

УДК 621.313.3

Моделирование работы активного фильтра гармоник в электрической сети под нагрузкой с нелинейной вольт-амперной характеристикой

Н. В. Савельев*, В. В. Рожков

Для задач электроэнергетики и электропривода предложен модернизированный вариант активного фильтра, основная область применения которого — электроэнергетика. В работе уделено внимание применению активных фильтров в составе частотно-регулируемого электропривода, содержащего вариант силовой схемы «неуправляемый выпрямитель – звено постоянного тока с конденсатором и тормозной цепью — автономный инвертор напряжения». Рациональной сферой применения активных фильтров в частотно-регулируемом электроприводе является область высоковольтных, мощных электроприводов, например для буровых установок, насосов и компрессоров газоперекачивающих агрегатов. Еще одна задача, рассматриваемая в работе, — выработка рекомендаций по модернизации двухуровневых автономных инверторов напряжения в составе частотного электропривода в виде замены на многоуровневые, в первом приближении — трехуровневые. Такая замена позволяет уменьшить негативный эффект широтно-импульсной модуляции выходного напряжения инвертора на двигатель, увеличить его долговечность, снизить необходимость в использовании дорогостоящих частотно-регулируемых двигателей с улучшенной изоляцией и непроводящими керамическими подшипниками.

Комплексное устройство, содержащее в своем составе частотно-регулируемый электропривод с многоуровневым инвертором напряжения и активный фильтр с предлагаемым модернизированным алгоритмом управления, представляет собой усовершенствованную систему управления электропривода. Такая схема щадяще воздействует на объект управления — асинхронный двигатель и не вносит существенные искажения в питающую сеть.

В работе средствами моделирования в системе компьютерной математики MatLab исследован модернизированный вариант управления активным фильтром, в котором используется высокоскоростное вычислительное устройство. С помощью него выделяются первые гармоники трех фаз сетевых токов. Выделенный сигнал применяется в качестве задания для организации алгоритма управления активным фильтром. В отличие от известных вариантов, настраиваемых на определенный достаточно узкий спектр гармонических искажений, предлагаемый способ расширяет область применения активного фильтра для объектов и устройств с различными типами искажений. При этом появляется дополнительная возможность проектирования фильтра для частотно-регулируемых электроприводов с учетом только показателей мощности искажений. На представленном примере частотно-регулируемого электропривода газоперекачивающего агрегата сопоставлено качество сигналов сетевых токов и напряжений с нормами действующих стандартов. В итоге получено, что применение модернизированного алгоритма управления активным фильтром позволяет повысить среднее значение коэффициента мощности с 0,975 до 0,99, а также значительно улучшить качество и синусоидальность сетевых фазных токов.

Ключевые слова: активный фильтр гармоник, гармонические искажения, алгоритм управления, цифровой фильтр, коэффициенты мощности и гармонических искажений, широтно-импульсная модуляция, координатные преобразования.

* nikitaxxxxxxxxx@rambler.ru

В электроприводе и электроэнергетике широко распространены двухзвенные полупроводниковые преобразователи, включающие неуправляемый выпрямитель и автономный инвертор. Для задач электропривода по такой схеме собираются преобразователи частоты [1], для задач электроэнергетики — агрегаты бесперебойного питания. Силовая часть инверторов подобных преобразователей построена, как правило, на IGBT-транзисторах. Полупроводниковый преобразователь для питающей электрической сети является нелинейной нагрузкой и схема «выпрямитель–инвертор» потребляет из сети существенно несинусоидальный ток. Нормальное функционирование потребителя с высоким требованием к коэффициенту гармонических искажений THD (total harmonic distortion) может нарушаться при подключении мощного полупроводникового преобразователя частоты к той же секции шин питающего трансформатора. Основными признаками, указывающими на плохую электромагнитную совместимость устройств, являются внезапные отключения, ложные срабатывания защит, отклонения от номинальных режимов и, в худшем случае, — выход из строя оборудования. Для улучшения гармонического состава сетевых напряжений, повышения синусоидальности сетевых токов, как правило, используются пассивные и активные фильтры [2]. Пассивные фильтры представляют собой простые структуры из пассивных элементов — RC -цепи. Они громоздки и зачастую имеют массогабаритные показатели, сопоставимые с самим преобразовательным устройством. Помимо этого, для каждого конкретного применения необходимо разрабатывать схему фильтра, учитывающую особенности преобразователя и его «обвязки». В отличие от пассивных, активные фильтры (АФ) представляют собой транзисторные преобразователи, построенные по мо-

стовым схемам. Наиболее распространенной является схема двухуровневого активного фильтра.

Основная идея функционирования АФ состоит в определении сигнала помехи, который формируется при работе нелинейной сетевой нагрузки, и формировании противофазного сигнала этой помехи в сеть. Можно выделить следующие варианты функционирования АФ:

1. Система управления АФ определяет тройку первых гармоник сетевых токов, которые алгебраически вычитаются из тройки сетевых токов нагрузки. Полученный сигнал — токовый сигнал задания для релейного регулятора в системе управления транзисторными ключами активного фильтра. В данном случае в основе работы фильтра лежит принцип работы, сходный с функционированием источника тока [3] (рис. 1). Такой принцип работы справедлив лишь для двухуровневой схемы активного фильтра, так как она не предполагает необходимости стабилизации напряжений звена постоянного тока.

2. Комбинированный вариант работы активного и пассивного фильтров. В качестве задания для системы управления АФ используется противофазный сигнал наиболее неблагоприятных гармоник в кривых фазных токов нагрузки. Спектр высших гармонических искажений или не фильтруется вовсе, или применяется пассивный фильтр (рис. 2).

3. Для схем АФ третьего и выше порядков токовый принцип непригоден, т. к. необходима стабилизация напряжений звена постоянного тока. Для управления таким активным фильтром используют многоконтурное регулирование.

