

Л. Э. Рогинская, А. А. Караваев

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

В статье рассматривается новый тип компенсатора реактивной мощности – компенсатор на базе конвертера и индуктивного накопителя энергии и приводится алгоритм управления им, проводится компьютерное моделирование компенсатора с целью выявления его работоспособности и основных характеристик. Статья подготовлена в рамках целевой федеральной программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»+ на 2009–2013 годы. *Реактивная мощность; компенсатор реактивной мощности; регулирование реактивной мощности; индуктивный накопитель энергии; компьютерное моделирование; Matlab; Simulink*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее значение приобретают вопросы энергосбережения и качества электроэнергии. Одним из аспектов качественного и эффективного снабжения потребителей электроэнергией является рационально организованная компенсация реактивной мощности [1]. В данной работе рассмотрено оригинальное устройство для компенсации – компенсатор реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии.

Данный компенсатор имеет преимущества перед традиционными компенсаторами – регулируемые конденсаторными батареями по целому ряду показателей (например, точности и скорости регулирования реактивной мощности). По сравнению с системами типа SVC Light компании ABB [2] рассматриваемый компенсатор имеет более простую конструкцию (в 2 раза меньше транзисторов, нет токоограничивающих реакторов) и лучшие регулировочные характеристики.

По нашему мнению, исследованию компенсаторов с индуктивными накопителями энергии уделяется мало внимания, и данная работа призвана несколько улучшить существующее положение дел.

1. КОМПЕНСАТОРЫ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В России в большинстве случаев для компенсации реактивной мощности применяются регулируемые и не регулируемые конденсаторные установки, реже синхронные компенсаторы и статические тиристорные компенсаторы [3]. Конденсаторные батареи имеют ряд недостат-

ков, основные из которых: чувствительность к высшим гармоникам, перенапряжениям и повышенной температуре, а также необходимость в специальных схемах включения и отключения.

Компенсаторы реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии промышленными предприятиями не производятся. Однако на нашем и европейском рынках имеются компенсаторы реактивной мощности с емкостными накопителями энергии [2], но они дороги и в России представлены не достаточно широко.

Впервые компенсатор реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии был разработан как экспериментальный образец в конце 70-х годов прошлого столетия [4]. В настоящее время на основе новых технологий силовой электроники и с применением высокопроизводительных микроконтроллеров есть возможность создать серийный конкурентоспособный компенсатор с индуктивным накопителем энергии.

2. КОМПЕНСАТОР С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Компенсатор с индуктивным накопителем энергии состоит из последовательно подключенного Г-образного LC фильтра нижних частот и трехфазного мостового полупроводникового преобразователя с индуктивностью (дроссель с зазором) на стороне постоянного тока. Принципиальная схема компенсатора приведена на рис. 1. Трехфазный мостовой преобразователь (конвертер) образуют шесть полностью управляемых ключей с односторонней проводимостью – шесть IGBT-транзисторов. Компенсатор подключается к сети параллельно.

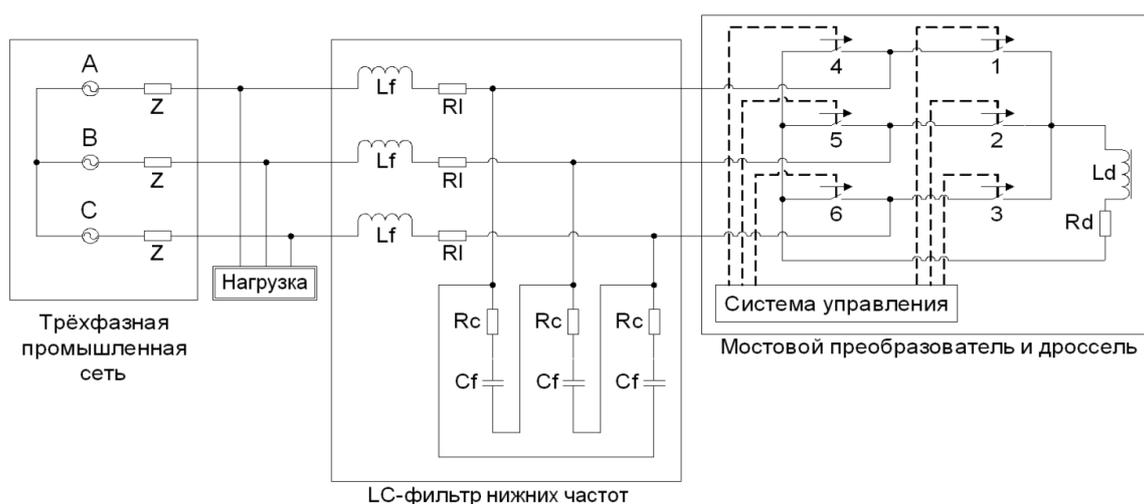


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема компенсатора

Принцип действия компенсатора заключается в управляемом энергообмене между сетью и дросселем посредством конвертера.

