

*Розглянуто структуру активного фільтра гармоник, працюючого в автономній електростанції судна і виконуючого функції управління параметрами якості електроенергії. Розроблено модель системи автоматичного управління фільтра, яка використовує спостерегаючий пристрій для відновлення недоступних для вимірювання сигналів мережі і за допомогою алгоритмів адаптивної апроксимації здійснює гармонійний синтез несинусоїдальних струмів і напруг. Результати моделювання розглянутої системи показали, що запропонований спосіб ідентифікації володіє малим часом адаптації і помилкою не більше 10 %*

*Ключові слова: автономні енергосистеми, адаптивна фільтрація, спостерегачі сигналів, навантаження, коливання, генератор*

*Рассмотрена структура активного фильтра гармоник, работающего в автономной электростанции судна и выполняющего функции управления параметрами качества электроэнергии. Разработана модель системы автоматического управления фильтра, которая использует наблюдающее устройство для восстановления недоступных для измерения сигналов сети и с помощью алгоритмов адаптивной аппроксимации осуществляет гармонический синтез несинусоидальных токов и напряжений. Результаты моделирования рассмотренной системы показали, что предложенный способ идентификации обладает малым временем адаптации и ошибкой не более 10 %*

*Ключевые слова: автономные энергосистемы, адаптивная фильтрация, наблюдатели сигналов, нагрузка, колебания, генератор*

УДК 681.5

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.56752

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ЭНЕРГИИ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

**А. А. Жиленков**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра электрооборудования судов и  
автоматизации производства  
Керченский государственный морской  
технологический университет  
ул. Орджоникидзе, 82, г. Керчь  
E-mail: zhilenkovanton@gmail.com

## 1. Введение

Современные судовые электроэнергетические системы (СЭЭС) характеризуются наличием в своем составе большого количества преобразовательной нагрузки, включающей преобразователи частоты, источники бесперебойного питания, инверторы, выпрямители и другие потребители [1].

Так, на современных судах широко распространены импульсные комплексы на базе гребных электродвигателей (ГЭД), получающие энергию от тех же источников, которые снабжают энергией общесудовые потребители. Питание ГЭД в данных комплексах получают через полупроводниковые преобразователи частоты. Преобразователи, в свою очередь, воздействуют на питающую их сеть, генерируя широкий спектр высших гармоник, искажающих токи и напряжения сети. Надо отметить, что при этом негативное влияние усугубляется характерными особенностями самой СЭЭС, как автономной системы [2]:

- ограниченная мощность источника питания;
- соизмеримость мощности нагрузки и источников энергии;
- значительное число потребителей, имеющих разное потребление тока, уровень напряжения, мощности;

- изолированная нейтраль;
- нелинейность большей части нагрузки;
- динамические частые и значительные колебания нагрузки;
- высокая надежность;
- жесткие ограничения по параметрам качества энергии, подающейся на системы связи, радиолокации, автоматики и т. д.

Искажения тока и напряжения увеличивают возможность возникновения резонансов в СЭЭС, вызывают сбои в микропроцессорной технике, системах автоматического управления, регулирования и защиты. Искажения токов и напряжений сети приводят к ускоренному старению изоляции линий питания и электрооборудования. Т. е. снижают надежность электроснабжения и работу самих потребителей автономного объекта. Поэтому, повышенное внимание сегодня уделяется разработке способов и созданию средств устранения негативного влияния искажения токов и напряжений. Если точнее, вопросам создания автоматических систем, реализующим управление процессами производства, распределения и передачи электроэнергии, и позволяющим обеспечить требуемое качество электроэнергии, а также устранить взаимовлияние оборудования по линии питания и т. п. [3].

Поэтому актуальной является разработка способа повышения эффективности функционирования существующих фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ) в автономных СЭЭС, так как ФКУ – это одно из перспективных средств управления параметрами качества электрической энергии в СЭЭС. Однако в настоящее время их применение ограничено в связи с неприспособленностью к характерным свойствам автономных систем, питающих соизмеримую по мощности полупроводниковую нагрузку.

---

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

---

По данной проблеме существует множество зарубежных и отечественных работ [1, 3–5]. Но разработку новых схемных решений и путей модернизации управления имеющимся оборудованием, обеспечивающих его работу в СЭЭС, не решает всех проблем, так как узким местом здесь становится малая управляемость и невозможность существенной модернизации главных узлов электроэнергетической системы.