Возьмем вариант модернизации наиболее простого и эффективного первого варианта функционирования АФ.

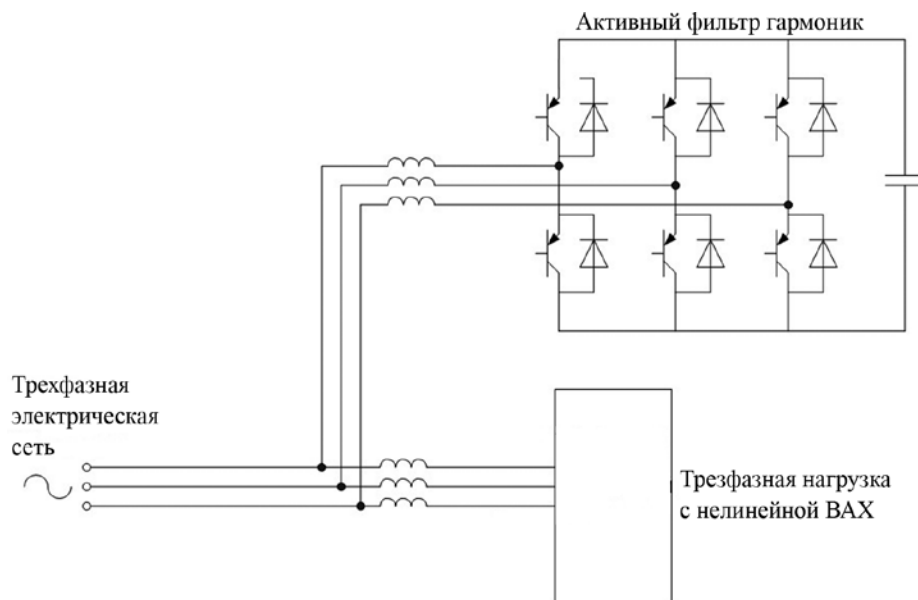


Рис. 1. Подключение АФ к электрической сети

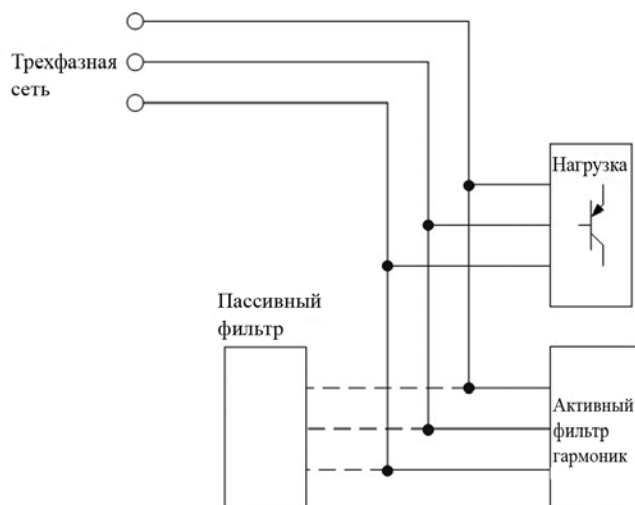


Рис. 2. Подключение комбинированного варианта АФ

Известный алгоритм управления предполагает формирование токового сигнала, противофазного помехе, создаваемой нелинейной нагрузкой любой природы. В отличие от известной технологии, предложим применение высокоскоростного вычислительного устройства (ВУ), с помощью которого можно выделять первые гармоники «тройки» сетевых фазных токов (на практике можно брать лишь значение первых гармоник на предыдущем периоде перед расчетным). Выделенный сигнал используется в качестве задания для функционирования системы управления активным фильтром.

На сегодняшний день, как правило, большинство производителей предлагают снабдить свои мощные полупроводниковые преобразователи активным фильтром гармоник для улучшения электромагнитной совместимости. В отличие от известных вариантов, подобный способ управления дает возможность подключения активного фильтра гармоник как самостоятельного устройства к сети с различными типами гармонических искажений. Данный алгоритм управления расширяет универсальности применения АФ и делает возможным его проектирование с учетом только показателей мощности искажений.

Для анализа свойств системы разработана модель в системе компьютерной математики Matlab. Был выбран шаг модельного времени (дискретизации), равный 10 мкс. Первоначально в качестве нелинейной нагрузки, работающей параллельно АФ, взята система асинхронного частотно-регулируемого электропривода. Преобразователь построен по трехуровневой схеме с автономным инвертором напряжения [4] на примере системы асинхронного частотно-регулируемого электропривода газоперекачивающего агрегата, которая установлена на одной газокompрессорных станций Смоленской области. Адекватность модели времени проверена путем сопоставления реальных осциллограмм сигналов сетевых токов и напряжений, а также токов нагрузки (асинхронного двигателя) их модельным аналогам. Параметры модели асинхронного дви-

гателя с короткозамкнутым ротором рассчитаны по Т-образной схеме замещения, указанной в паспортных данных двигателя [5] согласно методике [6]. Их достоверность проверена с помощью компьютерного эксперимента и сравнения с натурными данными.

Параметры электрической схемы преобразователя частоты, а также параметры согласующего трансформатора заложены в модель согласно паспортным данным преобразователя частоты [7]. Для второго опыта модель была значительно упрощена с целью получить характерные для мостовой схемы диодного выпрямителя искажения. При этом использованы стандартные блоки среды Matlab. При моделировании в системах компьютерной математики в качестве ВУ удобны блоки, реализующие преобразование Фурье. Нагрузкой неуправляемого выпрямителя выступает активно-индуктивное сопротивление, параметры которого подобраны из соображения реализации соизмеримой мощности искажений первому опыту моделирования с трехуровневым преобразователем частоты. Электрические схемы моделируемых нагрузок приведены на рис. 12, а, б.