Способ управления компенсатором [5] основан на том факте, что в любой момент времени в трехфазной трехпроводной системе сумма токов всегда равна нулю, поэтому один из токов всегда равен сумме двух других с обратным знаком. Количество возможных случаев соотношения знаков токов выражается формулой 1 и приводится в таблице:

$$N = 2C_3^2 = 6. \quad (1)$$

Возможные случаи соотношения токов

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Ia | > 0 | < 0 | < 0 | < 0 | > 0 | > 0 |
| Ib | < 0 | > 0 | < 0 | > 0 | < 0 | > 0 |
| Ic | < 0 | < 0 | > 0 | > 0 | > 0 | < 0 |

Рассмотрим «первый случай» (все случаи аналогичны друг другу). Происходит потребление тока из фазы А и отдача тока в фазы В и С. В этот отрезок времени транзистор в положительной ветви моста фазы А открыт и ток из сети течет в дроссель. Для замыкания цепи (протекания тока) необходимо открыть транзисторы в отрицательных ветвях моста фаз В и С – сначала один, а потом другой. Время открытия и закрытия этих транзисторов находится из соотношения:

$$|Ib| / |Ic| = Tb / Tc,$$

где Ib , Ic – токи фаз В и С за промежуток времени $Tb + Tc$, Tb , Tc – время нахождения в открытом состоянии транзисторов в фазах В и С.

Для облегчения фильтрации высших гармоник целесообразно повысить несущую частоту с 300 Гц ($50 \text{ Гц} \times 6$) до 12600 Гц ($300 \text{ Гц} \times 42$).

Максимальная частота несущей определяется характеристиками используемых транзисторов и величиной потерь в них. Таким образом, алгоритм управления транзисторами основан на широтно-импульсном модулировании с несущей частотой в 12,6 кГц и организован таким образом, чтобы ток через дроссель не прерывался. Конвертер, изменяя угол включения и выключения транзисторов, осуществляет регулирование реактивной мощности.

3. КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ КОМПЕНСАТОРА

Для исследования разработанного компенсатора реактивной мощности была создана компьютерная модель в пакете Matlab с использованием Simulink[6]. Общая схема компьютерной модели компенсатора представлена на рис. 2: блок Source имитирует работу трехфазной сети промышленной частоты, блок Filter – трехфазный Г-образный фильтр нижних частот, блок IGBT – трехфазный мост с IGBT-транзисторами (рис. 3), блок RL – активно-индуктивная нагрузка (дроссель с зазором), блок Control – система управления транзисторами, блоки Load 1–3 – трехфазная активно-индуктивная нагрузка, блоки Breaker 1–4 – трехфазные выключатели, блоки V-Imes.1–3, V и I – блоки измерения токов и напряжений, блоки Power 1–3 и PQ – блоки измерения активных и реактивных мощностей, Scope 1–8 – осциллографы, RMS 1 – блок вычисления действующего значения тока фазы А, THD 1, 2 – блоки вычисления коэффициентов высших гармоник напряжения и тока фазы А, блоки Gain, Integrator и Pulse вычисляют среднезначное значение тока дросселя, блоки Switch 1,2, Const 1,2 и Clock включают и отключают компенсатор.

