0	
12-13	2,998	1,258			0	
13-9	0,337	0,1506			0	
Итого					53,224	8,351

Как следует из табл. 1. в результате компенсации токов искажения дополнительные потери электроэнергии в элементах системы электроснабжения ИЖС снизились на 84 %.

Для компенсации 3-й и 5-й гармоник токов, а также несимметричных режимов работы в системе электроснабжения ИЖС рассмотрены три ПФГ: резонансный, широкополосный и широкополосный фильтр С-типа.

Выбор типа ПФГ осуществляется по минимуму приведённых затрат, путем решения целевой функции:

$$Z = \sum_{i=1}^n C_i(I_i) \cdot I_i \rightarrow \min; \quad (5)$$

с областью ограничения:

$$i = \overline{1, \dots, n}, \quad n = 3; \quad (6)$$

$$C_i(I_i) = \begin{cases} a_1 \cdot I_1 + b_1 \\ a_2 \cdot I_2 + b_2; \\ a_3 \cdot I_3 + b_3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 < I_1 < I_k \\ 0 < I_2 < I_k; \\ 0 < I_3 < I_k \end{cases} \quad (7)$$

$$I_k = \sqrt{I_{k(3)}^2 + I_{k(5)}^2},$$

где $C_i(I_i)$ — приведенные затраты на установку i -го ФКУ; I_i — ток i -го типа фильтра; I_k — технически реализуемые пределы компенсации тока; a_i и b_i — угловые и постоянные коэффициенты удельной стоимости с учетом издержек, эксплуатационных затрат и потерь электроэнергии в i -ом ФКУ; $I_{k(3)}$ и $I_{k(5)}$ — токи 3-й и 5-й гармоник.

С учетом величины реактивной мощности, технически реализуемые пределы компенсации тока искажения ПФГ, составляют 50 А.

Для рассматриваемых ПФГ приведенные затраты с учетом издержек, эксплуатационных затрат и потерь электроэнергии в фильтре составили:

$$\begin{cases} C_1(I_1) = 0,001 \cdot I_1 + 0,769; \\ C_2(I_2) = 0,001 \cdot I_2 + 0,826; \\ C_3(I_3) = 0,001 \cdot I_3 + 0,876. \end{cases} \quad (8)$$

Тогда целевая функция минимума приведенных затрат приобретет следующий вид:

$$Z = 0,001I_1^2 + 0,769I_1 + 0,001I_2^2 + 0,826I_2 + 0,001I_3^2 + 0,867I_3. \quad (9)$$

Решение целевой функции минимума затрат произведено методом сопряженных градиентов [24]. Минимум целевой функции в заданной области ограничений достигнут при следующих значениях токов компенсации каждого фильтра:

$$I_1 = 39,25 \text{ A}; I_2 = 10,75 \text{ A}; I_3 = 0 \text{ A}.$$

Исходя из решения, наиболее оптимальным является использование первого типа фильтра, поэтому к установке принимается резонансный тип ПФГ. В этом случае затраты будут минимальными и составят:

$$Z = 40,719 \text{ тыс. руб.}$$

II. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для анализа потерь электроэнергии выполнено имитационное моделирование системы электроснабжения ИЖС с установкой резонансных ПФГ, марки HF1K 13-400, номинальным напряжением 400 В и током 19 А, на трех опорах, начиная с конечной, через каждые 100 м ЛЭП 0,4 кВ в пакете Matlab&Simulink.

Результаты имитационной модели системы электроснабжения ИЖС без использования ПФГ и при подключении выбранных резонансных фильтров представлены на рис. 3.