Требования к предельным значениям параметров качества электроэнергии в России прописаны в ГОСТ 13109–97 [2] и Регистре морского судоходства. Они устанавливают допустимые значения отклонения частоты, амплитуды напряжения, коэффициента несинусоидальности тока и напряжения, размах при изменении напряжения, коэффициент для гармонической составляющей напряжения, обратной последовательности, нулевой последовательности напряжения. Они учитывают значения потребляемой из сети активной и реактивной мощности в максимуме. Дополнительные показатели характеризуют влияние на параметры энергии в сети со стороны потребителей. В системные показатели качества входят нормы на отклонение частоты. Оставшиеся показатели качества являются местными.

Обеспечить параллельную работу потребителей электроэнергии и её источников можно лишь при выполнении установленных ГОСТом требований, и со стороны потребителя, и питающей сети. Ранее данные задачи решались с помощью синхронных компенсаторов или батарей конденсаторов постоянной емкости с электромеханическими устройствами коммутации и пассивными фильтрами. В современных системах такие меры не эффективны в связи с ростом интенсивности возмущающих факторов, создаваемых нагрузкой [2, 3]. Вышеперечисленное, в совокупности как с востребованностью автоматизации технологических процессов производства, так и распределения электрической энергии, т. е. автоматического управления разнообразными показателями качества в электрической сети, требует создания автоматических систем контроля и управления параметрами электроэнергии [3, 4].

Были разработаны системы [5], зарекомендовавшие себя в промышленном применении, где мощность источника энергии (береговой электростанции) можно считать бесконечной по отношению к нагрузке, а параметры энергии – напряжение сети, частота тока – стабильными.

Проблема состоит в том, что автономные станции, ввиду описанных выше характерных особенностей,

делают работу ФКУ неэффективной [6], так как основные параметры электроэнергии в автономной сети колеблются в широком диапазоне и имеют стохастический характер. С другой стороны, для эффективного управления качеством электроэнергии, необходима точная идентификация и слежение за данными параметрами [3].

Таким образом, основной задачей при обеспечении повышения эффективности ФКУ становится точная идентификация и слежение за параметрами нестационарных гармонических составляющих несинусоидального сигнала – амплитуды, частоты и сдвига фазы. Решение данной задачи в режиме реального времени обеспечивает эффективную компенсацию целевых гармоник при помощи силовой части ФКУ.

Кроме алгоритмов быстрого преобразования Фурье [6], в современных системах предлагается применять методы фильтрации на основе фильтра Калмана и его расширений [7], описаны системы на основе искусственных нейронных сетей [8]. Однако, даже при достаточно точной идентификации, наблюдаемой в ряде упомянутых разработок, все они обладают критическим недостатком – скоростью адаптации к возмущениям параметров целевого сигнала.

Как было отмечено выше, в СЭЭС используется конфигурация типа «изолированная нейтраль». Это обуславливает невозможность непосредственной идентификации и слежения за параметрами сигналов фазных напряжений. Поэтому наблюдаемые в сети несинусоидальность форм линейных напряжений и прочие дестабилизирующие факторы создают критическую ошибку в автоматической системе управления ФКУ [3].

Таким образом, при всём разнообразии существующих способов выделения гармоник мощности искажения, актуальнейшей задачей остается реализация быстрого и точного алгоритма идентификации недоступных для измерения сигналов и параметров сложной распределенной системы.

---

## 3. Цель и задачи исследования

---

Цель работы: повышение эффективности управления качеством электроэнергии ФКУ в автономной электроэнергетической сети.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- разработка компьютерной модели СЭЭС с ФКУ;
- разработка способа адаптивной идентификации нестационарных параметров электроэнергии в СЭЭС;
- оценка работоспособности предложенной системы на основе результатов моделирования её функционирования в автономной системе.

---

## 4. Известные пути повышения качества электроэнергии в автономных сетях и их недостатки

---

Известные способы решения актуальной задачи повышения показателей качества электрической энергии разделились на две основных группы [9]:

- улучшения форм токов и напряжений и других показателей качества путем модификации силовых схем

полупроводниковых преобразователя и переключательных функций входящих в его состав силовых ключей;

– введением в СЭЭС специальных устройств, подключаемых на стороне генератора переменного тока к преобразователю.

На практике нашло применение и совместное использование приведённых выше путей.