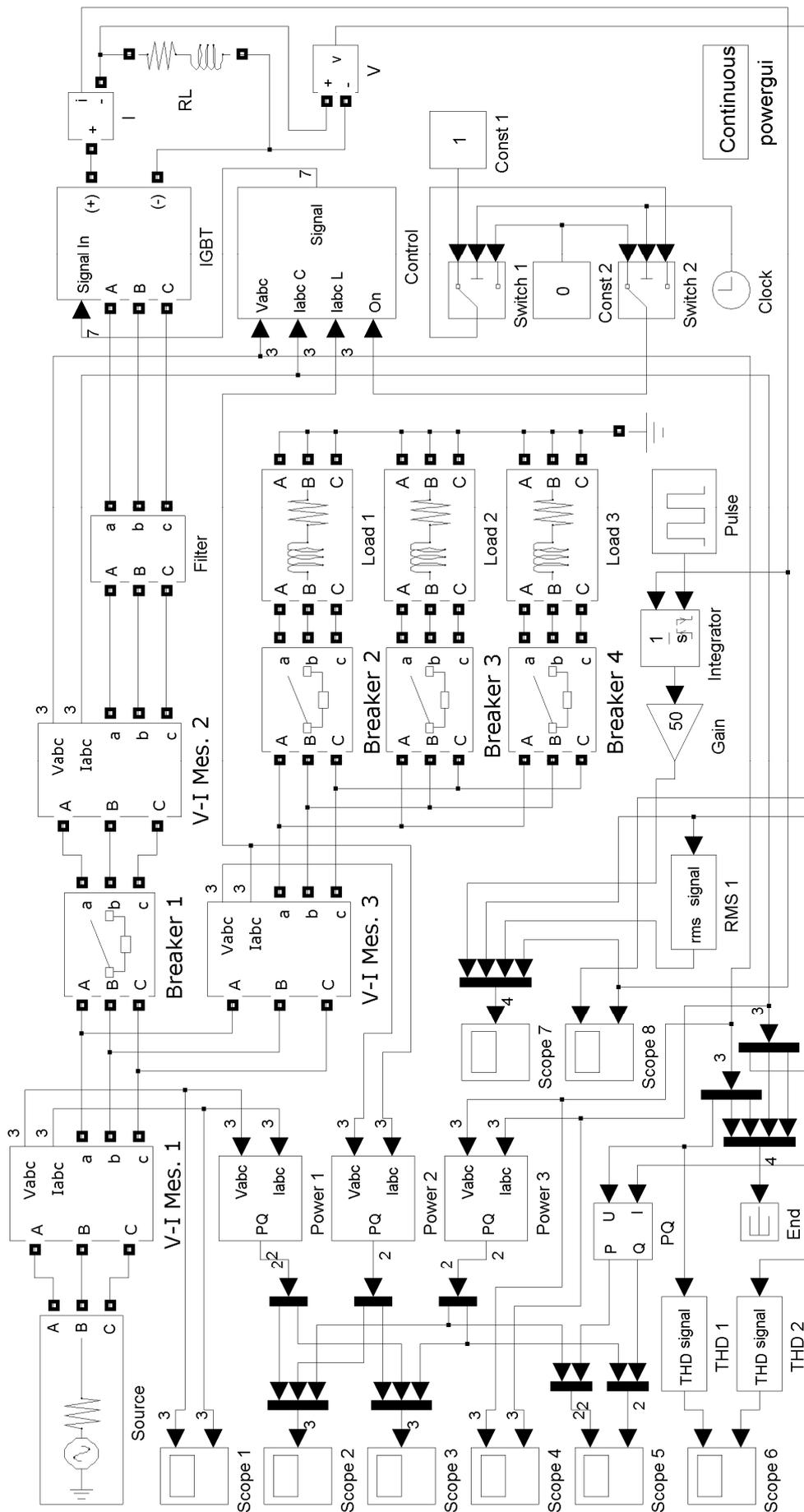


Рис. 2. Блок-схема модели компенсатора

В блок Control поступают измеренные мгновенные значения напряжения сети, токов компенсатора и нагрузки. На основе полученных данных производится расчет требуемого уровня реактивной мощности (компенсации), после чего вычисляются поправочные (регулируемые) коэффициенты для подсистемы переключения транзисторов. Переключение транзисторов происходит согласно вышеописанному принципу (п. 2). Кроме того, блок Control следит за наличием напряжения в сети (обрыв фазы) и максимальными значениями токов. В случае превышения пороговых значений токов (какая-либо аварийная ситуация) блок Control отключает все рабочие транзисторы (блоки IGBT 1–6 на рис. 3) и включает чоппер (тормозной транзистор – блок IGBT 7 на рис. 3) с небольшим добавочным (тормозным) сопротивлением (блок R на рис. 3).

