

УДК 620.9.001.5; 621.311

## ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ НАГРУЗОК НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Горячев В.Я., Кузьмин Д.А., Джазовский Н.Б.

*ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», Пенза, Россия (440026, г. Пенза, ул. Красная, 40), e-mail: cnit@pnzgu.ru*

В статье освещены вопросы влияния электроприемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой на показатели 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. Отмечается зарубежный опыт проведения мероприятий для снижения влияния нелинейных нагрузок, определены наиболее перспективные направления повышения качества электроэнергии. Кроме проведенного анализа, авторами предложено оригинальное устройство на основе использования автоматической стабилизации формы напряжения и тока. Приводятся спектральные характеристики тока одной фазы без использования устройства стабилизации тока и с использованием устройства, сравнение которых позволяет сделать заключение о высокой эффективности применения разработанного устройства для снижения влияния тяговых подстанций переменного тока на качество электрической энергии распределительных сетей.

Ключевые слова: нелинейная нагрузка, качество электрической энергии, искажение формы, потребитель, фильтр, электромашинная установка, электрическая сеть.

## THE MAIN METHOD OF CONTROLLING THE PARAMETERS OF ENERGY SYSTEMS TO REDUCE THE INFLUENCE OF NONLINEAR LOAD POWER QUALITY

Goryachev V.Y., Kuzmin D.A., Dzhazovsky N.B.

*FGBOU VPO "Penza State University", Penza, Russia (440026, Penza, Krasnaya, 40), e-mail: cnit@pnzgu.ru*

The article highlights the impact of power consumers of the nonlinear current-voltage characteristics on quality of electricity. The analysis of modern methods of controlling the parameters of energy systems to reduce the impact of non-linear loads on the quality of electric power, and in particular, on the distortion of the voltage and current. Celebrated international experience for activities to reduce the impact of non-linear loads, identify the most promising areas to improve the quality of electricity. In addition to the analysis by the authors proposed an original device based on the use of automatic stabilization of the form of voltage and current. Given the spectral characteristics of a current of one phase without using the constant current, and using the device and compares them to draw a conclusion about the effectiveness of high developed device to reduce the impact of traction substations AC electrical energy quality of distribution networks.

Key words: nonlinear load, the quality of electric power, distortion, the consumer, filters, electrical installation, electrical network.

### Введение

Наиболее важным показателем качества электрической энергии является степень искажения синусоиды напряжения и тока. Основной причиной искажения формы напряжения и тока является наличие нелинейной нагрузки или нелинейных элементов в сети электроснабжения. В настоящее время широкое распространение получили полупроводниковые преобразователи переменного тока в постоянный и постоянного тока в переменный. Полупроводниковые элементы преобразователей работают в ключевом режиме, что приводит к резкому изменению токов и напряжений на элементах и вызывает искажения формы напряжения и тока в системах электроснабжения.

Искажение синусоидальной формы токов и напряжений приводит к значительному снижению эффективности использования электрической энергии. Появление высокочастотных составляющих напряжения вызывает рост потерь в магнитопроводах и проводниках элементов систем электроснабжения и потребителей. Наличие составляющих высокой частоты в определенных условиях приводит к возникновению волновых эффектов в линиях электропередач относительно малой длины.

В настоящее время разработаны мероприятия по подавлению 3, 5 и 7-й гармонических составляющих, так как присутствие гармонических составляющих низких частот может вызвать перенапряжения (при наличии благоприятных условий) в магистральных линиях. Не следует забывать о том, что, кроме гармонических составляющих низкой частоты (3, 5, 7-й гармоник), нелинейные нагрузки обеспечивают присутствие гармонических составляющих более высоких частот. Длина линий электропередачи (ЛЭП) распределительных сетей изменяется в пределах от 10-15 до 100-200 км, нагрузка распределительных линий даже в течение суток изменяется от номинальной величины до режима, близкого к режиму холостого хода. Вероятность появления волнового эффекта в таких линиях на частотах, больших частоты 5-й гармоники, достаточно высока [3]. Все это указывает на то, что разработка мероприятий, уменьшающих влияние нелинейной нагрузки и других факторов на форму напряжений и токов, является в настоящее время одной из самых актуальных проблем систем электроснабжения.

Анализ гармонического состава токов электрических сетей проводится региональными электроэнергетическими компаниями Швейцарии с 1995 года. Напряжения 7-й гармоники, зарегистрированные в различных местах в период с 3 по 31 августа 2004 года, изменялись от значения близкого к 0% до максимального значения 4,4%, что связано с циклическим ежедневным изменением нагрузки, т.е. различными конфигурациями системы. Исследования показали, что протекание относительно небольшого тока 7-й гармоники по ЛЭП-380 кВ может привести к превышению допустимого значения гармоник в низковольтных сетях, подключенных к этим подстанциям (уровень гармоник в одной из сетей 0,4 кВ составил 14%). Таким образом, гармонический состав напряжения (тока) магистральных или распределительных ЛЭП может находиться в пределах допустимых значений, содержание гармоник может выходить за допустимые пределы. Поэтому анализ гармонического состава напряжений и токов и разработка мероприятий по подавлению гармоник распределительных сетей и сетей низкого напряжения является весьма актуальной проблемой [1; 2].