Исходя из норм, определяемых указанным Регистром, а также характером нагрузки СЭЭС, можно выделить два основных пути повышения качества электроэнергии: компенсация неактивной мощности и компенсация мощности искажения. В сетях с высоким содержанием высших гармоник, которые генерируются нелинейными нагрузками, применение распределённых компенсаторов реактивной мощности, которые рассчитаны на работу при синусоидальных формах токов и напряжений, сталкивается с серьёзными техническими проблемами. Так, применяющиеся и сегодня батареи конденсаторов для компенсации реактивной мощности влияют на частотные характеристики систем таким образом, что часто вызывает возникновение резонанса сетевых токов, что, в свою очередь, приводит к ещё большему искажению напряжения в СЭЭС и аварийным повреждениям конденсаторных батарей. Поэтому установка конденсаторных батарей в СЭЭС при наличии преобразовательной нагрузки оказывается недопустимой. Поэтому в сетях с преобразовательной нагрузкой применяются компенсаторы реактивной мощности (КРМ) совместно с фильтрами, которые осуществляют фильтрацию гармоник тока нагрузки. Такая система, состоящая из КРМ и фильтров, представляет собой фильтро-компенсирующее устройство. Оно позволяет достичь одновременно и компенсации реактивной мощности основной частоты и фильтрации высших гармоник. В работе [5] даётся следующее определение ФКУ: «Фильтро-компенсирующее устройство – многофункциональный электротехнический аппарат, предназначенный для нормализации основных параметров качества электроэнергии по напряжению в точке присоединения преобразователя к питающей электрической сети путём компенсации реактивной мощности, потребляемой преобразователем, и локализации гармоник тока, генерируемых преобразователем». Здесь следует отметить, что компенсаторы мощности искажения (КМИ) целесообразно размещать в точке подключения нелинейной нагрузки, а КРМ у источника питания. Новое направление активной фильтрации позволило создать появление полностью управляемых и быстродействующих полупроводниковых элементов – запираемых тиристоров, мощных полевых транзисторов и биполярных транзисторов с изолированным затвором, с высокими коммутационными токами и напряжениями.

Эффективность и надёжность ФКУ также определяется его состав системой управления, а именно используемым в ней алгоритмом детектирования целевых гармоник. При этом эффективность определяется по следующим критериям:

- точность управления в статике и динамике;
- независимость управления выходным сигналом от возмущений в цепи питания ФКУ;
- помехоустойчивость в каналах передачи и обработки данных;
- гармонический состав выходного сигнала на частотах модуляции;

– предотвращение возникновения аварийных и т.п. режимов и т. д.

Задача детерминации компенсируемых гармоник в системах управления ФКУ реализуется в частотной или временной области. Вычисления во временной области имеют преимущества быстрых алгоритмов и недостаток, выражающийся в отсутствии динамической информации о гармоническом спектре. В результате, фильтры, использующие подобные алгоритмы, работают на завышенных частотах коммутации, позволяющих перекрыть весь диапазон фильтруемых гармоник. К тому же, этот способ не использует память о предыдущем опыте. Фильтрация на основе оперирования в частотной области, напротив, обладает преимуществом возможности подавления отдельных гармоник, однако отличается сложными и медленными вычислительными алгоритмами, основывающимися, как правило, на быстрых преобразованиях Фурье.

### 5. Разработка системы адаптивной идентификации параметров несинусоидальных сигналов сети

Как следует из приведенных выше рассуждений, компенсация искажений формы кривой напряжения сети может быть достигнута путём предотвращения протекания токов высших гармоник, потребляемых преобразовательной нагрузкой, через источник. Это возможно реализовать, зашунтировав токи высших гармоник параллельной цепью, подключаемой к источнику. Так как высшие гармонические составляющие тока нагрузки более не будут протекать через источник, то не будет создаваться и падения напряжения на внутреннем импедансе источника. То есть форма кривой напряжения VT на питающих шинах искажаться не будет.

Подобная шунтирующая цепь с необходимым импедансом может быть создана с помощью управляемого источника тока [10,11]. Если обеспечить условия, при которых данный источник тока будет управляться так, что соотношения между током и напряжением в шунтирующей цепи получались такими же, как в цепи с требуемым импедансом, то процессы в оставшейся части цепи не зависят от того, какой из двухполюсников к ней подключен – пассивный или активный. По сути, подобная ветвь будет представлять собой силовой активный фильтр гармоник. Рис. 1, 2 иллюстрируют принцип построения такого фильтра в виде силового параллельного активного фильтра напряжения (АФ-Н) и тока (АФ-Т), соответственно.

На рис. 3, 4 представлена структура адаптивной системы управления активным фильтром (АФ), использующей наблюдатель сигналов для идентификации недоступных для непосредственного измерения сигналов в силовой цепи. По фазным токам и линейным напряжениям сети, которые можно измерить непосредственно [12–14], восстанавливаются сигналы синхронного генератора дизель-генератора (СГ ДГ) СЭЭС. Частота, амплитуда ЭДС генератора, угол нагрузки и т.п. сигналы используются для аппроксимации основной гармоники фазных напряжений сети блоками АСУ АФ-Н и АСУ АФ-Т, восстанавливающих гармонический состав несинусоидальных токов и напряжений сети.