На рис. 4 представлена упрощенная схема системы управления переключением транзисторов (блок Control на рис. 2). На данной схеме опущены подсистемы защиты, вычисления требуемой реактивной мощности и система синхронизации. На рис. 4 показан принцип формирования сигналов системы управления (блок Control на рис. 2). На рис. 4 представлены следующие блоки: Ia, Ib, Ic – источники квантованных по уровню синусоидальных сигналов, RS – источник пилообразного сигнала, причем период пилообразного сигнала равен периоду дискретизации квантованного по уровню синусои-

дального сигнала; Comp 1–3 – блоки сравнения с нулем; Abs 1–3 – блоки, выдающие модуль исходного сигнала; Scope 1, 2 – блоки осциллографа; NOT 1–9 – блоки логического отрицания; Prod 1–3 – блоки арифметического умножения; OR 1–6 – блоки логического «или»; RO 1–3 – блоки сравнения; AND 1–18 – блоки логического «и»; Out 1–6 – выходные блоки, блоки подачи сигналов на транзисторы 1–6 соответственно. На выходных блоках сигнал «1» соответствует состоянию «включено», а сигнал «0» – «выключено». Амплитуды всех сигналов равны единице. Квантованные по уровню синусоидальные сигналы по фазе полностью соответствуют синусоидам тока, который необходим для компенсации определенной реактивной мощности по первой гармонике.

Рассмотрим подробно несколько цепочек взаимодействия – остальные подобны рассматриваемым. В целях упрощения модели квантованные по уровню синусоиды уже синхронизированы с сетью и опережают соответствующие синусоиды напряжений на угол в 90° .

Квантованный по уровню синусоидальный сигнал с блока Ia поступает в блок Abs 1, на выходе которого получается модуль квантованного по уровню синусоидального сигнала, после чего он поступает в блок Prod 1 совместно с сигналом с блока RS. Сигнал с блока Abs 1 также поступает в блок RO 3.

