

**В. Г. ЯГУП**, д-р техн. наук, проф. ХНУГХ имени А.Н.Бекетова

**Е. В. ЯГУП**, канд. техн. наук, доц. УкрГУЖТ

### **ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СИСТЕМЕ С СИЛОВЫМ АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ, УПРАВЛЯЕМЫМ ПО ОПТИМИЗАЦИОННОМУ АЛГОРИТМУ**

**Введение.** Электроснабжение реальных потребителей сопровождается рядом нежелательных явлений, ухудшающих условия работы питающей сети и всей системы электроснабжения в целом. Такими факторами, обуславливающими ухудшение технико-экономических показателей системы электроснабжения, являются возникновение несимметрии, генерация высших гармоник, а также реактивный характер самой нагрузки. Асинхронные двигатели являются одними из наиболее распространенных, массовых электропотребителей, генерирующих реактивную мощность. На их долю относят до 65% всей реактивной энергии, потребляемой в системе электроснабжения. По этой причине весьма актуальным является вопрос компенсации реактивной мощности, обусловленной работой асинхронного двигателя. Конденсаторная компенсация реактивной мощности представляет собой наиболее простой метод борьбы с нежелательными неактивными составляющими мощности. Достаточно подробно вопрос выбора параметров компенсирующих устройств рассмотрен в фундаментальных трудах киевских ученых [1,2]. В работах [3-6] предложены и успешно реализованы алгоритмы решения этой задачи на основе оптимизационных алгоритмов. В то же время в последнее десятилетие проводятся интенсивные исследования по разработке и внедрению силовых активных фильтров [7-9]. Эти устройства реализованы на силовых полупроводниковых приборах и оснащены интеллектуальной системой управления, обеспечивающей компенсацию реактивной мощности, мощности несимметрии и паразитных высших гармонических составляющих токов и напряжений в системе электроснабжения. Алгоритмы работы систем управления достаточно сложны и основаны на измерениях токов и напряжений в системе с последующими математическими преобразованиями для получения необходимой информации, на основе которой формируются токи, инжектируемые силовым активным фильтром в собственно систему электроснабжения.

**Постановка задачи.** В настоящей работе поставлена задача применить алгоритмы поисковой оптимизации для обеспечения работы силового активного фильтра, обеспечивающего компенсацию реактивной мощности в системе электроснабжения асинхронного двигателя, а также реализовать предложенные методы на компьютерной модели и проверить работоспособность такой системы в целом.

**Материалы исследования.** Модель системы электроснабжения асинхронного двигателя в укрупненном структурном виде представлена на рис.1. Здесь элементы системы представлены блоками, соединенными друг с другом через внешние выводы. Блок SES представляет собой собственно систему электроснабжения, блок SAF – силовая часть активного фильтра, блок CJNTR0L system – система управления активным фильтром.

На рис.2 приведена модель собственно системы электроснабжения асинхронного двигателя SES. В качестве модели двигателя используется библиотечная модель SimPowerSystem типа 10HP 460 V 60 Hz 1760 RPM. В качестве входа по механическому воздействию выбран из раскрывающегося списка вариант “Torque”, и в качестве нагружающего момента подан постоянный момент величиной 20 Нм. Тип ротора задан Squirrel-cage, что соответствует варианту короткозамкнутого ротора. Номинальная мощность составляет 7460 ВА, линейное питающее напряжение задано 460 В, частота питающей сети – 60 Гц. Активное сопротивление статорной обмотки – 0.6837 Ом, её индуктивность – 0.004162 Гн. Для ротора соответствующие величины составляют 0.451 Ом и 0.004152 Гн. Взаимная индуктивность между статором и ротором задана величиной 0.1486 Гн. Момент инерции двигателя принят 0.05 кгм<sup>2</sup>, коэффициент вязкого трения – 0.008141 Нмс, число пар полюсов  $p=2$ . Асинхронный двигатель зашунтирован резистивной звездой с большими значениями сопротивлений резисторов ( $10^5$  Ом) для того, чтобы произвести развязывание некорректных топологических ситуаций. Они обусловлены наличием индуктивных сечений, образуемых катушками индуктивностей линий электропередачи, силового активного фильтра и статорными индуктивностями асинхронного двигателя. Подмодель подачи внешнего механического момента позволяет производить его наброс на 20 Нм в момент 0.7 с при помощи единичной ступеньки и блока умножения, а также подсоединять начальный момент 10 Нм при пуске двигателя.