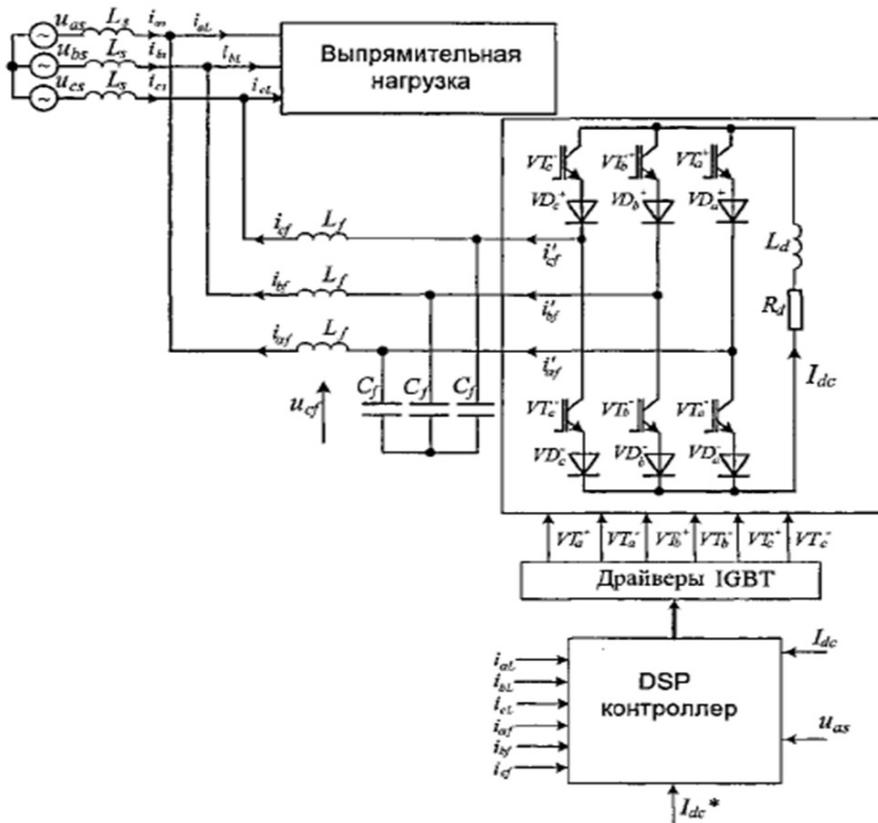


Рис. 1. Структура силового активного фильтра гармоник на основе инвертора тока [3]

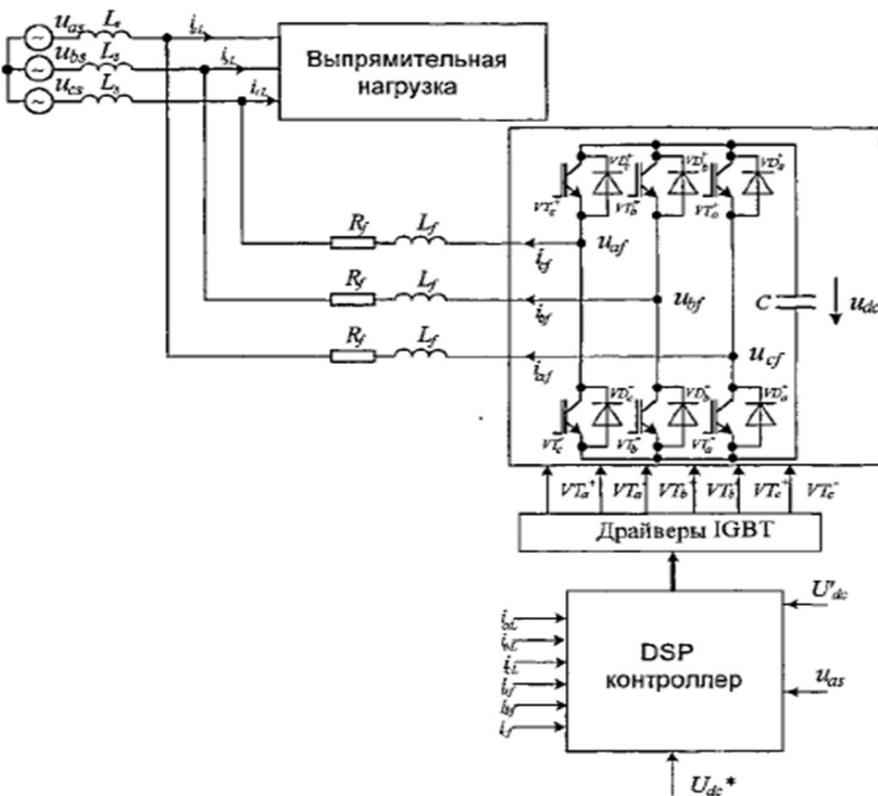


Рис. 2. Структура силового активного фильтра гармоник на основе инвертора напряжения [3]

Найденные гармонические составляющие подаются на соответствующие модули, формирующие

особо важно в условиях нестабильности частоты напряжения в автономной системе.