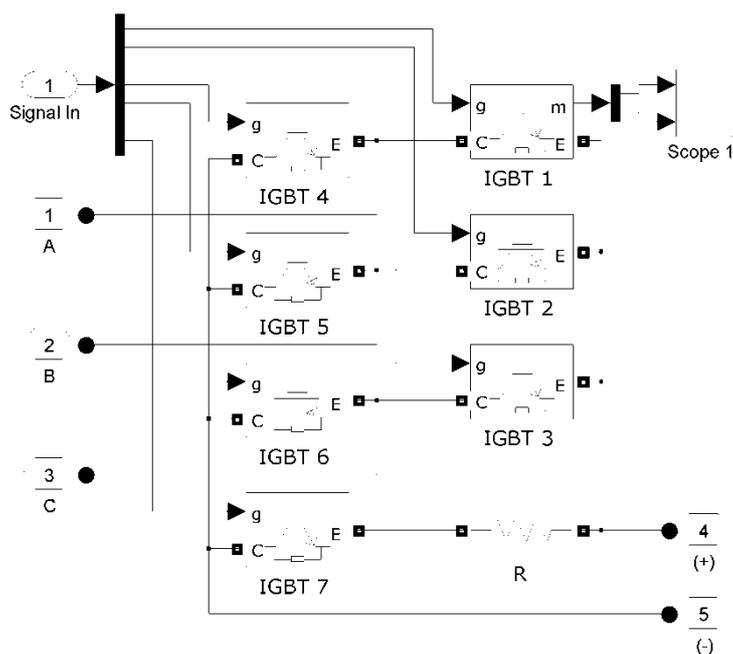


Рис. 3. Схема блока IGBT с рис. 2

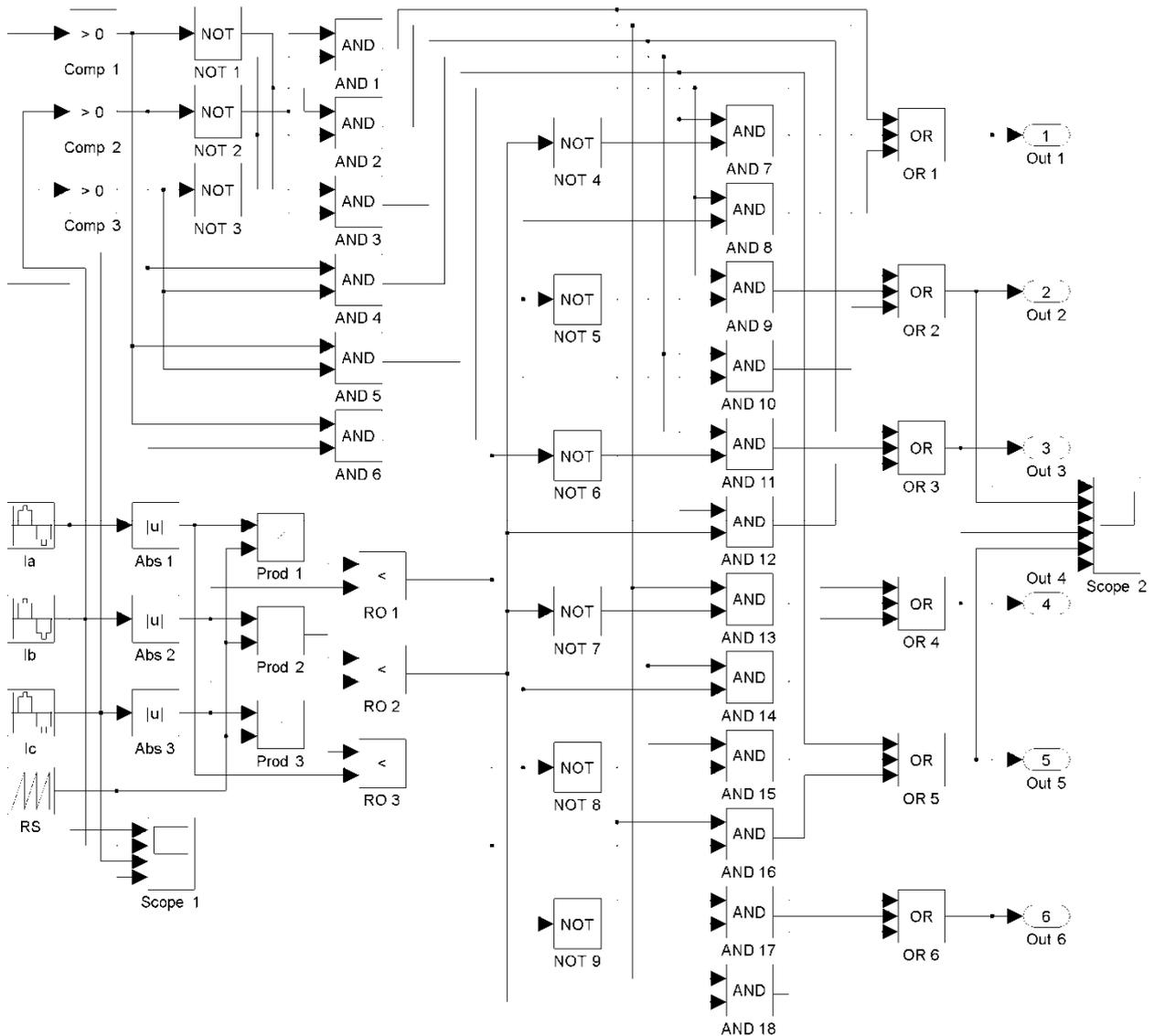


Рис. 4. Схема блока Control с рис. 2 (управляющая часть)

В блоке Prod 1 происходит умножение двух сигналов. На выходе получается пилообразный сигнал, вписанный в модуль квантованного по уровню синусоидального сигнала, или же пилообразный сигнал, промодулированный квантованным по уровню синусоидальным сигналом.

Последний сигнал сравнивается в блоке RO 1 с выходным сигналом блока Abs 2 – модулем квантованного по уровню синусоидального сигнала с блока Ib. Сигнал с блока RO 1 поступает в блоки NOT 6 и 9, AND 10 и 16. Сигналы с блоков NOT 6 и 9 после логического отрицания поступают в блоки AND 11 и 17, соответственно. Сигналы в блоках AND 10, 11, 16 и 17 подвергаются логической операции «И» совместно с другими соответствующими сигналами, после чего поступают в блоки OR 2, 3, 5 и 6 соответственно. Далее эти сигналы подвергаются логической операции «ИЛИ» совместно с дру-

гими соответствующими сигналами и поступают на выход блока Control (рис. 2) – в блоки Out 2, 3, 5 и 6 соответственно. Этой цепочке преобразования сигналов аналогичны цепочки: Ib, Abs 2, Out 1, 3, 4, и 6 (OR 1, 3, 4, и 6) и Ic, Abs 3, Out 1, 2, 4, и 5 (OR 1, 2, 4, и 5). Одновременно с этой цепочкой происходят следующие преобразования: сигнал с блока Ia поступает в блок Comp 1, где сравнивается с нулем, после чего поступает в блоки NOT 1, AND 5 и 6. Сигнал с блока NOT 1 после логического отрицания поступает в блоки AND 2 и 3 соответственно. Сигналы в блоках AND 2, 3, 5 и 6 подвергаются логической операции «И», совместно с другими соответствующими сигналами, после чего поступают в блоки AND 13, 18 и OR 2 (с блока AND 2), AND 14, 15 и OR 3 (с блока AND 3), AND 7, 12 и OR 5 (с блока AND 5), AND 8, 9 и OR 6 (с блока AND 6). Сигналы в блоках AND

7–9, 12–15 и 18 подвергаются логической операции «И» совместно с другими соответствующими сигналами и поступают в блоки OR 1–6, где они подвергаются логической операции «или», совместно с другими соответствующими сигналами, после чего поступают на выход блока Control (рис. 2) – в блоки Out 1–6. Этой цепочке преобразования сигналов аналогичны цепочки: Ib, Comp 2 – Out 1–6, и Ic, Comp 3 – Out 1–6.

