

# ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ



УДК 621.316

**Е.А. Сбитнев, В.Л. Осокин**  
Ye.A. Sbitnev, V.L. Osokin

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В СРЕДЕ MATLAB

### MODELING OF ELECTRIC NETWORK PARAMETERS IN AGRICULTURAL ENTERPRISES IN MATLAB ENVIRONMENT

**Ключевые слова:** сельское хозяйство, высшие гармоники, снижение качества электрической энергии, нелинейные нагрузки, несинусоидальность, схема замещения, проектирование, виртуальная модель.

В связи с ростом доли нелинейной нагрузки в сетях сельскохозяйственных предприятий увеличивается значение суммарного коэффициента гармонических составляющих. Источником высших гармоник, как правило, являются регулируемые водонагреватели, электронные балласты газоразрядных ламп среднего и высокого давления, электроприводы с регулируемой скоростью вращения. Наряду с этим качество электрической энергии также зависит от параметров питающей сети. На начальном этапе работы по улучшению качества электрической энергии конкретного объекта вместо реальных инструментальных обследований возможно применение виртуальной компьютерной модели, созданной на основе реальной схемы электроснабжения. Основная цель разработки виртуальной модели электрической сети – выявление источника высших гармоник. В основе расчетов закладывается однофазная схема замещения, составленная исходя из реальной обобщен-

ной схемы электрической сети. Параметры элементов для схемы могут изменяться в различных пределах, характерных для сельскохозяйственных предприятий. Схема упрощается относительно исследуемой точки. При моделировании используются параметры на основной гармонике. Модель содержит блоки, входящие в библиотеки среды Simulink. Нагрузка моделируется тремя блоками. Блок «Нелинейная нагрузка» представляет из себя sub-систему, состоящую из двух трехфазных управляемых выпрямителей, подключенных через трансформаторы для возможности различного соединения обмоток. Блок «Three-PhaseSeriesRLCLoad» имитирует активно-индуктивную несимметричную трехфазную нагрузку. Блок «Zлин» моделирует трехфазную симметричную линейную нагрузку. Виртуальная модель позволяет изменять параметры как внешней питающей сети, так и каждого вида нагрузки в реальном времени под любое конкретное предприятие с предварительным расчетом схемы замещения. Анализ спектра гармоник виртуальной модели выявляет основной источник нелинейных искажений в сети сельскохозяйственного объекта в виде электроприводов с регулируемой скоростью вращения и регулируемых водонагревателей.

**Keywords:** *agricultural industry, higher harmonics, decrease of electric power quality, nonlinear loads, nonsinusoidality, equivalent circuit, design, virtual model.*

Due to increasing share of nonlinear loads in the networks of agricultural enterprises, the value of total coefficient of harmonious components is increased. As a rule, a source of the higher harmonics is adjustable water heaters, electronic ballasts of medium and high pressure gas-discharge lamps, and electric drives with adjustable speed of rotation. In addition, the quality of electric energy also depends on power line parameters. At the initial stage of improving electric energy quality of a specific object, it is possible to use virtual computer model created on the basis of the real scheme of power supply instead of real instrumental examinations. The main objective of developing virtual model of electric network is source identification of the higher harmonics. At the basis of calculations there is single-phase equivalent circuit made from the real generalized scheme of

electric network. The parameters of elements for the scheme may change in various limits characteristic of the agricultural enterprises. The scheme is simplified relating to the studied point. In modeling parameters on the main harmonica are used. The model contains the blocks from the libraries of Simulink environment. The load is modeled by three blocks. The block "Non-linear Load" is the sub-system consisting of two three-phase operated rectifiers connected via transformers of various winding connection. The block "Three-Phase Series RLC Load" simulates active and inductive asymmetrical three-phase load. The block "Zlin" models three-phase symmetric linear load. The virtual model enables to change parameters of both external power line, and each type of load in real time for any specific enterprise with preliminary calculation of the equivalent circuit. Spectrum analysis of the harmonics of the virtual model reveals the main source of non-linear distortions in network of an agricultural object in the form of electric drives with adjustable rotation speed and adjustable heaters.

**Сбитнев Евгений Александрович**, ст. преп., каф. «Электрификация и автоматизация», Нижегородский государственный инженерно-экономический университет. E-mail: evgenij.sbitnev@yandex.ru.

