УДК 621.316

ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Наумкин Илья Борисович[1],
ассистент, e-mail: naumkinib@rambler.ru
Паскарь Иван Николаевич[1],
старший преподаватель, e-mail: paskar-ivan@mail.ru
Завьялов Валерий Михайлович[2],
доктор техн. наук, доцент, e-mail: zavyalovvalery@gmail.ru

[1]Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
[2]Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 30

Аннотация

В статье освещены вопросы влияния электроприемников с нелинейной вольтамперной характеристикой на показатели качества электроэнергии. Выявлены негативные последствия присутствия нелинейной нагрузки в электрической сети и влияние высших гармонических составляющих на параметры качества электроэнергии. Проведен анализ современных способов управления параметрами энергетических систем для уменьшения влияния нелинейных нагрузок на качество электрической энергии, и в частности на искажение формы напряжения и тока. Определены наиболее перспективные направления повышения качества электроэнергии. Установлено отсутствие методик, определяющих уровень гармонических составляющих напряжения и тока в питающей сети. Разработана математическая модель электрической сети в программном комплексе MATLAB для исследования влияния нелинейной нагрузки на качество электроэнергии в подводящих линиях.

Ключевые слова: *гармоника, нелинейная нагрузка, качество электрической энергии, трансформатор, сеть электроснабжения, MATLAB.*

Электрическая энергия как товар используется во всех сферах жизнедеятельности человека, обладает совокупностью специфических свойств и непосредственно участвует при создании других видов продукции, влияя на их качество.

В связи с переходом работы организаций, занимающихся производством и распределением электрической энергии, на коммерческую основу особо актуальной становится проблема определения качества электрической энергии.

Понятие качество электроэнергии отличается от понятия качества других видов продукции. Каждый электроприемник предназначен для работы при определенных параметрах электрической энергии: номинальных частоте, напряжении, токе и т.п., поэтому для нормальной его работы должно быть обеспечено требуемое качество электроэнергии. Таким образом, качество электрической энергии определяется совокупностью ее характеристик, при которых электроприемник могут нормально работать и выполнять заложенные в них функции.

Качество электрической энергии зависит не только от производителя, но и от параметров потребителей электрической энергии. Негативное влияние на качество электрической энергии оказывают потребители с нелинейной характеристикой. Именно нелинейность нагрузки приводит к возникновению гармонических искажений напряжения сети. Практически речь идет об искажении формы и, как следствие, гармонического состава напряжения не только на зажимах потребителя, но и всей сети электроснабжения. В большинстве случаев потребители электрической энергии имеют нелинейную вольтамперную характеристику, что приводит к изменению гармонического состава напряжения и тока сети электроснабжения.

Улучшение качества энергии в любой отрасли промышленности приводит к созданию условий нормального протекания технологических процессов, а это, в свою очередь, способствует выпуску запланированного количества продукции при надлежащем ее качестве.

В промышленности значительная часть потребления электрической энергии приходится на вентиляционные, насосные и компрессорные установки, конвейеры и подъемные механизмы, электроприводы технологических установок и станков. Данные механизмы чаще всего приводятся в действие асинхронными электродвигателями переменного тока. Для управления режимами работы асинхронных электродвигателей, в том числе и для снижения их энергопотребления, производители электротехнического оборудования предлагают специализированные электротехнические устройства - преобразователи частоты.

Частотные преобразователи способны значительно облегчить режимы пуска и работы асинхронных двигателей. В то же время, частотные преобразователи являются нелинейной нагрузкой, в связи с чем оказывают существенное влияние на коэффициент мощности и нелинейные искажения напряжения в точке подключения преобразователя. Из-за особенностей конструкции частотного преобразователя его выходное напряжение и ток имеют искаженную, несинусоидальную форму с большим количеством гармонических составляющих. Неуправляемый выпрямитель преобразователя частоты потребляет из сети нелинейный ток, тем самым загрязняет сеть электроснабжения высшими гармониками напряжения. Использование такого искаженного несинусоидального тока приводит к появлению негативных последствий:

1. Возможен перегрев и разрушение нулевых рабочих проводников кабельных линий вследствие их перегрузки токами гармоник, кратных трём.