Для получения информации о мощностях на двигателе и источнике питания применяются виртуальные измерители мощности, на вход каждого из которых подаются соответствующие напряжения и токи. Измерения мощности на асинхронном двигателе осуществляется по схеме двух пар приборов (линейные вольтметры и фазные амперметры), а аналогичные измерения на стороне источников электрической энергии производятся по схеме трех пар приборов ( фазные напряжения и фазные токи). На регистрирующие приборы выводятся суммарные активные мощности для сопоставления потребляемой и отдаваемой энергии. Блок измерения электрических и механических величин асинхронного двигателя выводит на виртуальные осциллографы токи статора по фазам А, В и С, а также угловую скорость и развиваемый двигателем электромагнитный момент.

©В.Г.Ягуп, Е.В.Ягуп, 2015



Полупроводниковая силовая схема активного фильтра собрана по схеме трехфазного инвертора (рис.3).

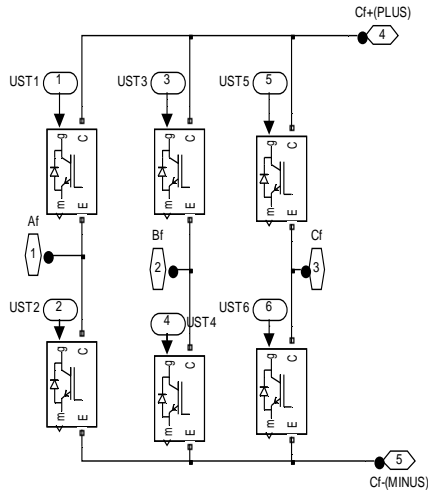


Рис.3. Силовая схема активного фильтра

В качестве силовых полупроводниковых приборов использованы IGBT-транзисторы, шунтированные обратными диодами. Параметры эквивалентных полупроводниковых пар в состояниях прямой и обратной проводимости, соответственно равны  $10^{-3}$  и  $10^{+5}$  Ом. Снабберные цепи исключены из моделей. Управляющие сигналы на каждый IGBT-транзистор формируются в системе управления отдельным каналом и подаются на управляющие зажимы транзисторов через входные клеммы подмодели силовой схемы активного фильтра.

С диагоналей фильтра снимаются силовые сигналы, которые через буферные индуктивности фильтра подаются в силовую схему питания двигателя. К общей диагонали подсоединен накопительный конденсатор емкостью 50 мкФ.