**Осокин Владимир Леонидович**, к.т.н., доцент, зав. каф. «Электрификация и автоматизация», Нижегородский государственный инженерно-экономический университет. E-mail: oskinvl@mail.ru.

**Sbitnev Yevgeniy Aleksandrovich**, Asst. Prof. Chair of Electrification and Automation, Nizhny Novgorod State Engineering-Economic University. E-mail: evgenij.sbitnev@yandex.ru.

**Osokin Vladimir Leonidovich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chair of Electrification and Automation, Nizhny Novgorod State Engineering-Economic University. E-mail: oskinvl@mail.ru.

### Введение

Проблема увеличения высших гармоник в электрических сетях сельскохозяйственных предприятий становится все более актуальной в связи с увеличением доли нелинейной нагрузки.

Согласно действующему ГОСТ 32144-2013 [1] коэффициенты и значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения не должны превышать установленные значения, приведенные в таблицах 1 и 2, более чем в 1,5 раза в течение всего времени измерений. Напряжения гармонических составляющих, изменяющиеся во времени, определяются в точках передачи электрической энергии [2].

Согласно проведенным инструментальным обследованиям типового сельскохозяйственного объекта [3], источником искажения являются нелинейные нагрузки, такие как регулируемые водонагреватели, электронные балласты газоразрядных ламп среднего и высокого давления, электроприводы с регулируемой скоростью вращения. Наряду с этим качество электрической энергии также зависит от параметров питающей сети. На рисунке 1 изображены осциллограммы напряжения и тока типового сельскохозяйственного предприятия.

На сегодняшний день достаточно острым остается вопрос определения доли потребителя и питающей сети в нелинейные искажения. Реальные инструментальные обследования и анализ режимов таких электрических систем являются дорогой и трудоемкой задачей. Поэтому на начальном этапе работы по улучшению качества электрической энергии конкретного объекта значительную помощь может принести применение виртуальной компьютерной модели, созданной на основе реальной схемы электроснабжения. В качестве наиболее подходящей среды для моделирования параметров электрической сети сельскохозяйственного предприятия был выбран программный комплекс MATLAB, содержащий в себе графическую среду Simulink, которая позволяет структурно моделировать электрическую систему. Приложение Simulink является инструментом, с помощью которого можно объединять блоки, соответствующие отдельным элементам динамической системы в единое целое, и изучать их поведение во времени [4]. Наряду с различными параметрами моделирования имеется возможность задать способ изменения времени моделирования (с постоянным или переменным ша-

гом). В процессе изучения смоделированной системы также можно наблюдать за процессами, происходящими в системе с помощью отдельных окон, которые входят в библиотеку Simulink. Различные характеристики могут быть представлены как в графической, так и в числовой форме.

Разработка виртуальной модели электрической сети сельскохозяйственного предприятия имеет следующие цели:

- выявление источника высших гармоник в электрической сети;
- создание модели электрической сети, которая в дальнейшем может быть скорректирована для любого конкретного предприятия;
- подтверждение реальных проведенных инструментальных обследований.

Таблица 1

Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_{U(n)}$

Порядок гармонической составляющей n	Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ , % $U_1$			
	Напряжение электрической сети, кВ			
	0,38	6-25	35	110-220
Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения некрратных трем				
5	6	4	3	1,5
7	5	3	2,5	1
11	3,5	2	2	1
13	3,0	2	1,5	0,7
17	2,0	1,5	1	0,5
19	1,5	1	1	0,4
23	1,5	1	1	0,4
25	1,5	1	1	0,4
> 25	1,5	1	1	0,4
Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения кратных трем				
3	5	3	3	1,5
9	1,5	1	1	0,4
15	0,3	0,3	0,3	0,2
21	0,2	0,2	0,2	0,2
> 21	0,2	0,2	0,2	0,2
Значения коэффициентов напряжения четных гармонических составляющих				
2	2	1,5	1	0,5
4	1	0,7	0,5	0,3
6	0,5	0,3	0,3	0,2
8	0,5	0,3	0,3	0,2
10	0,5	0,3	0,3	0,2
12	0,2	0,2	0,2	0,2
> 12	0,2	0,2	0,2	0,2