Блоки Comp 1–3, NOT 1–3 и AND 1–6 реализуют разделение на шесть случаев в зависимости от знаков токов согласно таблице. Блоки Abs 1–3, Prod 1–3, RO 1–3 и RS производят увеличение несущей частоты переключений в 42 раза (до 12,6 кГц) и разделяют время работы соответствующих транзисторов пропорционально токам. Остальные блоки носят вспомогательный характер.

Таким образом, представленная компьютерная модель очень удобна тем, что в ней можно назначать времена включения и отключения того или иного блока, тем самым проверяя работу компенсатора в различных режимах. Имеется возможность произвольно менять все параметры компьютерной модели.

Параметры модели компенсатора подбирались исходя из электромагнитной совместимости с реальной промышленной сетью и из воз-

можности физической реализации (ограничение несущей частоты и т. д.). Реактивные сопротивления компонентов компенсатора рассчитываются исходя из требуемых значений пульсаций токов и напряжений и длительности протекания переходных процессов, а активные сопротивления минимизируются.

На рис. 5 и 6 представлены наиболее информативные диаграммы, поясняющие работу компенсатора. Ток, протекающий через дроссель, имеет постоянную и переменные составляющие со следующими основными частотами: 300 Гц, 12,6 кГц и 12,9 кГц. Фурье анализ динамики тока дросселя с базовой частотой в 300 Гц приведен на рис. 5. Величина пульсаций тока дросселя не превышает 10% от постоянной составляющей и напрямую зависит от индуктивности дросселя: чем выше индуктивность, тем меньше пульсации (связь – нелинейная). Диаграммы на рис. 6 даны для интервала времени 0,02 с (один период колебания сетевого тока), на них представлены диаграммы напряжения и тока фазы, а также ток дросселя и его среднее значение. Ток фазы опережает напряжение на 90° (электрических) и имеет пульсации около 3%. По амплитуде ток фазы примерно равен среднему значению тока дросселя.