2. Гармоники создают дополнительные потери в трансформаторах.

3. В условиях несинусоидальности тока ухудшаются условия работы батарей конденсаторов.

4. Сокращение срока службы электрооборудования из-за интенсификации теплового и электрического старения изоляции.

5. Необоснованное срабатывание предохранителей и автоматических выключателей вследствие дополнительного нагрева внутренних элементов защитных устройств.

6. Ускоренное старение изоляции проводов и кабелей.

7. Помехи в сетях телекоммуникаций могут возникать там, где силовые кабели и кабели телекоммуникаций расположены относительно близко.

Кроме того, преобразователи частоты могут являться мощным источником помех в электрической сети питания, оказывая негативное влияние на другое электрическое оборудование, подключенное к этой сети (рис. 1).

Технические проблемы с гармониками тока и напряжения при использовании частотных преобразователей набирают все большую актуальность. По принципу действия существующие способы подавления высших гармонических составляющих напряжений и токов можно разделить на следующие подгруппы:

- изменение топологии сети электроснабжения региона;
- использование пассивных фильтров в сетях;
- использование активных фильтров для защиты сетей электроснабжения;
- использование устройств с автоматической стабилизацией формы напряжения (тока);
- использование вольтодобавочных устройств;

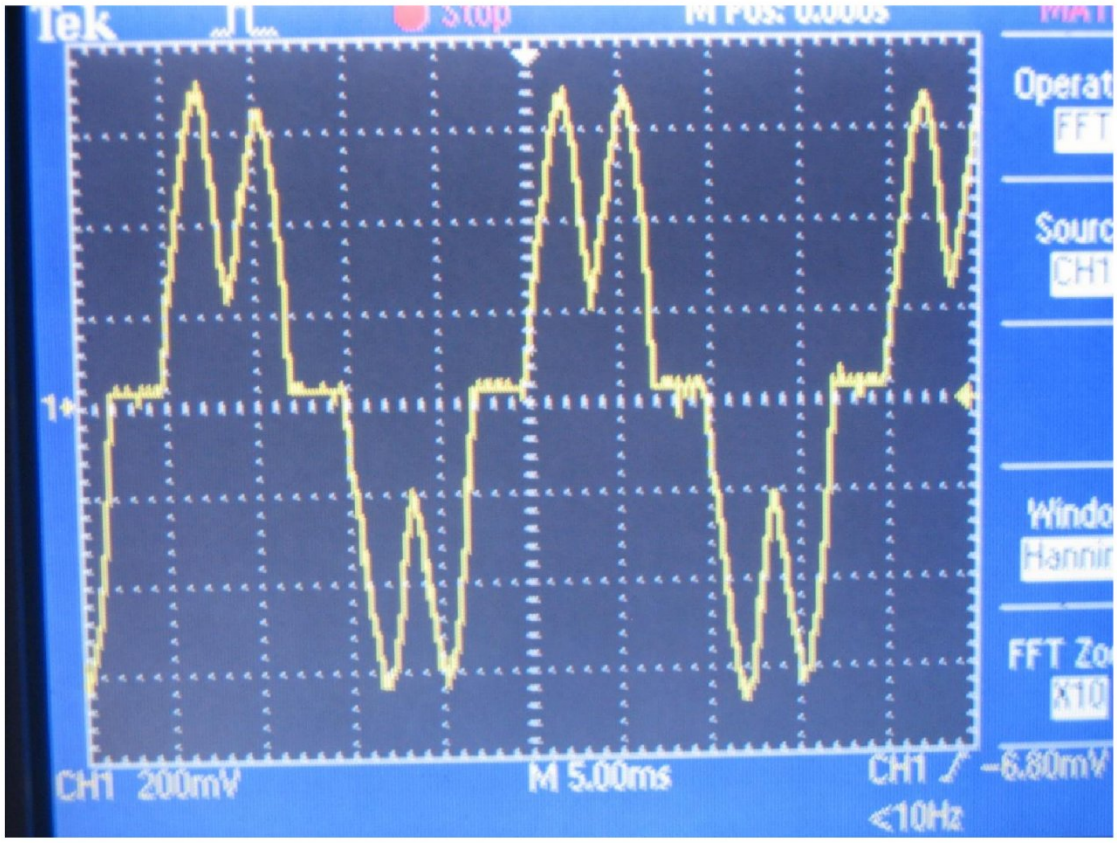

Рис. 1. Искажение синусоиды напряжения под влиянием высших гармоник, созданных нелинейной нагрузкой (частотным преобразователем)

- использование электромашинных установок.