Таблица 2

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения  $K_U$

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_U$ , %			
Напряжение электрической сети, кВ			
0,38	6-25	35	110-220
8,0	5,0	4,0	2,0

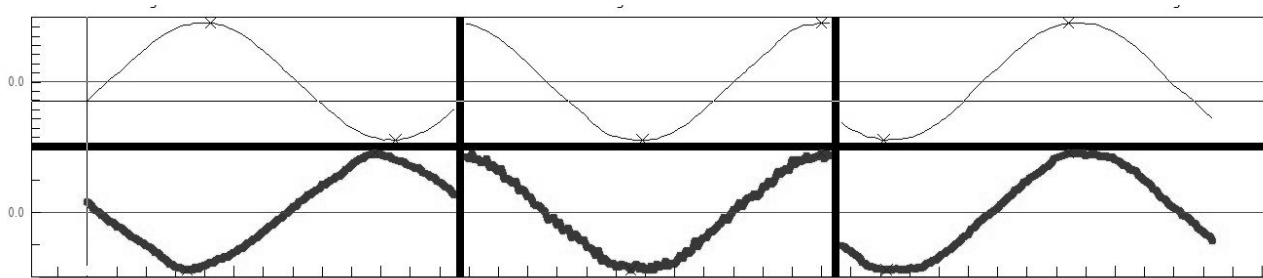


Рис. 1. Оциллограммы фазного напряжения и тока сельскохозяйственного предприятия

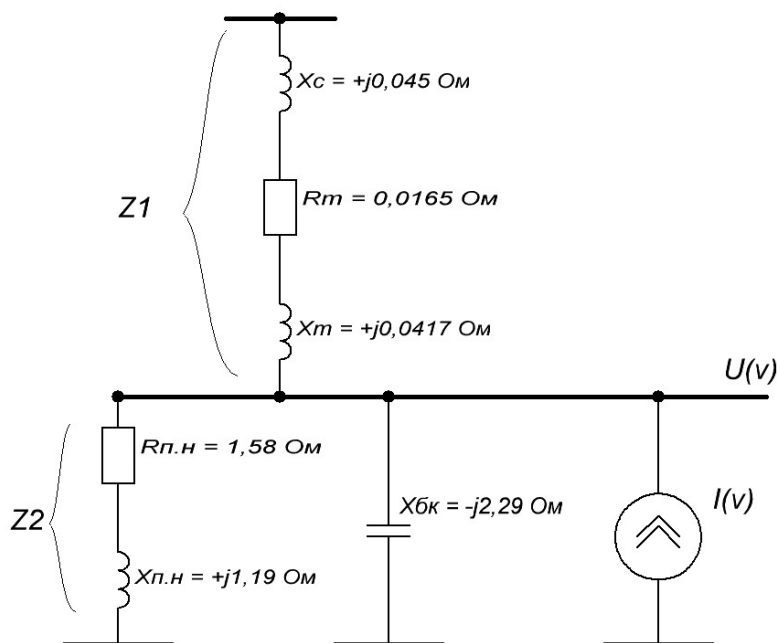
**Экспериментальная часть**

В основе расчета была положена реальная обобщенная схема электрической сети сельскохозяйственного предприятия, сформированная авторами из результатов обследований схем электроснабжения. По данным расчетов обобщенной схемы составлена принципиальная однофазная схема замещения, представленная на рисунке 2, где элементы системы представляются в виде последовательных и параллельных соединений R, L, C элементов, приведенных к напряжению 0,4 кВ.