Для улучшения формы напряжения и тока отечественные и зарубежные специалисты используют разнообразные способы. 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;
- использование электромашинных установок.

### **1. Изменение топологии системы.**

Влияние топологии системы электроснабжения на гармонический состав напряжения потребителей достаточно детально было проанализировано в Швейцарии. При определенных конфигурациях сети электроснабжения амплитуда 5-й и 7-й гармоники резко возрастала и превышала допустимые значения. Моделирование сети электроснабжения показало, что частотная характеристика системы электроснабжения имеет резонансную частоту, близкую к 5-й или 7-й гармоникам и составляет приблизительно 350 Гц. При этом она зависит не только от параметров элементов, но и от режима работы этой системы, т.е. от параметров нагрузки.

Энергетические компании рассмотрели возможность изменения топологии сети путем подключения сети, используемой только в аварийных ситуациях. Результатом таких изменений явилось уменьшение уровня гармонических искажений узла до допустимых значений. Кроме того, введение в работу новой межсистемной ЛЭП между Швейцарией и Италией привело к дополнительному снижению гармонических составляющих.

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. Различают регулируемые и нерегулируемые компенсаторы. Регулируемый компенсатор позволяет менять характер реактивной мощности, что обеспечивает возможность поддержания заданного режима работы сети при изменении влияющих на него факторов. Такого типа компенсаторы устанавливают на электровагонах, которые являются нелинейными потребителями, приводящими к искажению формы напряжения [1].

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.

Одним из способов подавления высших гармоник является установка *пассивных параллельно соединенных последовательных контуров*. Подобные фильтрующие устройства используются на тяговых подстанциях постоянного тока [3], где устанавливают сглаживающие фильтры для подавления пульсаций выпрямленного напряжения. На рисунке 1 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. Согласно техническим условиям пульсация напряжения тяговой сети не должна превышать 2,8 В при номинальном напряжении 3000 В. 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.

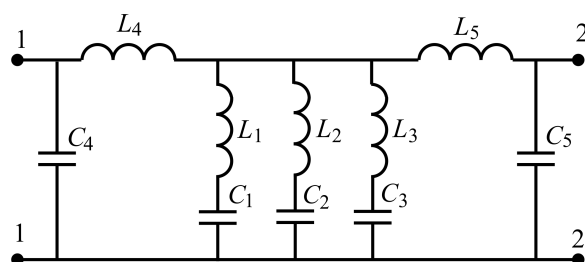


Рис. 1. Схема фильтра тяговой подстанции постоянного тока.

Сходными по фильтрующим свойствам являются *Π*-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.**

Лучшие фильтрующие свойства имеют активные фильтры. В российских сетях такие фильтры не используются, ниже приводится опыт использования активных фильтров в Швейцарии. В нескольких авариях в швейцарском районе Унтеренгадин чрезмерно высокое напряжение гармоник приводило к повреждению ряда оборудования среднего и низкого напряжения. Питание региональной сети среднего напряжения осуществлялось от подстанции 380 кВ, ЛЭП-380 кВ связывает Швейцарию, Австрию и Италию.

С момента ввода в эксплуатацию указанной системы уровень гармоник в ней превышал пределы, установленные международной энергетической компанией. В последнее время ситуация ухудшилась, что побудило швейцарские энергетические компании к изучению проблемы гармонических искажений в региональных сетях.

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 целесообразным решением с точки зрения их эксплуатационных характеристик и стоимости. В итоге энергетические компании установили два активных фильтра на третичной обмотке автотрансформатора. Установка активного фильтра стоимостью приблизительно 1 миллион долларов США была сдана в эксплуатацию в сентябре 2006 года и продолжает работать удовлетворительно.

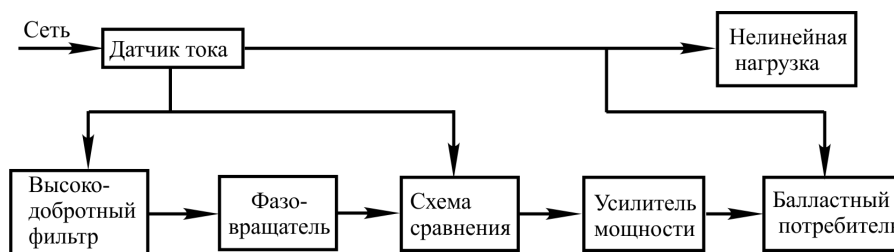
### **4. Устройства с автоматической стабилизацией формы напряжения и тока.**

Одним из способов борьбы с гармониками является разработка устройств стабилизации мгновенных значений токов и напряжений. К разряду таких устройств относится магнитный синтезатор [5], 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.