1. Изменение топологии сети электроснабжения региона

Изменение топологии электрической сети используется для ликвидации перегрузки оборудования, ограничения снижения или повышения напряжения. Изменение топологии электрической сети осуществляется путем отключения ЛЭП, трансформаторов, автотрансформаторов и разделения систем шин.

Изменение топологии сети путем подключения сети, используемой только в аварийных ситуациях применяют для уменьшения гармонических искажений определенного участка сети до допустимых значений.

Изменение конфигурации сети электроснабжения не является универсальным способом уменьшения искажения формы напряжений, так как частотная характеристика системы зависит не только от ее конфигурации, но и от изменения характера и величины нагрузки. В условиях России использование этого метода практически невозможно из-за разветвленности и значительной протяженности электрических сетей.

2. Пассивные фильтры.

Фильтрующие устройства, разработанные на основе пассивных реактивных элементов, достаточно разнообразны. Для подавления гармонических составляющих используются следующие пассивные фильтрующие устройства:

- поперечные компенсаторы;
- продольные заградительные контуры;
- поперечные резонансные цепи;
- П-образные фильтрующие звенья.

Обычные компенсаторы, помимо своей основной функции, заключающейся в компенсации реактивной мощности, уменьшают процентный состав гармоник, так как конденсаторы компенсаторов вместе с реактивными сопротивлениями сети и нагрузки образуют колебательный контур, который может быть настроен на одну из гармонических составляющих.

Последовательный заграждающий фильтр представляет собой небольшой реактор с воздушным сердечником, включенный параллельно с конденсатором. Эта комбинированная последовательно-параллельная цепь настроена на резонансную частоту 350 Гц.

Эффективность работы заграждающего фильтра существенно зависит от конфигурации сети. Наиболее целесообразным является его размещение на выводах трансформатора. Это решение является экономически эффективным, т.к. используется меньшее количество конденсаторных установок, не требуется применения автоматических выключателей, однако необходимы относительно сложные схемы защит.

Пассивные параллельно соединенные последовательные контуры. Одной из разновидностей данных фильтров являются сглаживающие фильтры для подавления пульсаций выпрямленного напряжения. На рисунке 2 представлена схема такого фильтра. Последовательные контуры L_1C_1, L_2C_2, L_3C_3 настроены на частоты 100, 200 и 300 Гц соответственно. Эти фильтры сглаживают гармоники шестифазной схемы выпрямления, а также гармоники, вызванные асимметрией питающего напряжения. Для ограничения переменной составляющей выпрямленного тока в фильтр включают балластные элементы L_4C_4, L_5C_5. Но основной задачей такого фильтра является сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения.

Сходными по фильтрующим свойствам являются *П-образные пассивные k -фильтры* низких частот. Частота среза таких фильтрующих звеньев составляет 50 Гц. С увеличением частоты собственное затухание такого звена возрастает.

3. Активные фильтры.

Одним из способов борьбы с гармоническими искажениями является применение активных фильтров, построенных на базе мощных силовых полупроводниковых преобразователей. Принцип работы активного фильтра основан на введении в высоковольтную цепь через повышающий трансформатор сигнала гармонического тока или напряжения таким образом, чтобы уменьшить содержание гармоник в этой цепи. Активные фильтры представляются наиболее целесообраз-