В проведенных опытах фильтр подключался параллельно нагрузке. Проведен ряд компьютерных экспериментов. На рис. 3, а показана модель исследуемой системы в среде Matlab. На рис. 3, б, в — подмодели нагрузки и активного фильтра. Модель построена с применением как структурных библиотечных (стандартных) блоков среды Matlab, так и программируемых на внутреннем языке высокого уровня. Система управления оформлена в виде «s-функции». С точки зрения практической реализации, применение встроенных функций на языке высокого уровня предпочтительнее структурного моделирования. Такие программы сравнительно легко конвертируются в любую среду программирования. На рис. 3, а блок converter — подмодель силовой части преобразователя частоты, согласно схеме рис. 12, а. Моделирование асинхронного электродвигателя и согласующего силового трансформатора выполнено стандартными блоками Matlab из расширения SimPowerSystems с заданием параметров меню блоков согласно [5, 7]. Система управления инвертором преобразователя частоты реализована подмоделью SAU2 с векторным принципом управления. Выходная часть системы управления построена с использованием симплексных (цифровых векторных) алгоритмов управления транзисторами [3]. На рис. 3, в показана подмодель активного фильтра. В его составе силовая часть и система управления. Силовая часть выполнена по мостовой схеме транзисторного преобразователя. Система управления, как и для инвертора, представляет собой блок формирования импульсов управления транзисторными ключами. Она промоделирована блоком SU_filter1 (рис. 3, в). В ее составе блоки определения первых гармоник сетевых токов, а также релейный регулятор, работающий по рассогласованию

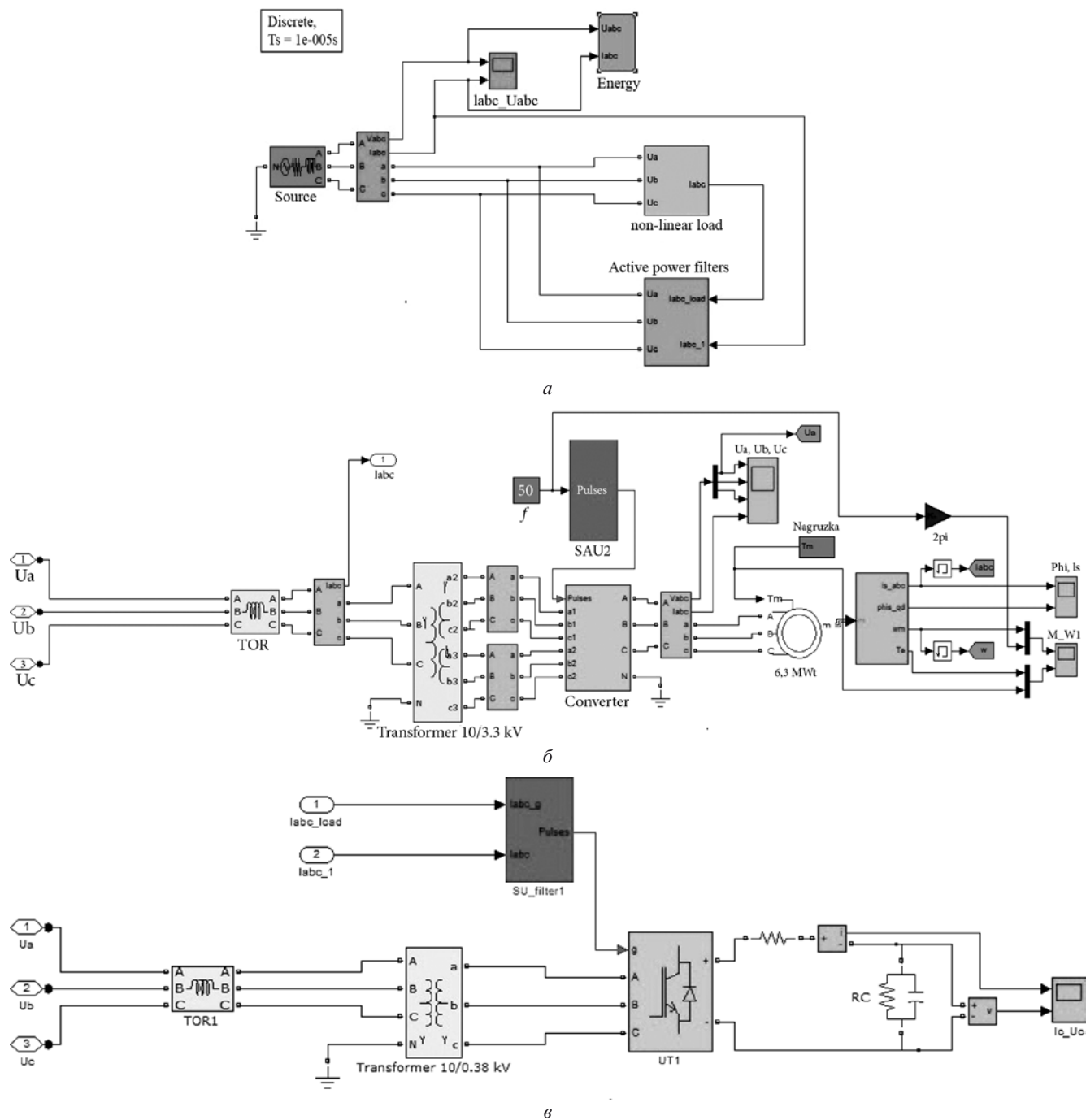


Рис. 3. Модель верхнего уровня (а), подмодели преобразователя частоты (б) и активного фильтра гармоник (в)

сигналов задания (первых гармоник) и «загрязненных» токовых сигналов.

На рис. 4 отражены зависимости угловой частоты $\omega(t)$ и электромагнитного момента $M(t)$ на валу двигателя от времени t для опыта пуска электропривода и разгона электродвигателя до установившейся частоты вращения.