сигналы управления для силовой части, которую можно представить как классически, в виде одного инвертора, так и совокупностью силовых модулей, отвечающих за подавление индивидуальных или парных гармоник тока и напряжения. Заметим, что сигналы аппроксиматоров возможно использовать и в качестве опорных напряжений для систем управления тиристорными выпрямителями ГЭД и в совокупности получить комплексную систему управления параметрами электрической энергии в СЭЭС, то есть её качеством.

Суть предложенного метода адаптивной идентификации состоит в аппроксимации гармонических составляющих анализируемого несинусоидального сигнала. Основой аппроксиматора являются генераторы материнских (если использовать аналогии с теорией вейвлет-анализа) функций, представляющие собой генераторы синусоидального сигнала с перестраиваемыми в определённых пределах параметрами: амплитудой, частотой и сдвигом фазы. Каждый генератор имеет центральные значения параметров, соответствующие номинальным значениям параметров аппроксимируемых компонент сигнала. Так, при восстановлении сигнала, соответствующего основной гармонике напряжения сети, центральными значениями параметров соответствующего генератора будут напряжение 380 В, частота 50 Гц и сдвиг фазы (для фазы А) равный нулю. Адаптивность предложенной системы (рис. 4) заключается в непрерывной подстройке параметров генератора, продолжающейся до момента, когда сигнал на его выходе вычтенный из анализируемого сигнала не даст минимальную ошибку аппроксимации. Очевидно, что восстановление сигнала будет тем точнее, чем большее количество гармонических составляющих будет восстанавливаться системой. Ключевой особенностью метода является и то, что происходит слежение не только за амплитудой сигнала, но и за частотой, что