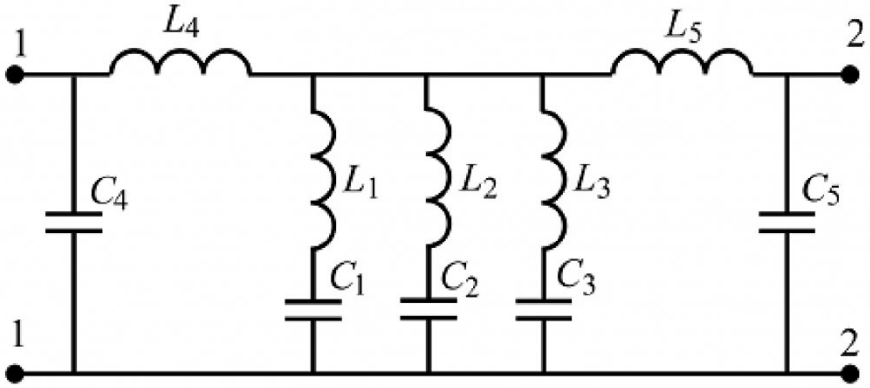

Рис. 2. Схема сглаживающего фильтра для подавления пульсаций напряжения.

ным решением с точки зрения их эксплуатационных характеристик и стоимости.

4. Устройства с автоматической стабилизацией формы напряжения и тока.

Одним из способов борьбы с гармониками является разработка устройств стабилизации мгновенных значений токов и напряжений. К разряду таких устройств относится магнитный синтезатор, который обеспечивает защиту нагрузки от различных искажений синусоидальной формы входного напряжения, в частности от провалов и выбросов напряжения, импульсных и высокочастотных помех и высших гармоник. Выходное напряжение магнитного синтезатора на каждом полупериоде основной частоты генерируется путем объединения шести прямоугольных импульсов от связанных между собой трансформаторов с насыщением. Магнитный синтезатор не содержит каких-либо силовых полупроводниковых элементов, выполняя функцию стабилизатора напряжения. Он формирует ступенчатое, близкое по форме к синусоиде, напряжение, которое подается на нагрузку. Таким образом, речь идет о своеобразном фильтре входного напряжения, принцип действия которого основан на формировании выходного напряжения заданной формы.

5. Вольтодобавочные устройства.

Вольтодобавочный преобразователь используется для стабилизации и регулирования выходного напряжения тяговой подстанции постоянного тока. Однако проведенные исследования показали, что его можно использовать в качестве активного фильтра для уменьшения амплитуд гармоник входных токов выпрямительной установки. Силовой трансформатор подстанции преобразует и распределяет напряжения на основной выпрямитель и выпрямитель, выполняющий роль вольтодобавочного преобразователя. В первичной цепи силового трансформатора установлены датчики тока. Оптимизатор по результатам гармонического анализа выделяет заданные гармоники входных токов и вырабатывает управляющие воздействия на источник компенсирующего сигнала.

6. Использование электромашинных преобразователей.

Одним из наилучших вариантов исключения влияния нелинейных нагрузок на основную сеть электроснабжения является использование машинного преобразователя переменного напряжения одного уровня в переменное напряжение другого или того же уровня. Преобразование характеризуется полной электромагнитной изоляцией распределительных сетей от сетей, обеспечивающих питание потребителей с нелинейной характеристикой. Устройство представляет собой установку, состоящую из мощного синхронного двигателя и синхронного генератора, находящегося на одном валу с двигателем. В этом случае обеспечивается полная гальваническая развязка между цепями, так как передача энергии производится через вал системы «генератор – двигатель». Недостаток такого варианта заключается в том, что для потребителей малой мощности подобная установка будет иметь весьма малый коэффициент полезного действия. Для потребителей большой мощности подобная установка по расчетным данным будет иметь КПД, близкий к 90%. Необходимость разработки и использования такой установки должна быть обоснована экономически.

Все способы, рассмотренные выше применяются для подавления гармонических составляющих на участке цепи следующем после частотного преобразователя, и существует множество методик для определения и улучшения параметров качества электроэнергии на данном участке сети.

В то же время отсутствуют установившиеся методики, определяющие уровень гармоник напряжения и тока в питающей сети, в зависимости от мощности, загруженности, типа частотного преобразователя.

