

6. *СОУ-Н* МЕВ 40.1-21677681:2012. Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 6-35 кВ. Настанова щодо вибору та застосування у розподільчих установках. – К. : Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики», 2012. – 50 с.

7. *Стандарт МЭК 60099-5:2000*. Разрядники для защиты от перенапряжений. Часть 5. Рекомендации по выбору и применению.

8. *Методичні вказівки з вибору обмежувачів перенапруг нелінійних виробництва підприємства «Таврида Електрик Україна» для електричних мереж 6-35 кВ* : затверджено наказом Державного департаменту електроенергетики Мінпаливенерго України від 02.08.2001 № 4. – Севастополь : НВЦ «СКОСІ-Гідрофізика», 2002. – 40 с.

9. *Фолькер Хинрихсен*. Металлооксидные ограничители. Основы / Фолькер Хинрихсен ; пер. с немецкого под ред. В. П. Вертикова. – СПб. : ООО «Сименс», Департамент РТД, 2000. – 114 с.

10. *Выбор, испытание и применение металлооксидных ограничителей перенапряжений в сетях среднего напряжения*. – К. : Представительство АББ Украина, 1995. – 52 с.

11. *Правила устройства электроустановок*. – 3-е изд., перераб. и доп. – Х. : Форт, 2010. – 736 с.

12. *ГОСТ 16357–83*. Разрядники вентильные переменного тока на номинальные напряжения от 3,8 до 600 кВ. Общие технические условия.

УДК 681.516.77:621.314.2

А.А. Жиленков, ст. преподаватель

С.Г. Чёрный, канд. техн. наук

Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь, Украина

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА С МОДУЛЬНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ

А.О. Жиленков, ст. викладач

С.Г. Чорний, канд. техн. наук

Керченський державний морський технологічний університет, м. Керч, Україна

АДАПТИВНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ АКТИВНОГО ФІЛЬТРА З МОДУЛЬНОЮ ТОПОЛОГІЄЮ

A.A. Zhylenkov, senior lecturer

S.H. Chiorny, Candidate of Technical Sciences

Kerch State Marine Technical University, Kerch

ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF ACTIVE FILTER WITH MODULAR TOPOLOGY

В статье представлены результаты разработки адаптивного фильтра сигналов систем управления полупроводниковых преобразователей и активных фильтрокомпенсирующих устройств, работающих в составе электроэнергетической системы ограниченной мощности.

Ключевые слова: автономная электростанция, мощная нелинейная нагрузка, адаптивная фильтрация, нейронная сеть, сигнал.

У статті надані результати розроблення адаптивного фільтра сигналів систем управління напівпровідникових перетворювачів та активних фільтрокомпенсуючих пристроїв, які працюють у складі електроенергетичної системи обмеженої потужності.

Ключові слова: автономна електростанція, потужне нелінійне навантаження, адаптивна фільтрація, нейронна мережа, сигнал.

In the article the results of development of adaptive filter for signals of control system in semiconductor converters and power filter-compensating devices, workings in electroenergy system with limited power are presented.

Key words: autonomous power-station, powerful nonlinear load, adaptive filtration, neural network, signal.

Постановка проблеми. Современные судна содержат сложные технические комплексы, в которых широко используются различные электрифицированные и автоматизированные технические средства, к которым относятся: снабжение потребителей необходимым видом энергии, обеспечение движения и маневрирования судна, предотвращение аварий и борьба с их последствиями, создание условий жизнеобеспечения и нормальных условий эксплуатации судового оборудования.

Наиболее важное техническое средство судна – судовая электроэнергетическая система (СЭЭС). Она выполняет выработку, распределение, передачу и потребление электроэнергии.

СЭЭС имеют свои особенности и существенно отличаются от наземных электроэнергетических систем (ЭЭС). Основными характерными чертами судовых и корабельных ЭЭС являются [2]:

- соизмеримость мощностей генераторов и потребителей электроэнергии;
- большое количество потребителей, различающихся по роду тока, напряжения, мощности и функциям;
- нелинейность многих видов нагрузки;
- высокие требования к качеству электроэнергии, питающей системы автоматики, радиолокации, связи и др.;
- частые и большие динамические изменения нагрузки;
- высокие требования по надёжности и др.