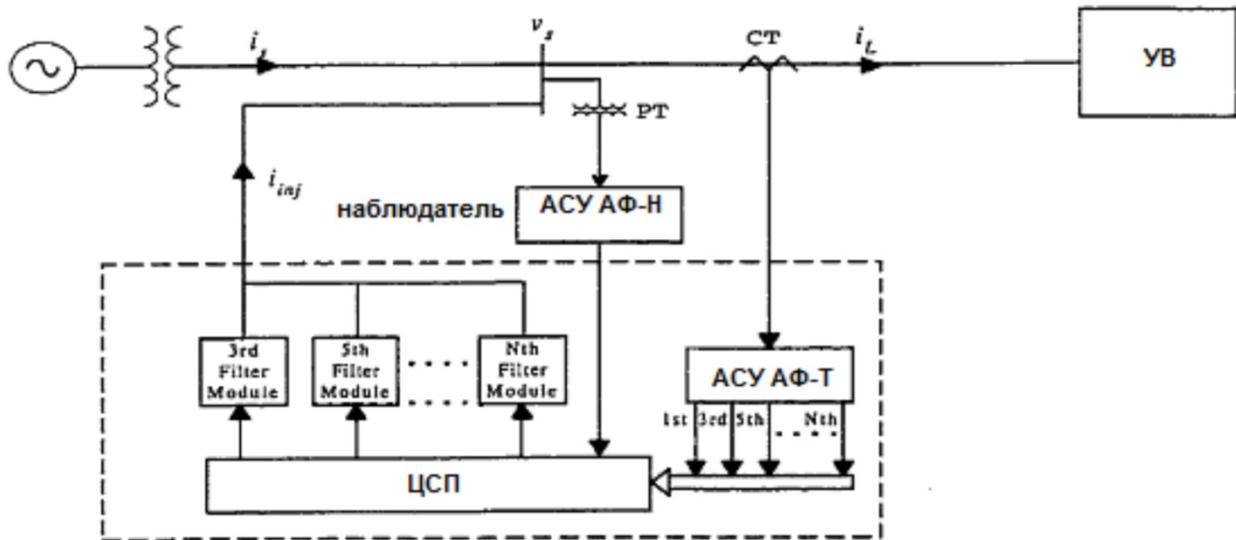


Рис. 3. Структурная АФ модульной топологии с наблюдающим устройством

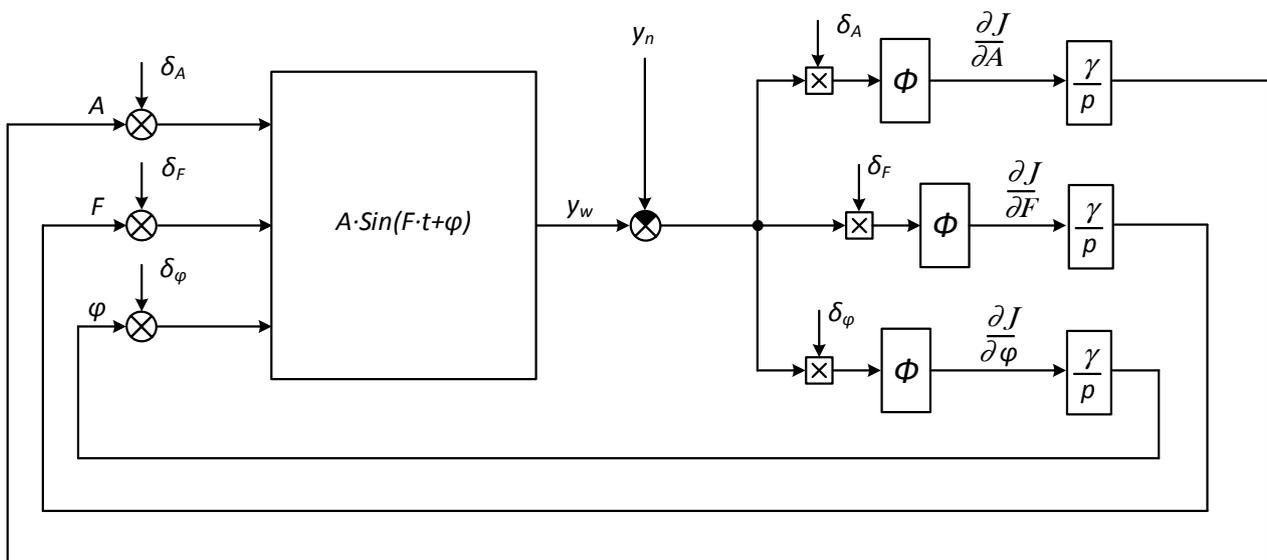


Рис. 4. Модель системы идентификации на основе адаптивных аппроксиматоров

Метод реализован на основе безпоисковой сле-  
 дящей системы. Слежение за параметрами, то есть  
 их подстройка, осуществлена с приме-  
 нением метода скорейшего спуска, но  
 может использовать и иные градиент-  
 ные методы и т. п. методы нахождения  
 экстремума.

На рис. 5 приведена структура моде-  
 ли аппроксиматора одной компоненты  
 сигнала, где входной зашумленный сиг-  
 нал  $y_n$  сравнивается с генерируемым  $y_e$ ,  
 параметры которого подстраиваются до  
 минимизации разницы между измеряе-  
 мыми генерируемым сигналами.

На рис. 5 показан только канал иден-  
 тификации амплитуды целевой компо-  
 ненты сигнала. Аналогичную структуру  
 имеют каналы идентификации сдвига  
 фазы и частоты.

На рис. 6, а–в, 7, а, б представлены  
 осциллограммы токов сети до и после

включения АФ и самого компенсирующего тока, гене-  
 рируемого в сеть силовой частью АФ.