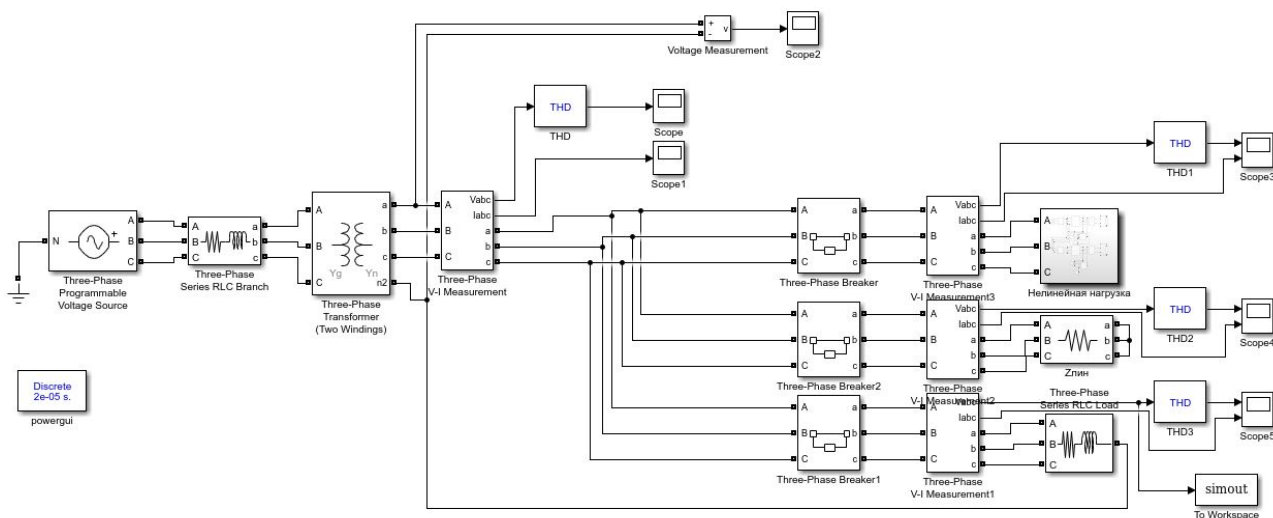
Параметры элементов для схемы могут изменяться в различных пределах, характерных для сельскохозяйственных предприятий. Так как основной целью работы явля-

ется выявление источника высших гармоник в сети, схема замещения упрощена относительно исследуемой точки. При моделировании виртуальной схемы использовались параметры схемы замещения предприятия на основной гармонике, содержащего нелинейную нагрузку в виде регулируемых водонагревателей, электронных балластов газоразрядных ламп среднего и высокого давления, электроприводов с регулируемой скоростью вращения.

На рисунке 3 представлена модель трехфазной электрической сети сельскохозяйственного предприятия с нелинейной и несимметричной нагрузкой.



**Рис. 2. Однофазная схема замещения сети**



**Рис. 3. Виртуальная модель трехфазной электрической сети с нелинейной и несимметричной нагрузкой**

Модель содержит стандартный блок «Three-PhaseProgrammableVoltageSource», который вырабатывает трехфазную систему напряжений 10 кВ с программируемыми во времени изменениями амплитуды, фазы и частоты, а также гармонического состава. Блок «Линия» задает сопротивление внешней сети системы. Стандартный блок «Three-PhaseTransformer» задает параметры трехфазного двухобмоточного трансформатора с номинальной мощностью 160 кВ·А. Блок «Three-Phase V-I Measurement» служит для измерения напряжений и токов в трехфазной цепи. Блок «Three-Phase Breaker» моделирует трехфазное устройство включения и вы-

ключения переменного тока, управляемого одним сигналом.

Нагрузка моделируется двумя блоками. Блок «Нелинейная нагрузка» (рис. 4) представляет из себя sub-систему, состоящую из двух трехфазных управляемых выпрямителей, подключенных через трансформаторы для возможности различного соединения обмоток.

Блок «Three-PhaseSeriesRLCLoad» имитирует активно-индуктивную несимметричную трехфазную нагрузку, блок «Zлин» – трехфазную симметричную линейную нагрузку.