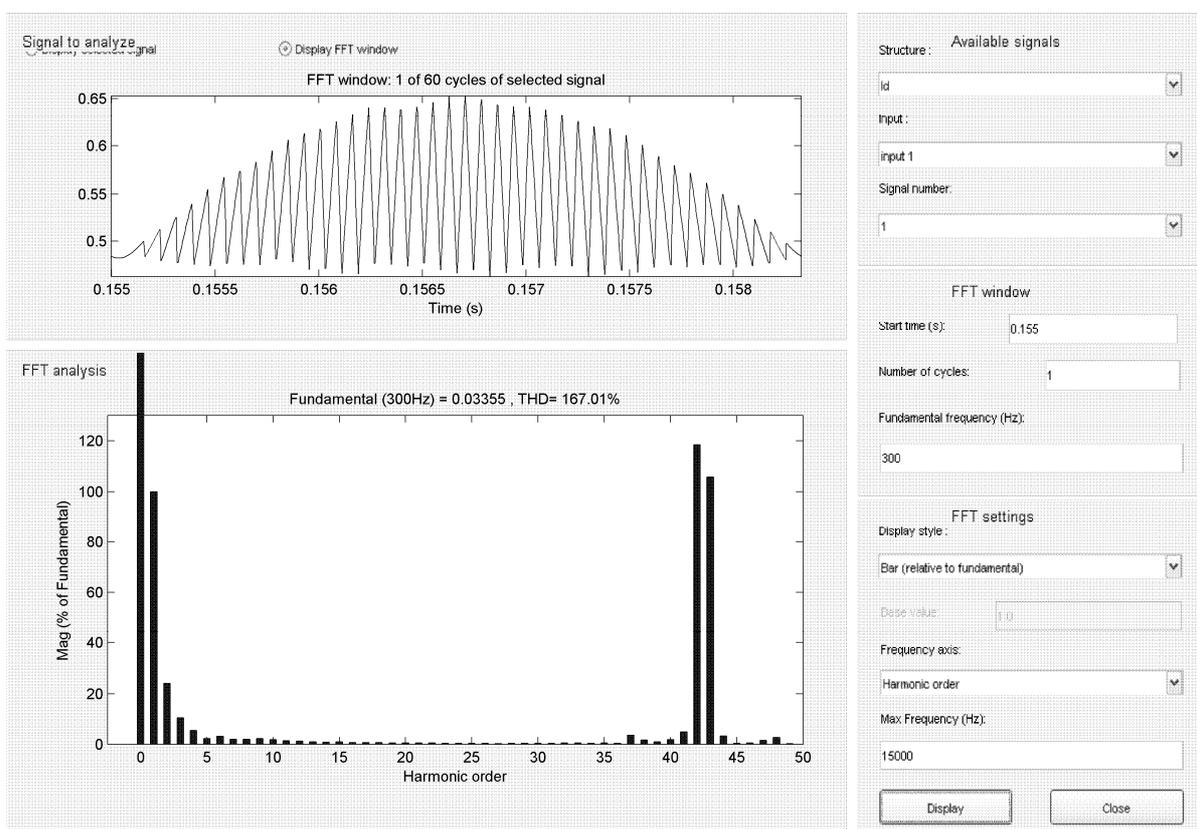


Рис. 5. Фурье анализ (FFT) динамики тока дросселя

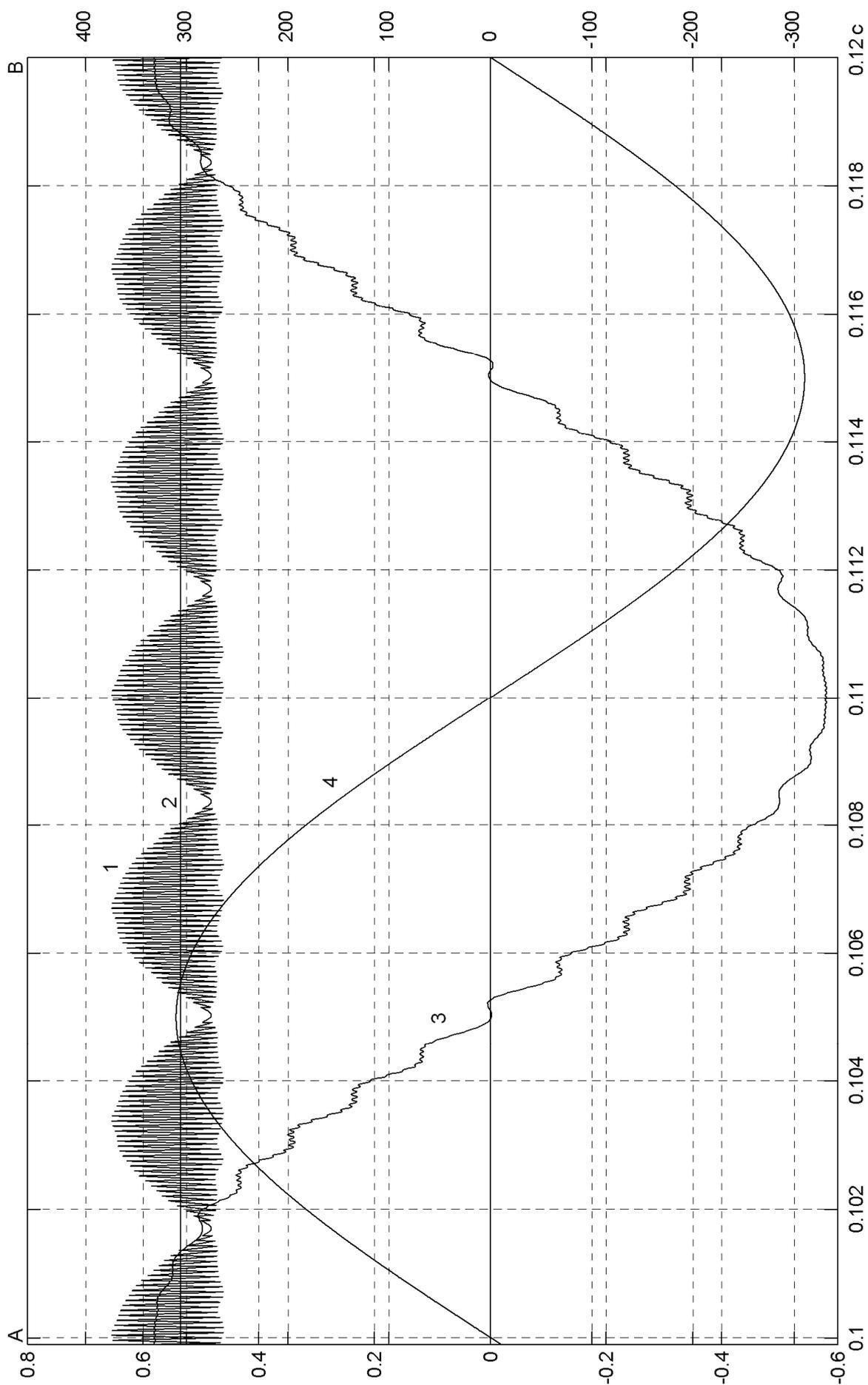


Рис. 6. Диаграммы токов и напряжений: 1 – ток дросселя, 2 – среднее значение тока дросселя, 3 – ток фазы, 4 – напряжение фазы

Добротность дросселя с зазором составляет:

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 12600 \cdot 0,05}{5} = 791,7.$$

Регулирование реактивной мощности компенсатора осуществляется за счет изменения угла отпираания транзисторов относительно напряжения сети (линейная зависимость). Технически регулирование осуществляется изменением поправочных коэффициентов в блоке Control на рис. 2. Регулирование реактивной мощности компенсатора осуществляется бесступенчато в пределах от 25% до 105% от номинальной мощности. Скорость регулирования от нуля до полной мощности не превышает 5 мс.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Компьютерное моделирование полностью подтвердило работоспособность предложенного компенсатора реактивной мощности и правильность разработанного алгоритма управления им [2], а также показало, что компенсатор обладает следующими характеристиками: 1) высоким энергетическим показателем (реальный КПД более 95%), мощность фильтра в условиях реальной сети составляет менее 1% от номинальной мощности компенсатора; 2) высоким быстродействием – длительность переходного процесса при любом изменении реактивной мощности составляет менее 0,005 с (1/4 периода колебания сетевого напряжения); 3) возможностью непрерывного (бесступенчатого) регулирования реактивной мощности в широком диапазоне.

ВЫВОДЫ

1. Компьютерное моделирование подтвердило возможность регулирования реактивной мощности с помощью компенсатора реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии.
2. Регулирование реактивной мощности осуществляется бесступенчато в пределах от 25 до 105% от номинальной мощности компенсатора и по времени при любом изменении нагрузки не превышает 5 мс.