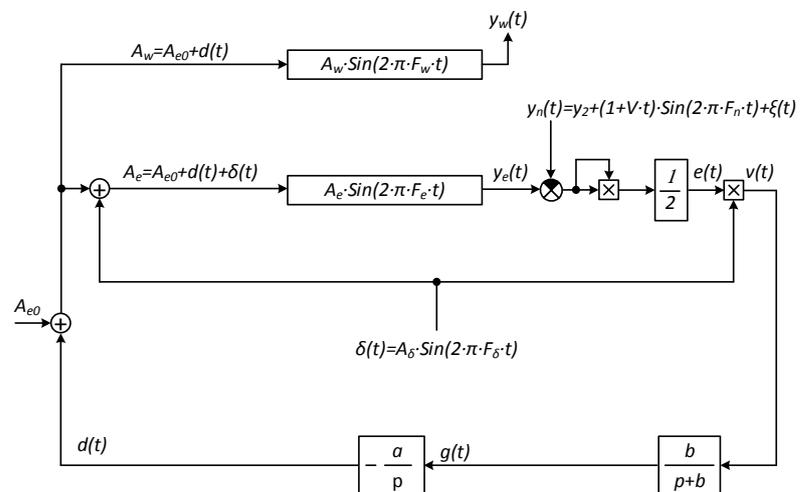


Рис. 5. Модель СЗЭС с силовым параллельным АФ

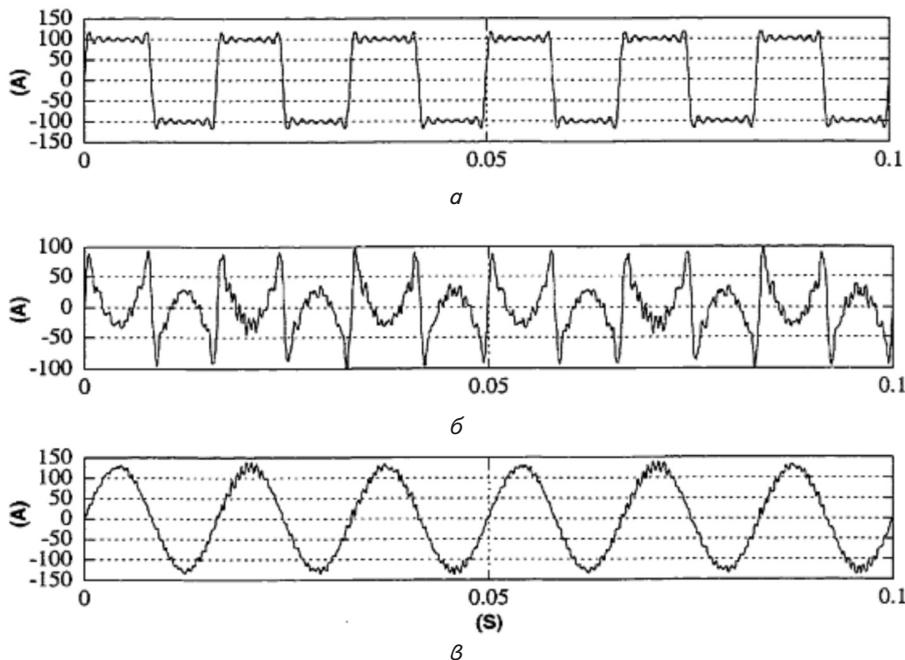


Рис. 6. Результаты моделирования: а – искаженный ток сети; б – компенсирующий ток; в – ток сети после фильтрации

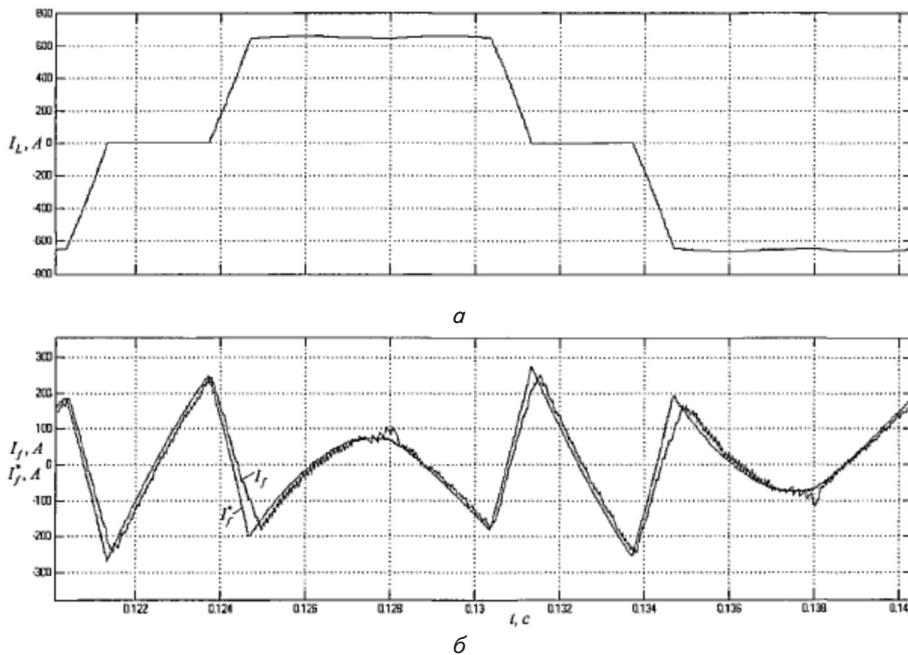


Рис. 7. Результат моделирования работы АФ: а – ( $I_L$  – искаженный ток сети); б – ( $I_f$  – вычисленный СУ АФ компенсирующий ток;  $I^*f$  – генерируемый ШИМ-модуляцией компенсирующий ток)

Из представленных осциллограмм видно, что система обеспечивает и идентификацию, и слежение за целевым сигналом, имея минимальные отклонения в динамических режимах.

### 6. Обсуждение результатов исследования предложенной адаптивной системы идентификации

Исследования показали, что разработанная модель позволяет решать поставленные выше задачи при вы-

сокой точности идентификации сигналов сети.