На судах, где используются системы электродвижения на основе гребных электрических установок (ГЭУ) или винто-рулевых комплексов (ВРК), которые для наиболее эффективного использования системы получают питание от единой СЭЭС, обеспечивающей энергией все общесудовые потребители, питание таких пропульсивных установок осуществляется через полупроводниковые преобразователи, негативно воздействующие на питающую сеть переменного тока путем генерации в неё высших гармонических составляющих токов и напряжений. Нежелательное воздействие на питающую сеть переменного тока заключается в генерации нелинейными нагрузками гармонических составляющих тока и напряжения, отличающихся от основной гармоники. В результате этого возникают нелинейные искажения кривой напряжения сети или, другими словами, искаженные несинусоидальные режимы. Гармонические составляющие тока и напряжения повышают вероятность возникновения резонансных явлений в СЭЭС, нарушают работу микропроцессорной техники, устройств релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи, вызывают ускоренное старение изоляции основного электрооборудования, снижая, тем самым, надёжность электроснабжения потребителей автономного объекта.

Специфическими особенностями работы нелинейных нагрузок в ЭЭС ограниченной мощности является то, что нелинейные нагрузки, генерирующие гармонические составляющие тока, являются основным возмущающим фактором в таких системах. Кроме того, в СЭЭС большое значение имеет решение вопросов совместной работы резкопеременных мощных нагрузок с чувствительными к искажению напряжения, как правило, маломощными специальными электроприемниками.

Если представить генераторы СЭЭС неидеальным источником V_s с внутренним импедансом Z_s , а нелинейную нагрузку импедансом Z_L и источником тока гармоник I , то мы получим описание, характеризующее одно из свойств нелинейной нагрузки, а именно то, что форма тока, протекающего через нелинейный элемент, не повторяет форму приложенного к нему синусоидального напряжения, т. е. нелинейная нагрузка генерирует гармонические токи, спектр которых отличен от спектра приложенного к нагрузке напряжения.

Если импеданс источника так мал, что им можно пренебречь, или значительно меньше импеданса нагрузки, то есть $|Z_L| \gg |Z_s|$, то форма кривой напряжения, приложенная к нагрузке, не зависит от протекающего тока. Таким образом, циркулирование токов гармоник не приводит к сколько-нибудь заметному отклонению формы кривой напряжения на шинах, питающих нагрузку, от синусоидальной – этот случай соответствует работе нагрузки от источника бесконечной мощности.

Если же нагрузка питается неидеальным источником напряжения, то есть $|Z_s| \geq |Z_L|$, токи гармоник, протекающие по нелинейной нагрузке, создают в этом случае падение на-

пряжения гармоник на внутреннем импедансе источника, поэтому кривая напряжения, приложенного к нагрузке, будет искажена (даже если источник напряжения чисто синусоидален), а на специфических частотах, для которых $|Z_S + Z_L| \approx 0$, происходит параллельный резонанс, приводящий к значительному увеличению тока этих гармоник. Это, в свою очередь, приводит к значительному увеличению падения напряжения гармоник на внутреннем импедансе источника и, как следствие, значительному искажению кривой напряжения на шинах, питающих нагрузку. Значительное искажение кривой напряжения на питающих шинах требует проведения мероприятий, которые позволили бы осуществлять параллельную работу мощных нелинейных нагрузок с маломощными электроприемниками, чувствительными к искажению напряжения. Такими электроприемниками, например, можно считать системы управления самих мощных нелинейных нагрузок, т. е. системы управления преобразователей ГЭУ. Так, для ГЭУ постоянного тока, питающегося через тиристорный преобразователь (ТП) от СЭЭС переменного тока, характерна проблема влияния вносимых в сетевые токи и напряжения искажений от ТП, на систему управления самого ТП, до полного срыва работы последнего [1]. Это связано с тем, что подобные системы используют в качестве опорных искаженные сигналы сетевых токов и напряжений.

Анализ последних достижений и публикаций. Основные вопросы, касающиеся этой проблемы, сводятся к следующим: оценке электромагнитной совместимости источников высших гармоник и других нагрузок, т. е. влияния высших гармоник на электроустановки и возникающего при этом экономического ущерба; количественной оценке высших гармоник тока, генерируемых различными нелинейными нагрузками, и прогнозированию значений высших гармоник тока и напряжения в системах электроснабжения; снижению уровней высших гармоник. В последние несколько десятилетий была создана база для практической реализации методов активной фильтрации. Появление полностью управляемых быстродействующих полупроводниковых приборов – запираемых тиристоров, мощных полевых транзисторов и биполярных транзисторов с изолированным затвором, с высокими значениями коммутируемых токов и напряжения, позволило создать новое направление – активную фильтрацию.