Для исследования влияния нелинейной нагрузки на качество электроэнергии в подводящих линиях автором была разработана математическая модель системы в программном комплексе Matlab (рис. 3)

В модели E – источник напряжения; T – силовой трансформатор; RL – кабельная линия; D1 – D6 – диоды; R – активная нагрузка; L – индуктивная нагрузка; C – емкостная нагрузка; V1, V2 – вольтметры; A – амперметр; Sc1, Sc2, Sc3 – блоки, отображающие графики поступающих величин.

Параметры элементов модели определены путем вычисления их по паспортным значениям параметров электроустановок, используемых в реальных системах электроснабжения

Используя данную модель, возможно провести ряд опытов с изменением длины, марки, сечения кабеля, а также влияние этих параметров на качество электроэнергии.

После проведения серии опытов, автором планируется:

1) Усложнить модель, и включить вместо диодного моста частотный преобразователь, а на место нагрузки подключить асинхронный двигатель.

2) Собрать реальную электрическую цепь с аналогичными математической модели элементами и соответствующими характеристиками.

3) Разработка алгоритма, и определение методов и инструментов для оценки качества электроэнергии

4) Разработка методики выбора кабеля при работе на нагрузку с выпрямителем и емкостью в звене постоянного тока

5) Разработка методики улучшения параметров качества электроэнергии при использовании нелинейной нагрузки, такой как частотные преобразователи и асинхронные двигатели.

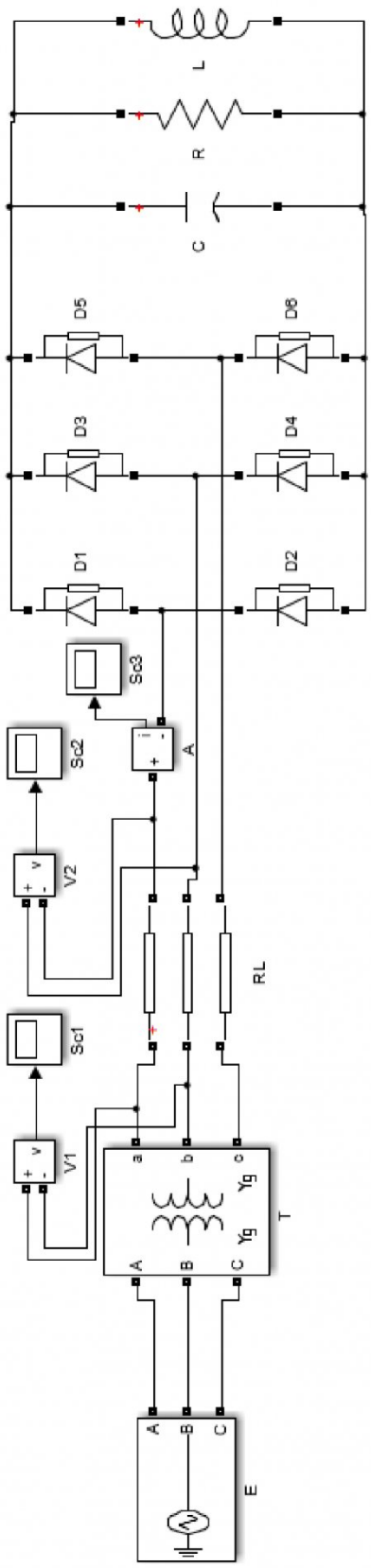

Рис. 3. Математическая модель, разработанная в программном комплексе Matlab

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий — Учебник. М.: Теплотехник, 2009. - 698 с., ил.

2. ГОСТ Р 54149-2010 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандартинформ, 2012

3. Карташев И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения. Учебное пособие. — М.: Издательство МЭИ, 2001. — 120 с.

4. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.

5. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

6. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / Соколов В.И. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.

7. Вольдек А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы / Попов В. В. – СПб.: Питер, 2008. 320 с.

8. Орлов И. Н. и др. Электротехнический справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. 616 с.