Представленная система адаптивной аппроксимации позволяет производить идентификацию недоступных для непосредственного измерения фазных напряжений. То есть способна эффективно работать в автономной сети с «изолированной нейтралью», что недоступно известным аналогам.

Результаты моделирования показали, что разработанная система позволяет повысить эффективность работы АФКУ за счёт повышения точности идентификации компенсируемых составляющих сигналов тока и напряжения сети. Отклонения в статике не превышали 0,5 %, в динамике время адаптации к изменениям анализируемого сигнала не превышало одного периода основной гармоники сетевого напряжения, что как минимум в 3–4 раза лучше показателей систем идентификации с быстрым преобразованием Фурье. Максимальная ошибка в переходных режимах не превышала 10 %.

Надо отметить, что не теряет актуальности необходимость изучения проблем совместного использования статических компенсаторов у точек подключения нагрузки [14] и активных фильтров у точек подключения генератора, что позволит в перспективе достичь максимально эффективного использования энергетических мощностей электрооборудования морских объектов и поможет устранить взаимное влияние оборудования по питающим линиям сети.

### 7. Выводы

1. Разработан новый метод адаптивной идентификации параметров электроэнергии на основе аппроксимации целевых сигналов, отличающийся малым временем адаптации к изменениям и высокой точностью идентификации.

2. Была разработана модель адаптивного идентификатора, позволяющая исследовать процессы идентификации и слежения. Модель, по сравнению с извест-

ными аналогами, позволяет адаптироваться не только к изменениям амплитуды идентифицируемого сигнала, но и осуществлять идеентификацию и слежение за его частотой и сдвигом фазы.

3. Экспериментальными исследованиями на разработанной компьютерной модели подтверждена спо-

собность предложенного нового метода к активной фильтрации нестационарных помех на шинах электропитания. Результаты моделирования показали, что максимальное время адаптации не превышает одного периода сетевого напряжения, а ошибка в статике не превышает 0,5 %.

---

#### Литература

1. Микаэлян, Э. А. Перспектива применения газотурбинных агрегатов в нефтегазовой промышленности [Текст] / Э. А. Микаэлян, Р. Э. Микаэлян, В. П. Дорохин // Нефтяное хозяйство. – 1998. – № 6. – С. 49–52.
2. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 13109-97 [Текст]. – Введ. 1998-04-01. – М.: Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998. – 58 с.
3. Моцохейн, Б. И. Электропривод, электрооборудование и электроснабжение буровых установок [Текст] / Б. И. Моцохейн, Б. М. Парфенов, В. М. Шпилевой. – Тюмень, 1999. – 263 с.
4. Рейнике, М. Пути повышения экономической эффективности операций на старых нефтяных месторождениях [Текст] / М. Рейнике, К. Тренел, Э. Хербст и др. // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. – 1989. – № 7. – С. 21–26.
5. Черный, С. Г. Оценка надежности функционирования морских буровых платформ [Текст] / С. Г. Черный, А. А. Жиленков // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2015. – № 1. – С. 30–36.
6. CNW Research. Data showing the increasing consumer consideration of diesel and hybrid vehicles provided by CNW Research [Electronic resource]. – Available at : <http://www.cnwmarketingresearch.com>
7. Chernyi, S. Analysis of complex structures of marine systems with attraction methods of neural systems [Text] / S. Chernyi, A. Zhilenkov // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – Vol. 1. – P. 37–44.
8. National Oilwell Varco [Electronic resource]. – Available at: <https://www.nov.com/ProductIndex.aspx>
9. Can You Afford the Risk? The Case for Collaboration on Risk Mitigation for High-Specification Offshore Assets [Electronic resource]. – Available at: <http://www.osp.ru/os/2010/08/13005222/>
10. Моцохейн, Б. И. Электропривод зарубежных установок для морского бурения. Обзор зарубежной литературы [Текст] / Б. И. Моцохейн. – М. : ВНИИОЭНГ, 1977. – 76 с.
11. Моцохейн, Б. И. Электротехнические комплексы буровых установок [Текст] / Б. И. Моцохейн. – М.: Недра, 1991. – 253 с.
12. Жиленков, А. А. Повышение эффективности систем автоматического управления автономными буровыми установками за счет разработки методов обеспечения их совместимости и интеграции [Текст] / А. А. Жиленков, С. Г. Черный // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2015. – № 4. – С. 9–18.
13. Zhilenkov, A. Investigation performance of marine equipment with specialized information technology [Текст] / A. Zhilenkov, S. Chernyi // Energy Procedia. – 2015. – Vol. 100. – P. 1247–1252. doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.490
14. Полонский, В. И. Автоматизированные гребные электрические установки [Текст] / В. И. Полонский, А. Б. Хайкин. – М. : Транспорт, 1976. – 432 с.