На рис. 5 представлены осциллограммы кривых сетевых токов и напряжений при работе преобразователя частоты без применения АФ, а на рис. 6 показаны те же зависимости за тот же интервал времени при под-

ключенном активном фильтре гармоник. Выбор этого интервала обусловлен переходом системы из режима разгона в установившийся режим.

Для определения качества гармонического состава кривых сетевых токов используется THD — коэффициент гармонических искажений. Согласно [8] регламентируется лишь форма кривых сетевых напряжений, которая не должна отклоняться от основной гармоники более чем на 5%. Однако общепринято, что установка, подключаемая к сети, не должна вносить в сеть гармонические искажения, превышающие 5% как для

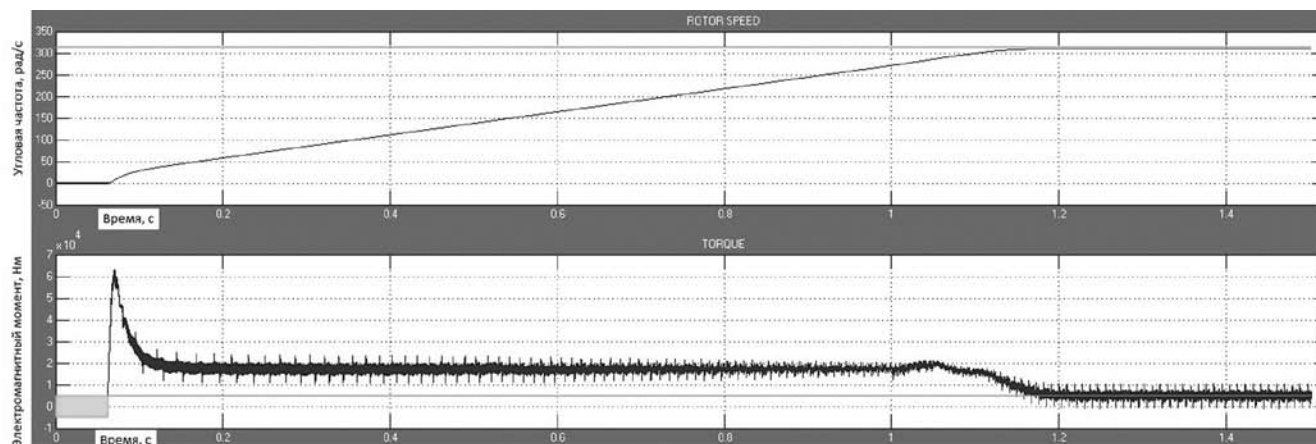


Рис. 4. Зависимости $\omega(t)$ и $M(t)$



Рис. 5. Фазные токи и напряжения сети без использования АФ

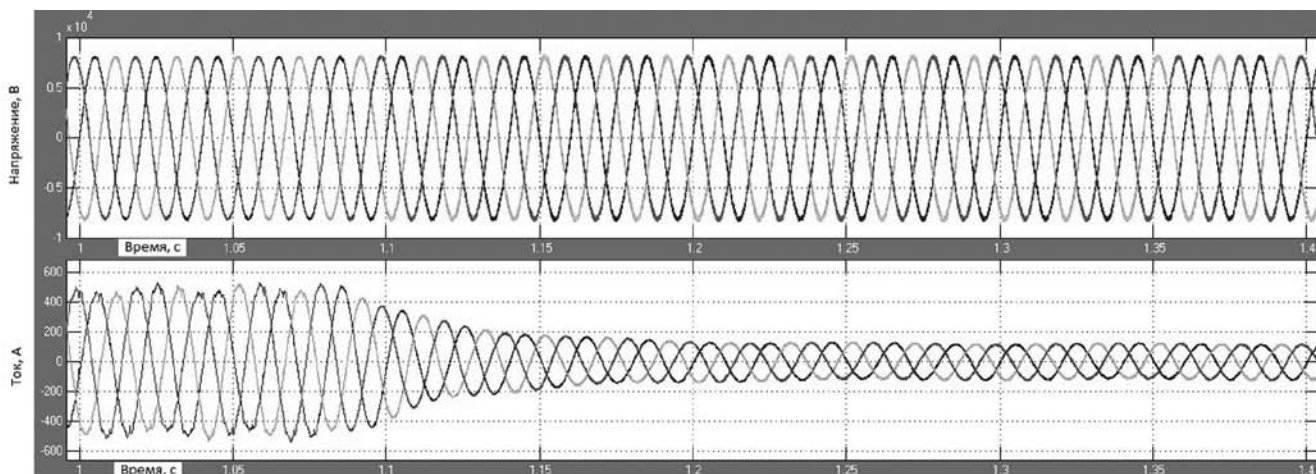


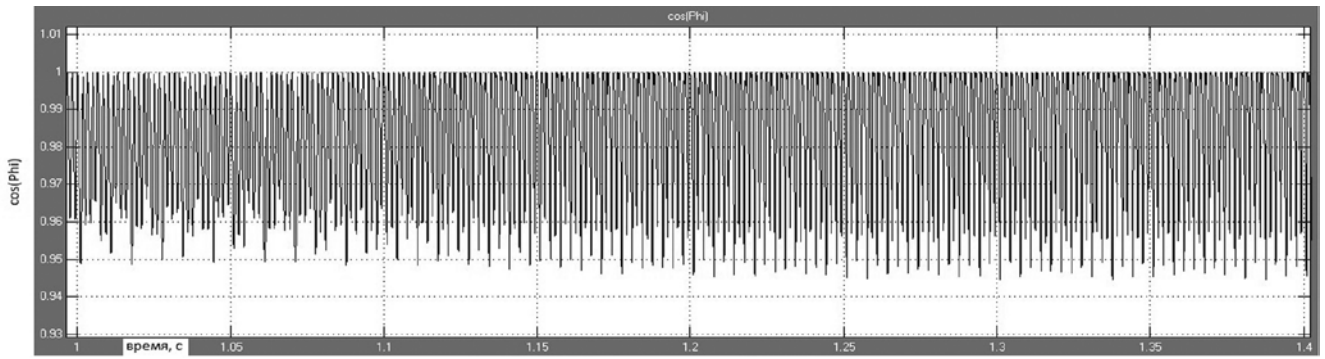
Рис. 6. Фазные токи и напряжения сети при использовании АФ

кривых сетевых фазных напряжений, так и для токов. В модель вводится дополнительный блок Energy, при помощи которого возможно определение $\cos(\varphi)$ (рис. 7, а, б; 8 а, б). Структура блока Energy приведена на рис. 13. Входящие в его состав блоки являются стандартными в среде Matlab..