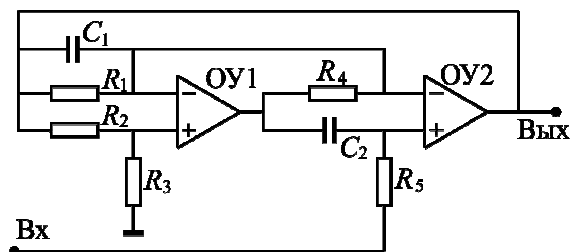
Авторами разработано устройство стабилизации формы тока в сети электроснабжения нелинейных потребителей, блок-схема которого представлена на рисунке 2.



**Рис. 2. Блок-схема устройства стабилизации тока.**

Стабилизатор тока состоит из датчика тока, высокодобротного фильтра, фазовращателя, схемы сравнения, усилителя мощности и балластного потребителя.

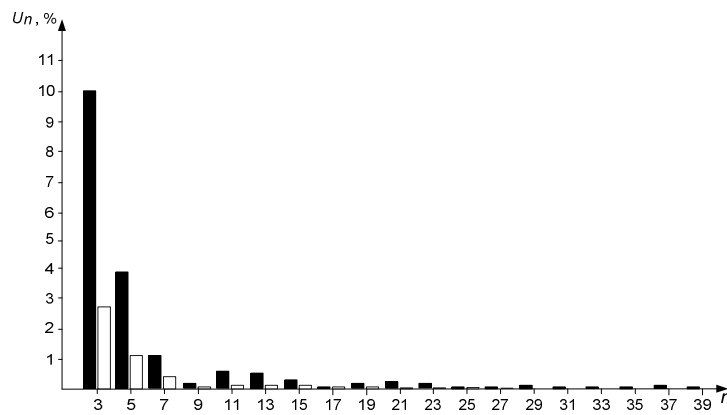
Датчик тока обеспечивает на своем выходе напряжение, пропорциональное его мгновенному значению тока. Это напряжение подано на вход высокодобротного фильтра, частота среза которого равна 50 Гц. Схема активного высокодобротного фильтра представлена на рисунке 3.



**Рис. 3. Схема активного фильтра.**

Напряжение на выходе фильтра имеет практически идеальную синусоидальную форму. Это напряжение через фазовращающую цепь подается на схему сравнения. Фазовращающая цепь обеспечивает компенсацию поворота фазы фильтром основной гармоники входного напряжения. Схема сравнения определяет разность мгновенных значений реального тока и идеального тока. Разностное напряжение подается на вход усилителя для обеспечения мощности, достаточной для управления балластным потребителем.

Спектральная характеристика тока одной фазы без использования устройства стабилизации тока и с использованием устройства представлена на рисунке 4.



**Рис. 4. Спектральная характеристика тока (■) – без устройства стабилизации, (□) – с устройством стабилизации.**

Благодаря использованию предложенного устройства удалось добиться снижения коэффициента гармонических искажений напряжения с 9,82 до 2,69%, то есть почти в 4 раза. Поэтому устройство подавления гармоник, предложенное в данной работе, может служить высокоэффективным устройством для устранения гармонических искажений в сети с нелинейной нагрузкой.

### **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 [5].

### **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.

### **Заключение**

В заключение следует отметить актуальность разработки устройств, исключающих влияние нелинейных нагрузок на распределительные сети. В условиях все возрастающих требований к качеству электрической энергии, обусловленных глобализацией развития систем электроснабжения, использование локальных устройств улучшения качества электрической энергии становится недостаточным. Перспективным путем развития элементов, исключающих ухудшение показателей качества, можно считать разработку эффективных электромашинных установок, а также систем стабилизации мгновенных значений напряжений и токов большой мощности.

### **Список литературы**

1. Власьевский С.В. Повышение эффективности выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов однофазно-постоянного тока с рекуперативным торможением : дис. докт. тех. наук. – М., 2001.
2. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
3. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.
4. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
5. Hagan R.C., McGranaghan M.F., Beaty H.W. Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill, 1996. – 265 p.
6. The Datawave Magnetic Synthesizer As a Solution to Harmonics // Liebert Corporation, 1997. – 6 p.

### **Рецензенты**

Нефедьев Дмитрий Иванович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника», ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», г. Пенза.

Чернецов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление инновациями», зам. директора ПРЦВШ (ф)ФГБОУ РГУИТП, г. Пенза.