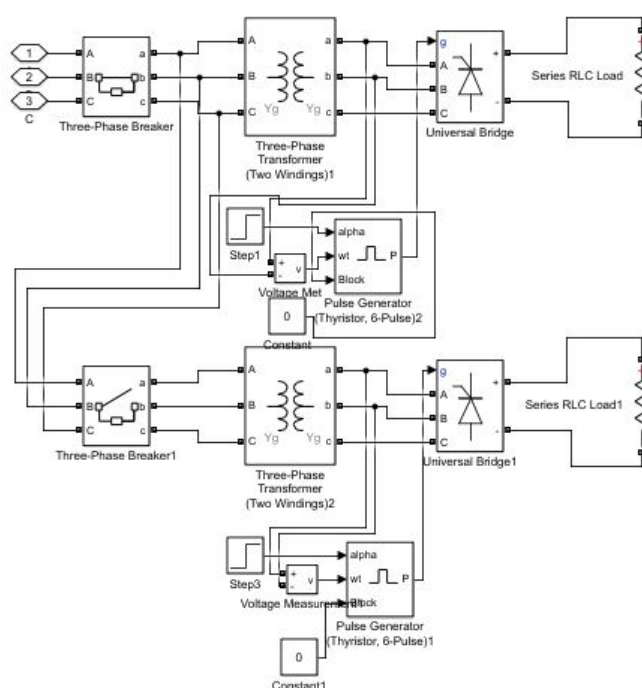


Рис. 4. Sub-система, моделирующая нелинейную нагрузку

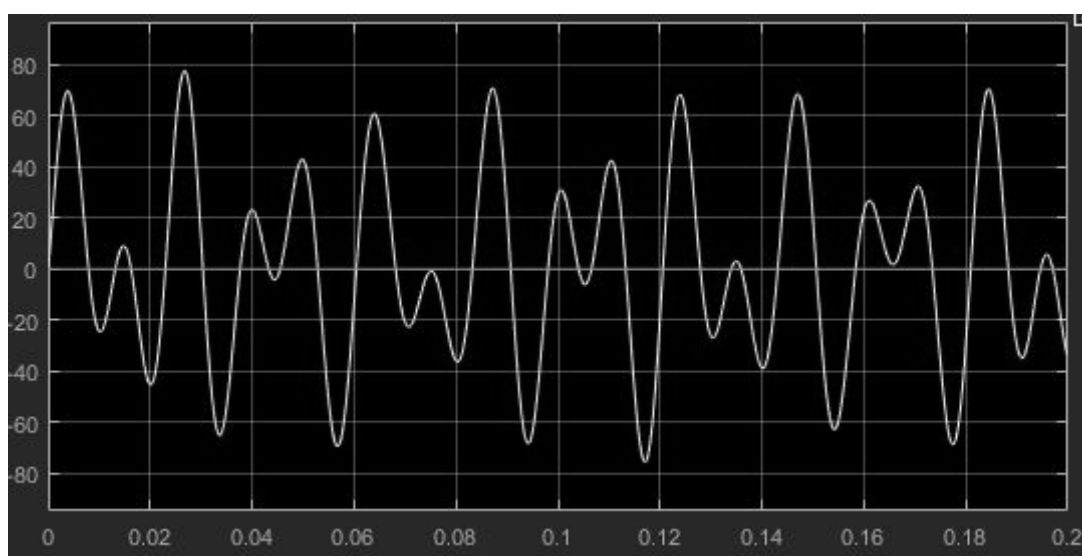


Рис. 5. График изменения тока нагрузки

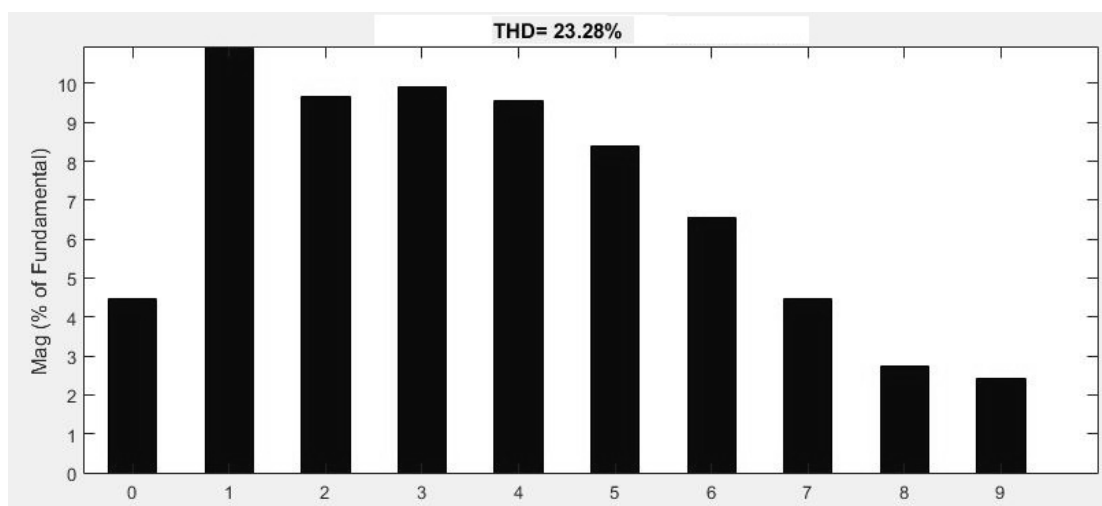


Рис. 6. Спектральный анализ тока нагрузки

Виртуальная модель позволяет изменять параметры как внешней питающей сети, так и каждого вида нагрузки в реальном времени под любое конкретное предприятие с предварительным расчетом схемы замещения.

Для подтверждения поставленных целей виртуальная модель была проверена на различных режимах работы нагрузки. На рисунке 5 представлен график изменения тока нагрузки с постоянной во времени нелинейной нагрузкой.

Гармонический анализ проведен в графическом интерфейсе пользователя «Powergui» с помощью функции FFTAnalysis (быстрое преобразование Фурье) [5]. На рисунке 6 представлен спектральный анализ тока нагрузки. Из графика следует, что коэффициент искажения синусоидальности кривой тока  $K_1$  равен 23,28%. Нелинейную нагрузку можно считать источником токов 3-, 5-, 7-, 9- и 11-й гармоник, который зависит от номера гармоники.

### Выводы

Анализ спектра гармоник позволяет сделать заключение о том, что основным источником нелинейных искажений в сети сельскохозяйственного предприятия являются потребители в виде электроприводов с регулируемой скоростью вращения и регулируемых водонагревателей, которые вносят наибольший вклад в суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения.

Создана модель электрической сети, которая в дальнейшем может быть скорректирована для любого конкретного сельскохозяйственного предприятия.

Точность реальных инструментальных обследований, проведенных с помощью анализатора качества электрической энергии AR5-L [6] и опытов с виртуальной моделью, находится в пределах 2,16%.

### Библиографический список

- ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