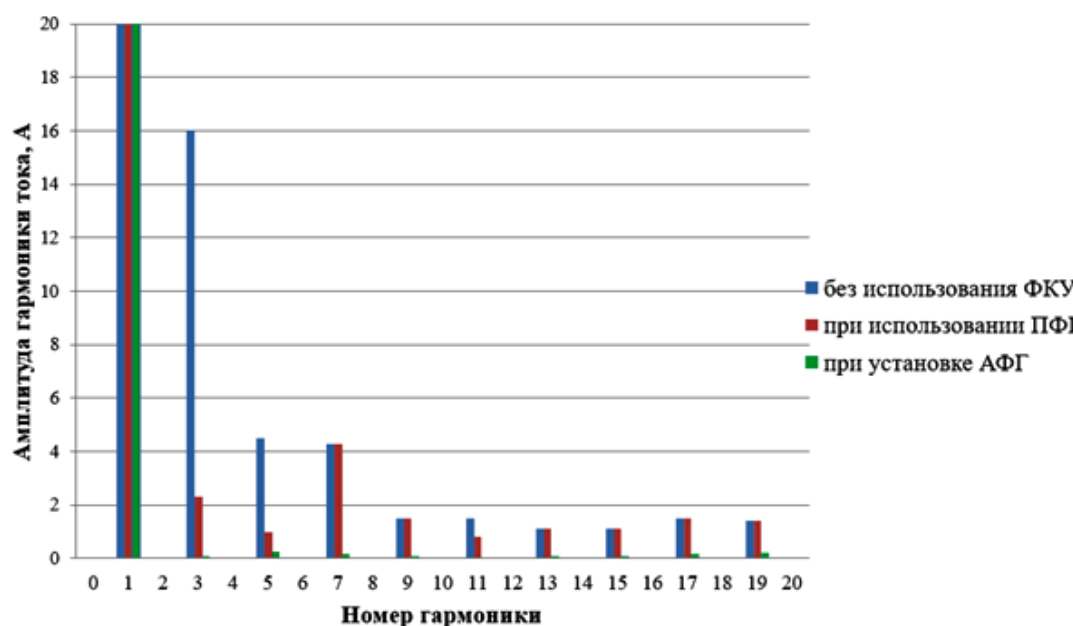


Рис. 3. Гистограмма токов высших гармоник системы электроснабжения ИЖС.

Установка ПФГ на трех конечных опорах ЛЭП 0,4 кВ в системе электроснабжения ИЖС позволила уменьшить токи третьей и пятой гармоник соответственно до 2,2 % и 1%. В результате суммарный коэффициент гармонических составляющих тока с 17,06 % снизился до 5,49 %. Также ПФГ позволяет компенсировать ток небаланса, за счет снижения гармоник кратным трем.

Для ограничения влияний токов высших гармоник и несимметрии на потери в трансформаторах и линий связи подстанций с внешней системой электроснабжения, а также повышение коэффициента мощности на входе системы электроснабжения ИЖС со стороны 0,4 кВ до стандартных значений, дополнительно к ПФГ предлагается установить АФГ на шинах низкого напряжения трансформаторной подстанции.

Описание устройства АФГ для трёхфазных четырёхпроводных систем представлено в [25-27]. Результаты моделирования системы электроснабжения ИЖС с установкой ПФГ и АФГ представлены на рис. 3.

Установка АФГ на шинах трансформаторной подстанции снизило гармоническое искажение тока, протекающего через трансформатор до 0,97 % и уменьшает ток нулевого провода до значений близких к нулю.

Заключение

1. В результате решения двухкритериальной задачи оптимизации потерь электроэнергии с использованием ФКУ предложено установить резонансные ПФГ марки НФ1К 13-400, номинальным напряжением 400 В и током 19 А, на трех опорах, начиная с конечной, через каждые 100 м. При этом суммарный коэффициент гармонических составляющих тока, за счет компенсации 3-й и 5-й гармоники снизился до 5,49 %.

2. Установка четырех плечевого АФГ на шинах 0,4 кВ трансформаторной подстанции марки MaxSine 60A-4L*2 мощностью 40 кВА и током нейтрали 120 А, позволила снизить суммарный коэффициент гармонических составляющих тока на шинах 0,4 кВ трансформаторной подстанции $K_I = 0,97$ %, а также ток небаланса до значений близких к нулю.

ACKNOWLEDGMENT

Статья подготовлена в рамках программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

Литература (References)

[1] Radakovic Z., Topalis F. V., Kostic M. The voltage distortion in low-voltage networks caused by compact fluorescent lamps with electronic gear. *Electric Power Systems Research*, 2005, vol. 73, no. 2, pp. 129-136.

[2] Blanco A. M., Yanchenko S., Meyer, J., Schegner P. The impact of supply voltage distortion on the harmonic current emission of non-linear loads // *Dyna*, 2015, vol. 82, no. 192, pp. 150-159

[3] Bhattacharyya S., Cobben J. F. G., Kling W. L. Harmonic current pollution in a low voltage network. *Power and Energy Society General Meeting*, 2010 IEEE. IEEE, 2010, pp. 1-8.

[4] Sainz L., Pedra J., Mesas J. J. Study of neutral conductor current in three-phase networks with single-phase converters // *IEEE transactions on*

power delivery, 2006, vol. 21, no. 3, pp. 1466-1476.

[5] Desmet J., Sweertvaegher I., Vanalme G., Stockman K., Belmans R., "Analysis of the neutral conductor current in a three-phase supplied network with nonlinear single-phase loads", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2003, vol. 39, no. 3, pp. 587-593.

[6] Bina M. T., Kashefi A. Three-phase unbalance of distribution systems: Complementary analysis and experimental case study / *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2011, vol. 33. no. 4, pp. 817-826.

[7] Chen Q., Chen Z., McCormick M. The application and optimization of C-type filter in a combined harmonic power filter *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual. – IEEE*. Aachen, Germany, 2004, vol.2, pp. 1041-1045.

[8] Ruihua Z., Yuhong L., Yaohua L. Optimal parameters for filter using improved genetic algorithms *Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN'09. International Conference on. – IEEE*. Nanjing, China, 2009, pp.1-5.

[9] Kovernikova L. I., Thanh N. C. An optimization approach to calculation of passive filter parameters based on particle swarm optimization *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12)*. Santiago de Compostela, Spain, 2012, vol. 1, no. 10, pp. 605-610.