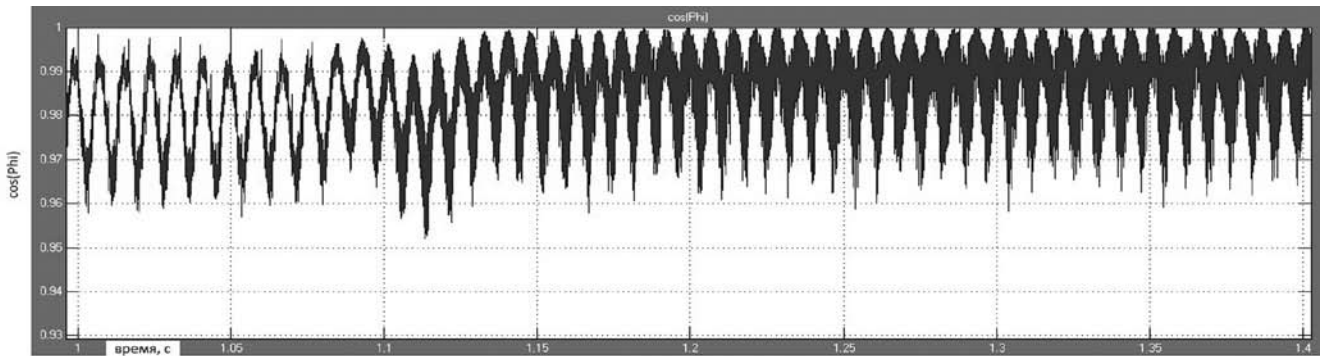
Анализируя форму кривых фазных сетевых токов (рис. 5, б), можно увидеть значительное улучшение

гармонического состава, о чем свидетельствует значение THD: для кривых сетевых фазных токов его значение снизилось с 0,33 до 0,05 (рис. 8 а, б). При этом, в противовес токовому, коэффициент гармоник THD повышается для кривых сетевых напряжений: 0,01 против 0,025.

В качестве альтернативной нелинейной нагрузки выбран обычный диодный выпрямитель, работающий на