Активный (силовой) фильтр (АФ) представляет собой 4-квadrантный преобразователь напряжения, на полностью управляемых ключевых элементах, с емкостным или индуктивным накопителем электрической энергии на стороне постоянного тока, формирующий методами импульсной модуляции усредненное значение тока (напряжения), равное разности нелинейного тока (или напряжения) и синусоидального тока (напряжения) его основной гармоники. Активный фильтр обеспечивает компенсацию высших гармоник тока или напряжения сети путём генерирования высших гармоник тока или напряжения в сеть, в противофазе с высшими гармониками тока или напряжения сети.

Силовая часть АФ, как правило, представлена инвертором, получающим сигналы управления от системы управления АФ. Наибольшая часть исследований АФ за последние тридцать лет относилась к их системам управления. Целью было получение качественных и быстрых алгоритмов выделения опорных токов и напряжений.

Помимо быстрого преобразования Фурье, в настоящее время активно применяются методы на основе использования фильтра Калмана, а также искусственных нейронных сетей. Однако каждый из этих методов имеет в той или иной степени один недостаток – время адаптации к изменениям в анализируемом сигнале. В наилучшем случае, при неизменной частоте тока питающей сети и резком изменении его гармонического состава, системе управления необходимо время не менее одного периода напряжения сети. Изменение же частоты питающей сети, низкочастотные колебания (характерные для дисбаланса в трехфазной сети без нулевого провода), мощные помехи приводят, как правило, к катастрофическим последствиям. Это связано с тем, что при работе в частотной области, изменение

частоты основной гармоники на 0,4 Гц приводит к ошибке в определении амплитуды 5-й гармоники равной 10 %. Чтобы избавиться от этой ошибки, необходимо определять частоту основной гармоники. Для этого используют метод, отслеживающий частоту сигнала по его прохождению через ноль. Но даже в четырехпроводной сети этот алгоритм требует времени не менее 3 периодов основной гармоники, что удобно представить (рис. 1 и рис. 2). Учитывая отсутствие в СЭЭС нулевого провода – и, как следствие, неизвестность фазных напряжений сети, – искаженность линейных напряжений, а также прочих дестабилизирующих факторов, существующие системы управления дают критическую ошибку.

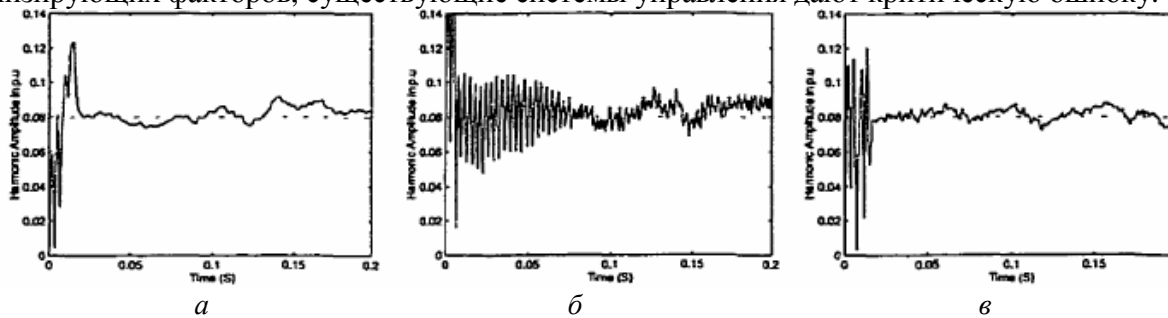


Рис. 1. Определение амплитуды 5-й гармоники:

а – нейронной сетью, б – фильтром Калмана, в – быстрым преобразованием Фурье

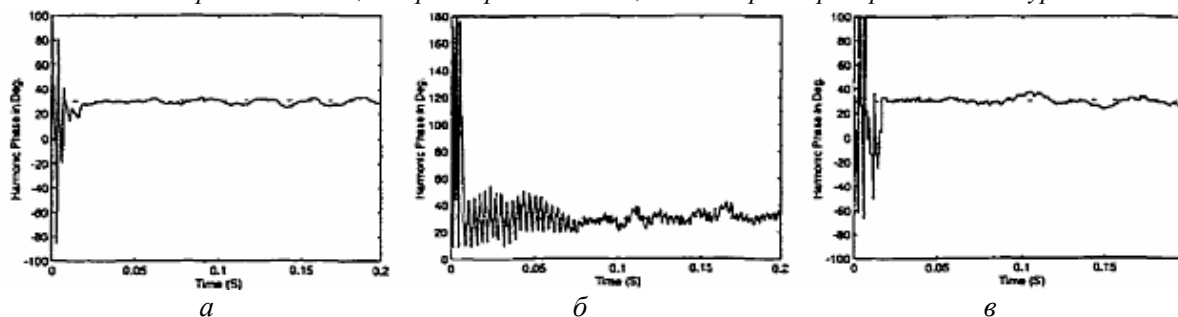


Рис. 2. Определение фазы 5-й гармоники:

а – нейронной сетью, б – фильтром Калмана, в – быстрым преобразованием Фурье

Возможность быстрого определения параметров основной гармоники – важнейшая задача, которую необходимо решить при реализации системы управления АФ. В тоже время, АФ, как правило, включаются в состав активных фильтрокомпенсирующих устройств (АФКУ), где всю мощность искажений (все гармоники, кроме первой) компенсирует один инвертор. В высоковольтных СЭЭС такие системы работают на пределе возможностей, что связано с ограничениями по частоте коммутации и номинальной мощности используемых полупроводниковых ключей. Кроме того, поломка одного узла такой системы приводит к выходу из строя всего АФКУ.

Существует ряд работ, предлагающих использование многоконверторных или модульных топологий АФ, лишенных обозначенных недостатков со стороны силовой части, но имеющими те же проблемы в реализации их систем управления. В модульной реализации фильтрация распределяется между несколькими модулями активных фильтров, имеющих одинаковую структуру и схемотехнику. Мощность и частотная характеристика каждого модуля определяется конкретными задачами фильтрации, возлагаемыми на этот конкретный модуль.

Цель статьи. Предлагаемый в настоящей статье подход основывается на использовании адаптивных фильтров и теории наблюдающих устройств, а также реализацию в системе управления аппроксимации фильтруемого сигнала суммой синусоидальных составляющих. Он позволяет построить АФ с низкими потерями на переключение, высокой надежностью, гибкостью, быстрым откликом, самонастройкой и высокой точностью.

Изложение основного материала. На рис. 3 приведена структурная схема предлагаемого АФ. Блок выделения основной гармоники представляет собой наблюдающее устройство, содержащее эталонную модель источника энергии СЭЭС, т. е. дизель-генератора (ДГ). По доступным для измерения искаженным линейным напряжениям и фазным токам сети этот блок восстанавливает амплитуду и частоту ЭДС синхронного генератора (СГ) ДГ. Известно, что напряжение на клеммах генератора отстает от ЭДС на угол, зависящий от нагрузки СГ.

С другой стороны, очевиден подход аппроксимации фильтруемого сигнала суммой гармонических составляющих ряда Фурье (1):

$$Y = \sum_{n=1, \dots, N} [A_{n1} \cos(n\omega t) + A_{n2} \sin(n\omega t)], \tag{1}$$

где ω – частота основной гармоники сигнала;

n – номер гармоники;

A – амплитуды составляющих.



Рис. 3. Структурная схема предлагаемого АФ

То есть непрерывный сигнал есть суммой синусоидальных и косинусоидальных составляющих с соответствующими амплитудами и частотами. Такой подход реализуется при разложении в ряд Фурье с помощью искусственных нейронных сетей (рис. 4). Однако, т. к. фазные напряжения имеют плавающий сдвиг фазы относительно восстановленных ЭДС, то в блоке выделения составляющих сигнала искажения сигнал аппроксимируется суммой синусоидальных составляющих с изменяемыми амплитудами и фазами. В блоке формирователя сигналов компенсации вычисляются и распределяются сигналы управления, создающие на выходах силовой части фильтра токи и напряжения, равные и обратные по знаку составляющим сигнала искажения.

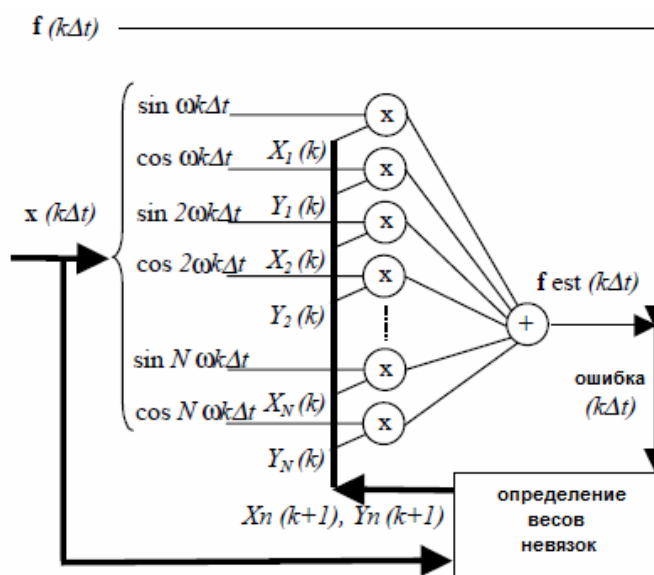


Рис. 4. Схема разложения в гармонический ряд с помощью искусственной нейронной сети