[10] Na H., Lina, H., Jian, W., & Dianguo, X. Study on optimal design method for passive power filters set at high voltage bus considering many practical aspects *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2008. APEC 2008. Twenty-Third Annual IEEE. – IEEE*. Austin, TX, USA, 2008, pp. 396-401.

[11] Kumar B. S., Reddy K. R. The application of particle swarm optimization to passive power filter design for 3 phase 4-wire system with balance and unbalance load // *IJEETC*, 2012, vol. 1, no. 1, pp. 54-65.

[12] Maza-Ortega J. M., Churio-Barboza J. C., Burgos-Payán M. A software-based tool for optimal design of passive tuned filters *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on. – IEEE*. Bari, Italy, 2010, pp. 3273-3278

[13] Aleem S. H. E. A., Zobaa A. F., Aziz M. M. A. Optimal C-type passive filter based on minimization of the voltage harmonic distortion for nonlinear loads // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, vol. 59, no. 1, pp. 281-289.

[14] Ghiasi M., Rashtchi V., Hoseini S. H. Optimum location and sizing of passive filters in distribution networks using genetic algorithm *Emerging Technologies, 2008. ICET 2008. 4th International*

- Conference on. – IEEE. Rawalpindi, Pakistan, 2008, pp. 162-166.
- [15] Yue H., Li G., Zhou M., Wang K., Wang J. Multi-objective optimal power filter planning in distribution network based on fast nondominated sorting genetic algorithms *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on. – IEEE.* Weihai, Shandong, China, 2011, pp. 234-240.
- [16] Li S., Li Y., Luo X., Zeng L., He Z. Multi-objective optimal design for passive power filters in hybrid power filter system based on multi-island particle swarm optimization *Power Electronics and Motion Control (IPEMC), 2012 7th International. – IEEE,* 2012, vol. 4, pp. 2859-2863.
- [17] Ji J., Liu H., Zeng G., Zhang, J. The multi-objective optimization design of passive power filter based on PSO *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific. – IEEE.* Shanghai, China, 2012, pp. 1-4.
- [18] Balci M. E., Sakar S. Optimal design of single-tuned passive filters to minimize harmonic loss factor *Middle East Journal of Scientific Research,* 2014, vol. 21, no. 11, pp 2149-2155.
- [19] Na H., Xu D., Huang L. The application of particle swarm optimization to passive and hybrid active power filter design *IEEE transactions on industrial electronics,* 2009, vol. 56, no. 8, pp. 2841-2851.
- [20] Sharaf A. M., El-Gammal A. A. A. A discrete particle swarm optimization technique (DPSO) for power filter design *Design and Test Workshop (IDT), 2009 4th International. – IEEE,* 2009, pp. 1-6.
- [21] Churio-Barboza J. C., Maza-Ortega J. M., Burgos-Payán M. Optimal design of passive tuned filters for time-varying non-linear loads] *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2011 International Conference on. – IEEE.* Malaga, Spain, 2011, pp. 1-6.
- [22] Bertsekas D. P. *Constrained optimization and Lagrange multiplier methods,* Academic press, 1996. 410 p.
- [23] Averbukh M.A., Zhilin E.V., Roschubkin P.V. Experimental Analysis of Electrical Modes in a Residential Estate Electrical Power Supply System. *Journal of Engineering and Applied Sciences,* 2017 no 12. pp. 3446-3451.
- [24] Nocedal J., Wright S. J. Conjugate gradient methods. *Numerical optimization.* 2006, pp. 101-134.
- [25] Rodriguez P., Candela J. I., Luna A., Asiminoaei L., Teodorescu R., and Blaabjerg F., Current harmonics cancellation in three-phase fourwire systems by using a four-branch star filtering topology, *IEEE Trans. Power Electron.,* vol. 24, no. 8, pp. 1939–1950, Aug. 2009.
- [26] Tangtheerajaronwong W., Hatada T., Wada K., H. Akagi, “Design and performance of a transformerless shunt hybrid filter integrated into a three-phase diode rectifier,” *IEEE Trans. Power Electron.,* vol. 22, no. 5, pp. 1882–1889, Sep. 2007.
- [27] Xu Q., Zhong X., Yao W., Chen G. High precision control strategy for three-phase four-wire Shunt Active Power Filter Industrial Electronics (ISIE), 2014 IEEE 23rd International Symposium on. – IEEE. Istanbul, Turkey, 2014. pp. 509-514.

Сведения об авторах.



Авербух Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетики и автоматики» БГТУ им. В.Г. Шухова. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, разработка силовых схем и систем управления фильтрокомпенсирующими устройствами, имитационное моделирование.
E-mail: avers45@rambler.ru



Прокопишин Дмитрий Игоревич, аспирант кафедры «Электроэнергетики и автоматики» БГТУ им. В.Г. Шухова. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, имитационное моделирование.
E-mail: prokopishin.dmitrij@yandex.ru



Жилин Евгений Витальевич, аспирант кафедры «Электроэнергетики и автоматики» БГТУ. Область научных интересов: качество электроэнергии, моделирование
E-mail: zhilinevg@mail.ru