- Бунтеев Ю.Е. Оценка определяющего влияния источников высших гармоник на качество электрической энергии в электро-технических комплексах промышленных предприятий: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2016. – 139 с.
- Сбитнев Е.А., Осокин В.Л. Влияние высших гармоник на качество электроэнергии в сельскохозяйственных предприятиях // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2015. – № 11. – С. 19-22.
- Васильев В.В., Симак Л.А., Рыбникова А.М. Математическое и компьютерное моделирование процессов и систем в среде MATLAB/SIMULINK: учебное пособие для студентов и аспирантов. – Киев: НАН Украины, 2008. – 91 с.
- Черных И.В. Моделирование электро-технических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – СПб.: Изд-во ДМК Пресс, 2008. – 290 с.
- CIRCUTOR. Анализатор электропотребления AR5 и AR5-L (M98151101-03-05A) // Руководство пользователя. – 2011. – 53 с.

**References**

1. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. – M.: Standartinform, 2014. – 20 s.
2. Bunteev Yu.E. Otsenka opredelyayushchego vliyaniya istochnikov vysshikh garmonik na kachestvo elektricheskoy energii v elektrotekhnicheskikh kompleksakh promyshlennykh predpriyatiy: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.03. – SPb.: Izd-vo SPbGU, 2016. – 139 s.
3. Sbitnev E.A., Osokin V.L. Vliyanie vysshikh garmonik na kachestvo elektroenergii v selskokhozyaystvennykh predpriyatiyakh // Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva. – 2015. – № 11. – S. 19-22.
4. Vasilev V.V., Simak L.A., Rybnikova A.M. Matematicheskoe i kompyuternoe modelirovanie protsessov i sistem v srede MATLAB/ SIMULINK: uchebnoe posobie dlya studentov i aspirantov. – Kiev: NAN Ukrainy, 2008. – 91 s.
5. Chernykh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink. – SPb.: Izd-vo DMK Press, 2008. – 290 s.
6. CIRCUTOR. Analizator elektropotrebleniya AR5 i AR5-L (M98151101-03-05A). Rukovodstvo polzovatelya. – 2011. – 53 s.