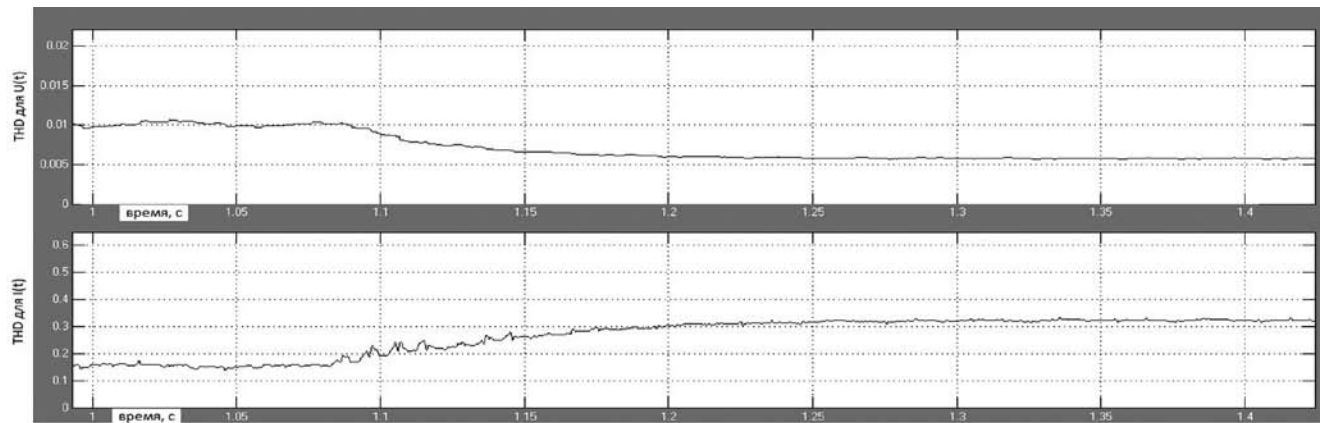


a

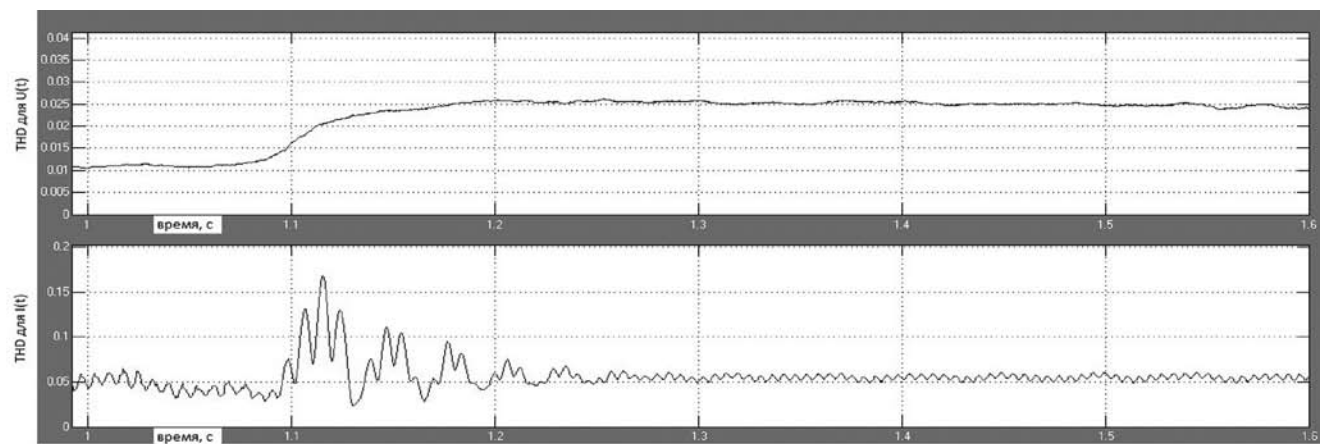


б

Рис. 7. Зависимости $\cos(\varphi)(t)$ без (а) и с (б) АФ



a



б

Рис. 8. Зависимости THD(t) без (а) и с (б) АФ

активно-индуктивную нагрузку. Таким образом, без использования АФ, согласно рис. 3, *а*, изменяем структуру блока «non-linear load» (рис. 3, *б*), как показано на рис. 9

Подмодель рис. 9 полностью соответствует схеме рис. 12, *б*. Она построена при помощи стандартных блоков среды Matlab.

Моделируем запуск системы без АФ и с активным фильтром. Для анализа выбран интервал времени от 0,3 до 0,35 с.

На рис. 10, *а* изображены зависимости сетевых напряжений и токов, на рис. 10, *б* — коэффициента гармонических искажений от времени. Аналогичные зависимости приведены на рис. 11, *а*, *б*, но при использовании активного фильтра гармоник.

Анализируя рис. 10, 11, можно сделать вывод: THD для кривых сетевых токов снижается со значения 0,28 до

0,04, однако THD для напряжения повышается со значения 0,013 до 0,05, что является допустимым по [8].

Результаты

Таким образом, предложен модернизированный алгоритм управления активным фильтром гармоник, проведено моделирование системы в среде Matlab для двух различных нелинейных нагрузок, рассмотрены другие возможные варианты формирования силовых частей и систем управления АФ. Выполнено сопоставление качества сигналов тока и напряжения нормам ГОСТ. Работа активного фильтра гармоник позволила повысить среднее значение $\cos(\varphi)$ с 0,975 до 0,99, а также значительно улучшить качество кривых сетевых фазных токов.

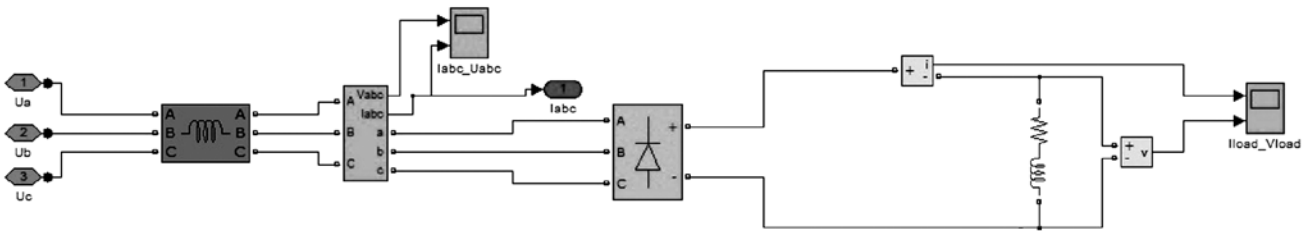
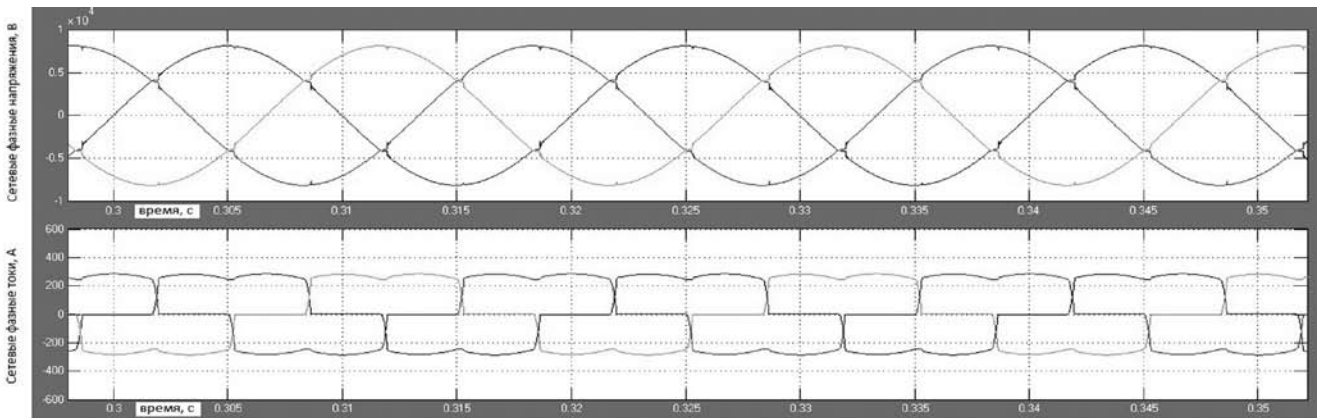
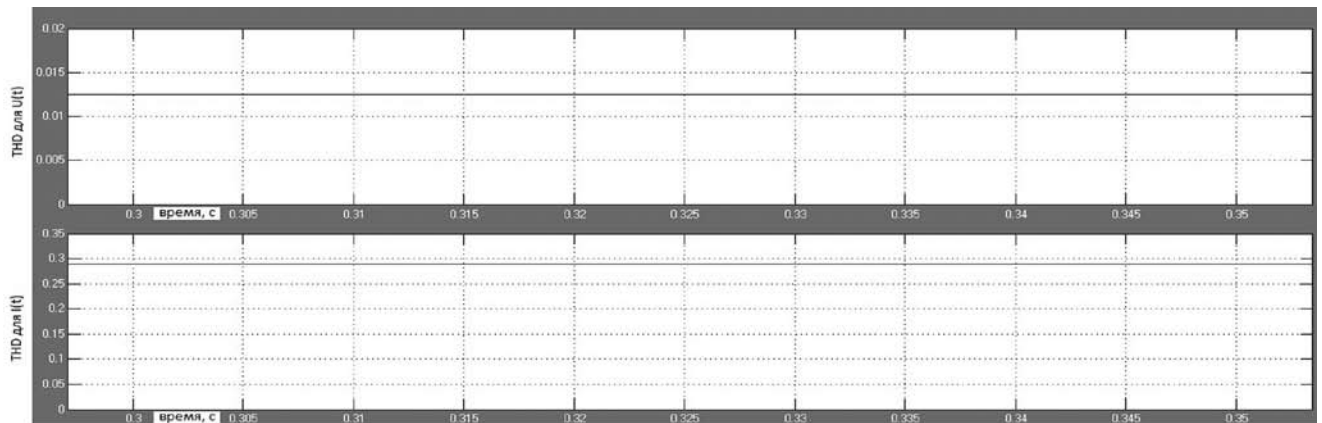