9. Hugan R.C.. Electrical Power Systems Quality / McGranaghan M.F., Beaty H.W. – McGraw-Hill, 1996. – 265 p.

10. The Datawave Magnetic Synthesizer As a Solution to Harmonics // Liebert Corporation, 1997. – 6 p.

11. I.M. Nejdawi. Harmonic Trend in the USA: A Preliminary Survey., A.E.Emanuel, D.J. Pileggi, M.J. Corridori, R.D. Archambeault.//IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, ¦ 4, 1999, pp. 1488—1494

12. IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment (IEEE Emerald book) (ANSI).

13. Harmonic Mitigating Transformer Energy Saving Analysis. MIRUS International Inc. Oct., 1999.

14. Mark McGranaghan. Evaluating Harmonic Concerns With Distributed Loads – Electrotek Concepts, Knoxville, Tenn., Nov. 2001.

15. Victor A. Treating Harmonics in electrical distribution system // Ramos JR. Computer Power & Consulting, January, 1999.

Поступило в редакцию15.05.2015

EFFECT OF NON-LINEAR LOAD POWER QUALITY

Naumkin Ilya B.[1],
assistant, e-mail: naumkinib@rambler.ru
Pascar Ivan N.[1],
senior lecturer, e-mail: paskar-ivan@mail.ru
Zavyalov Valery M.[2],
Dr. Sc. (Engineering),, Associate Professor, e-mail: zavyalovvalery@gmail.ru

[1]T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation
[2]Tomsk Polytechnic University, 634050, Russia, Tomsk, Lenin Avenue, 30

Abstract

The article highlights the issues of the impact of power consumers with a nonlinear current-voltage characteristic in the power quality. Revealed the negative effects of the presence of non-linear load in the electrical network and the effect of the higher harmonic components in the power quality parameters. The analysis of modern control methods parameters energy systems to reduce the effect of nonlinear load on power quality, and in particular to distortion voltage and current. Identify the most promising ways to improve power quality. The absence of techniques that determine the level of the harmonic components of voltage and current in the supply network. A mathematical model of the electrical network in the MATLAB software package for the study of the influence of non-linear loads on power quality in the supply lines.

Keywords: *harmonica, non-linear load, power quality, transformer, power supply network, MATLAB.*

REFERENCES

1. Kudrin BI Power supply of industrial enterprises - Tutorial. M .: Teplotekhnik, 2009. - 698 p., Ill.

2. GOST R 54149-2010 Electric energy. Compatibility of technical equipment. Standards of quality of electric energy in power systems for general use. - M .: Standartinform 2012

3. Kartashov II The quality of electricity supply systems. Methods of its monitoring and enforcement. Textbook. - M .: MEI Publishing, 2001. - 120 p.

4. Zhelezko YS Power factor correction and improvement of the quality of electricity. - M.: Energoatomizdat, 1985. - 224 p.

5. Idelchik VI Electric systems and networks. - M.: Energoatomizdat, 1989. - 592 p.

6. Ivanov B.C. Modes of consumption and power quality systems, industrial power / VI Sokolov - M.: Energoatomizdat, 1987. - 336 p.

7. Voldek AI Electric machines. Introduction to electrical engineering. DC machines and transformers / VV Popov - SPb .: Peter, 2008. 320 pp.

8. Orlov, I. et al. Electrical reference. - M .: Energoatomizdat, 1988. 616 p.

9. Hugan RC. Electrical Power Systems Quality / McGranaghan MF, Beaty HW - McGraw-Hill, 1996. - 265 p.

10. The Datawave Magnetic Synthesizer As a Solution to Harmonics // Liebert Corporation, 1997. - 6 p.

11. I.M. Nejdawi. Harmonic Trend in the USA: A Preliminary Survey., AEEmanuel, DJ Pileggi, M.J. Corridori, R.D. Archambeault .// IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, | 4, 1999, pp. 1488-1494

12. IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment (IEEE Emerald book) (ANSI).

13. Harmonic Mitigating Transformer Energy Saving Analysis. MIRUS International Inc. Oct., 1999.

14. Mark McGranaghan. Evaluating Harmonic Concerns With Distributed Loads - Electrotek Concepts, Knoxville, Tenn., Nov. 2001.

15. Victor A. Treating Harmonics in electrical distribution system // Ramos JR. Computer Power & Consulting, January, 1999.

Received 15.05.2015