Гармонические составляющие более высоких порядков, как правило, имеют меньшую амплитуду. В связи с этим в предложенном фильтре силовые преобразователи, отвечающие за подавление гармонических составляющих низкого порядка, работают с более высокими напряжениями, но с более низкочастотными коммутациями, в то время как преобразователи, отвечающие за подавление более высоких гармоник, работают с меньшими рабочими напряжениями, но с повышенной частотой переключений. В результате, общие коммутационные потери значительно снижаются в связи с избирательным действием на определенные гармоники и сбалансированным показателем «мощность-частота» каждого конвертора. Результат математического моделирования работы предложенного АФ приведен на рис. 5.

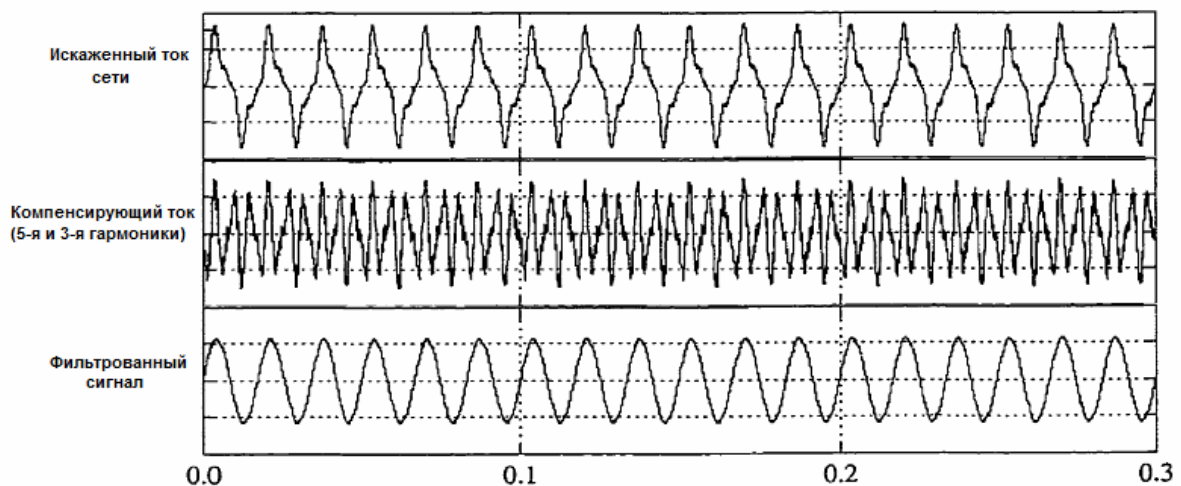


Рис. 5. Результат моделирования работы компенсирующих модулей АФ

Заключение. Представлен новый метод построения АФ на основе наблюдающего устройства, адаптивного аппроксиматора и модульной топологии фильтра, позволяющей избирательно подавлять высшие гармоники мощности искажений. Фильтр лишен недостатков известных реализаций на нейронных сетях в виде неконтролируемого ухода основной частоты при скачке фазы опорного сигнала, медленной адаптации к резким изменениям характера искажений и т. п. АФ может работать в сетях с изолированной нейтралью и дисбалансами токов и напряжений при неизвестных фазных напряжениях сети.

Список использованных источников

1. Жиленков А. А. Влияния мощных тиристорных выпрямителей на питающую их автономную электростанцию / А. А. Жиленков // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 5/8 (59). – С. 14-19.
2. Качество электрической энергии на судах : справочник / В. В. Шейнихович, О. Н. Климанов, Ю. И. Пайкин, Ю. Я. Зубарев. – Л. : Судостроение, 1988. – 160 с.
3. Плахтина О. Г. Частотно-управляемые асинхронные и синхронные электроприводы / О. Г. Плахтина, С. С. Мазепа, А. С. Куцик. – Львов : Издательство Национального университета «Львовская политехника», 2002. – 227 с.
4. Чёрный С. Г. Разработка системы автоматизированного проектирования для сложных структур / С. Г. Чёрный, Н. А. Козуб, Н. А. Субботина // Системний аналіз та інформаційні технології : матеріали XIV Міжнар. науково-технічної конф. SAIT 2012 (м. Київ, 14 квітня 2012 р.). – К. : ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ», 2012. – С. 425-426.