Рис. 9. Подмодель диодного выпрямителя

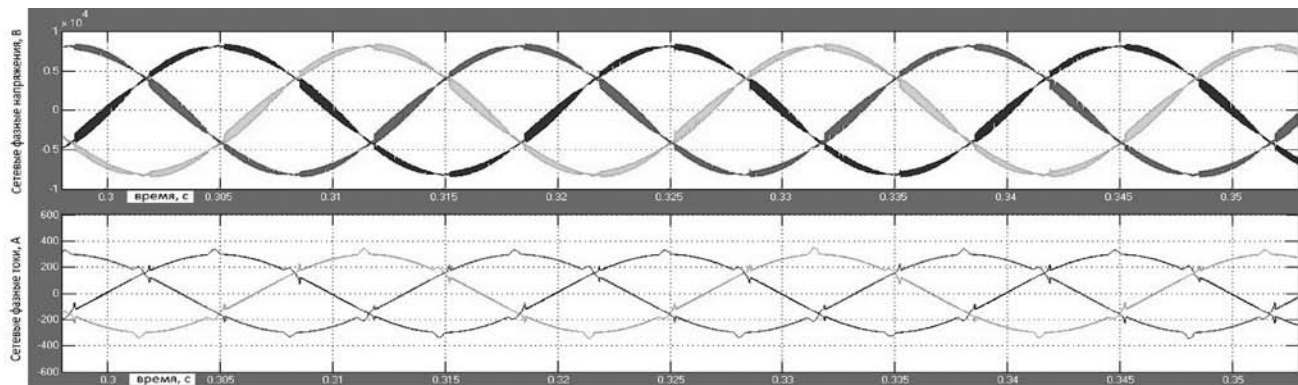


а

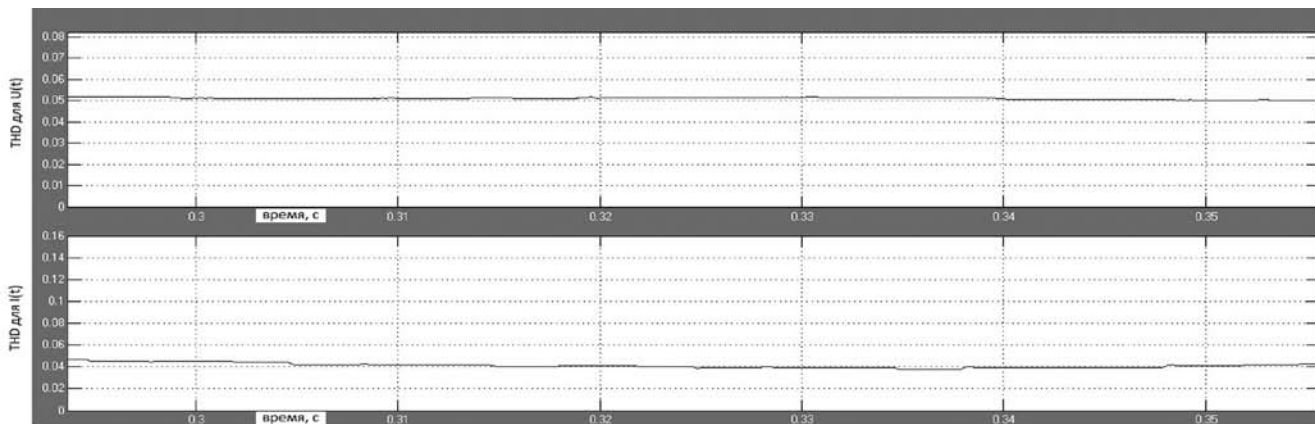


б

Рис. 10. Фазные токи, напряжения сети (*а*) и зависимость THD(*t*) (*б*) без использования АФ