3. Компенсатор имеет высокие энергетические показатели (КПД не менее 95%), мощность фильтра составляет менее 1% от номинальной мощности компенсатора.
4. Ток, протекающий через дроссель, имеет постоянную составляющую, равную макси-

мальному значению тока нагрузки. Процентное содержание высших гармоник в токе дросселя не превышает 10% от постоянной составляющей.

5. Компенсатор реактивной мощности на базе конвертера и индуктивного накопителя энергии является достойной альтернативой регулируемым конденсаторным батареям и компенсаторам реактивной мощности на базе конвертера и емкостного накопителя энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Караваяев А. А.** Компенсатор реактивной мощности с индуктивным накопителем энергии // Мавлютовские чтения: Всероссийск. молодежн. науч. конф: сб. науч. тр. / Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2009. Т. 2. С. 39–40.
2. **Прня Р., Чехов В. И.** Качество напряжения – новое в решении проблемы компенсации реактивной мощности // Электротехника. 1999. № 4. С. 32–34.
3. **Железко Ю. С.** Методы расчета нагрузочных потерь электроэнергии в радиальных сетях 0,38–20 кВ по обобщенным параметрам // Электрические станции. 2006. № 1.
4. **Липатов В. С.** Система управления статическими компенсаторами реактивной мощности // Электротехника. 1977. № 9. С. 44–47.
5. **Рогинская Л. Э., Стыскин А. В., Караваяев А. А.** Трехфазный компенсатор реактивной мощности и способ управления им. Патент России № 2368992. 2009. Бюл. № 27.
6. **Черных И. В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.

ОБ АВТОРАХ

Рогинская Любовь Эммануиловна, проф. Дипл. инж.-электромех. по электр. машинам и аппаратам (Горьковск. политехн. ин-т, 1959). Д-р техн. наук по преобразовательной технике (Московск. гос. электротехн. ун-т). Иссл. в обл. электротехники.

Караваяев Артем Александрович, аспирант. Дипл. магистр техники и технологий по электротехнике, электромеханике и электротехнологиям (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. электротехники, электроэнергетики и реактивной мощности.