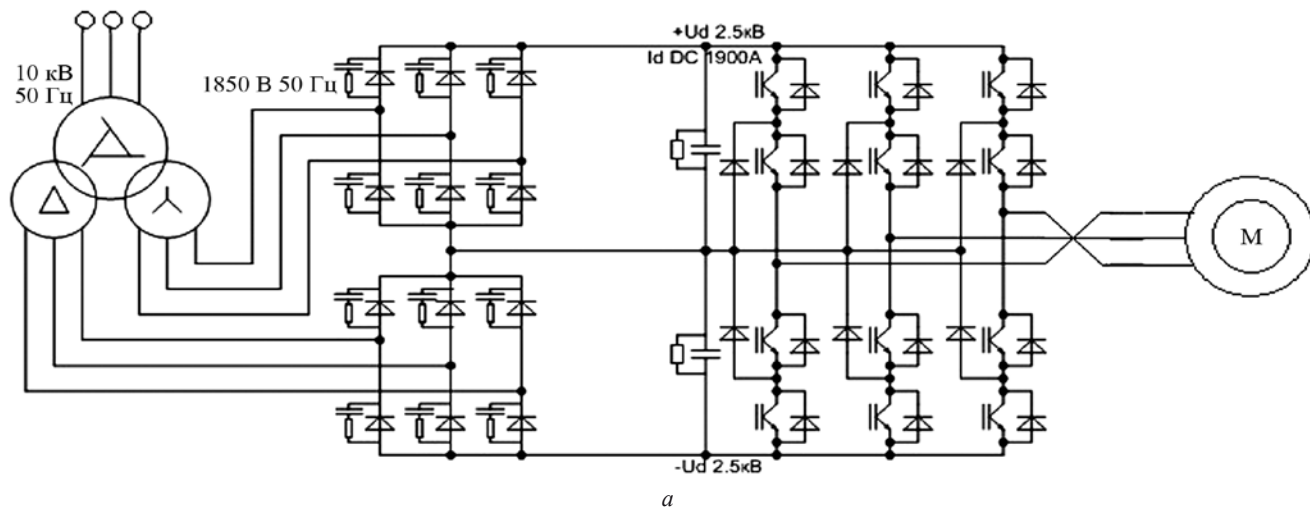


a

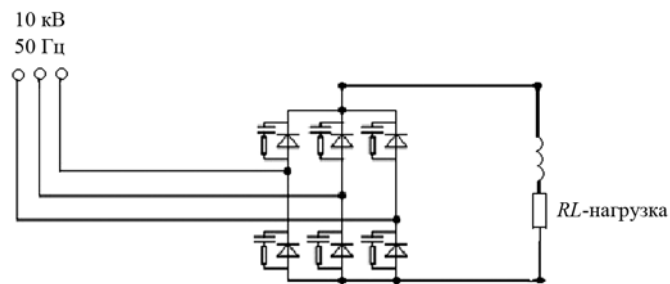


б

Рис. 11. Фазные токи, напряжения сети (*a*) и зависимость THD(*t*) (*б*) с использованием АФ

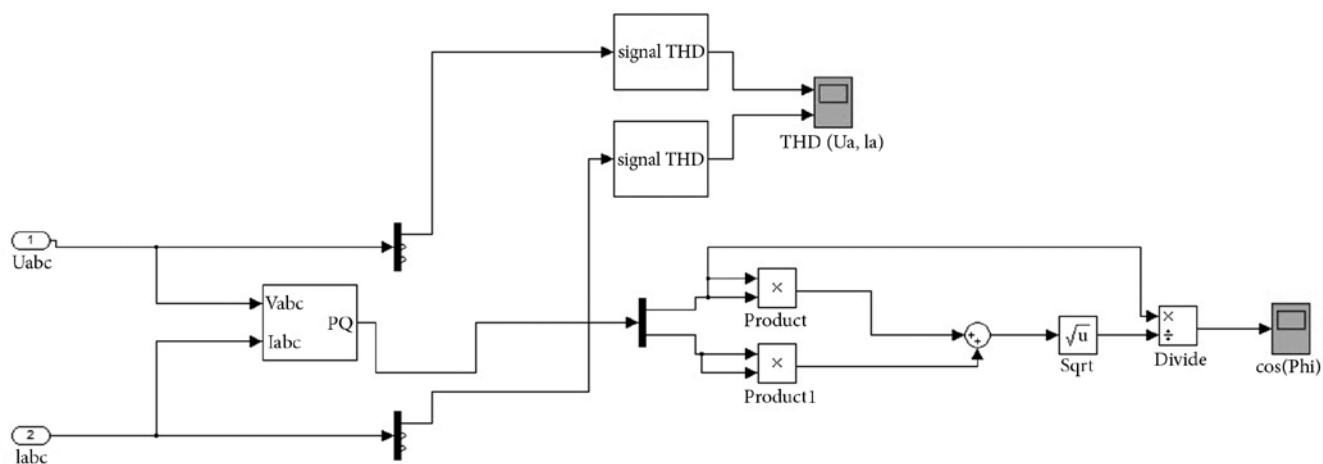


a



б

Рис. 12. Электрическая схема нагрузки, моделируемой в первом (*a*) и во втором (*б*) опытах

Рис. 13. Блок определения $\cos(\varphi)(t)$ и $\text{THD}(t)$ Energy

Литература

1. Усольцев А.А. Векторное управление асинхронными двигателями: Учеб. пособие по дисциплинам электромеханического цикла. СПб.: СПбГИТМО, 2002.
2. Сазонов В.В. Кондиционеры сети на основе активных фильтров // Электротехника. 2007. № 5. С. 28 — 34.
3. Данилов П.Е., Крутиков К.К., Рожков В.В. Управление частотно-регулируемым электроприводом: Конспект лекций по курсу «Специальные разделы теории электропривода». Смоленск: РИО филиала МЭИ в г. Смоленске, 2008.
4. Филатов В. Двух- и трехуровневые инверторы на IGBT // Силовая электроника. 2012. № 4. С. 38 — 41.

5. **Руководство** по эксплуатации. Двигатель высокоскоростной асинхронный с короткозамкнутым ротором 1TA2832 6AT01 Z. СПб.: ЗАО «РЭП Холдинг», 2007.

6. **Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В.** Электропривод энерго- и ресурсосбережение. М.: Издательский центр «Академия», 2008.

7. **Руководство** по эксплуатации. Преобразователь частоты ПЧТ 10. 8000 3 Ж 01. СПб.: ЗАО «РЭП Холдинг», 2007.

8. **ГОСТ 13109—97.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Статья поступила в редакцию 26.03.2015