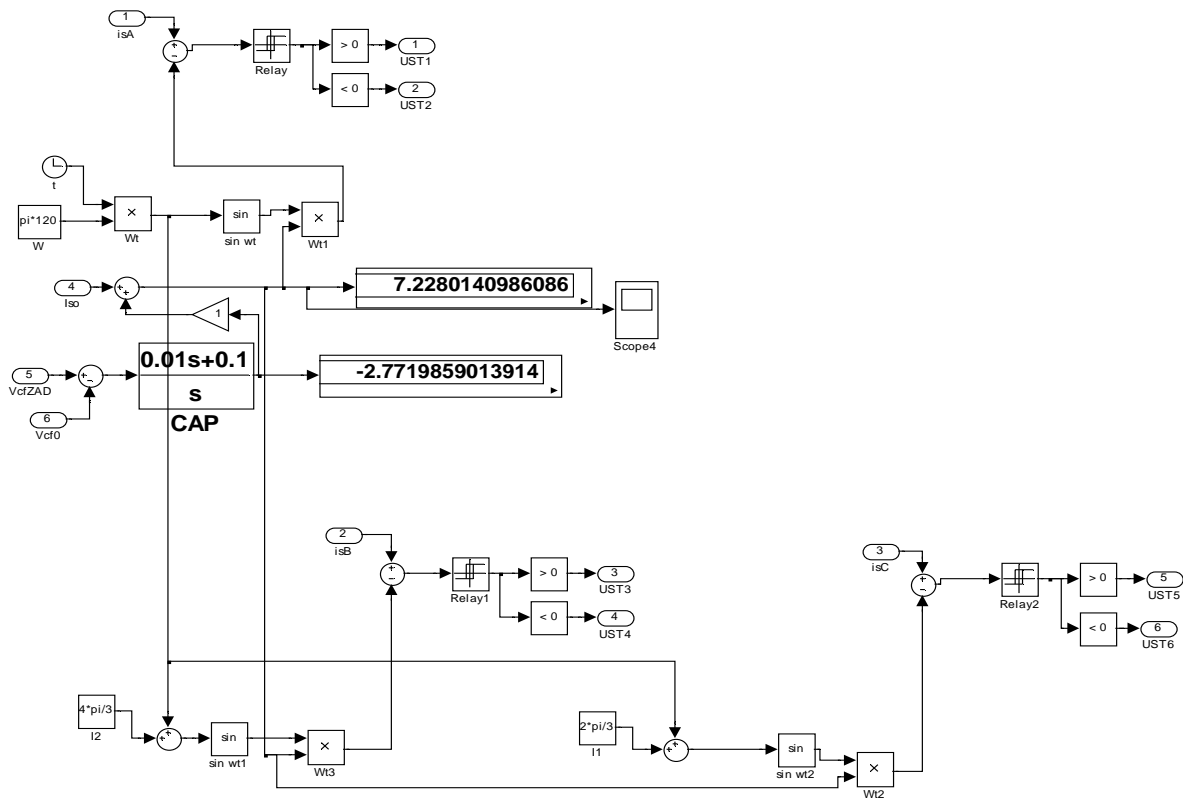


Рис.4 Модель системы управления силовым активным фильтром

Модель системы управления силовым активным фильтром (рис.4) содержит три канала управления – по одному на каждое плечо инвертора. Широтно-импульсная модуляция обеспечивается релейными элементами с достаточно малой величиной гистерезисной зоны (0,25 А). Для каждого канала отслеживается токи фаз источников электрической энергии, которые сравниваются с задающими токами, причем каждый из задающих токов совпадает по фазе с напряжением соответствующего источника напряжения, отображающего источник питания в этой фазе. Поскольку амплитуды всех фазных токов должны быть равными, задачей оптимизации является определение оптимального значения этой амплитуды. Ранее используемый в [4] алгоритм построения процесса оптимизации с нахождением значения целевой функции путем прогона модели системы электроснабжения в данном случае нерационален, хотя и принципиально возможен. Для достижения установленного режима в данной системе требуется расчет большого количества периодов питающего напряжения. С одной стороны,

модели нужно пройти интервал времени, необходимый для установления механического режима. Это связано с инерционными механизмами, и время затухания механических процессов на один-два порядка превышает время установления электромагнитных процессов. С другой стороны, наличие полупроводниковых приборов, управляемых релейно-гистерезисной системой управления, принуждает модель двигаться в процессе моделирования достаточно медленно из-за необходимости обрабатывать переключения полупроводниковых приборов в пределах узкой зоны гистерезиса. С учетом этих обстоятельств в систему управления добавлены элементы автоматического управления, которые, в сущности, и берут на себя функцию оптимизации режима. Ключевым свойством является то обстоятельство, что при минимизации разностей активных мощностей, потребляемых системой, и отдаваемых источниками, напряжение на накопительном конденсаторе стабилизируется на постоянном уровне. При отклонении от оптимального режима напряжения конденсатора будет либо нарастать (накачка конденсатора при завышенной мощности, отбираемой от источников), либо убывать (истощение заряда конденсатора при недостатке мощности, отбираемой от источников). В данной системе управление напряжением задания (750 В) сравнивается с постоянной составляющей напряжения на конденсаторе, определяемо в процессе движения модели с помощью виртуального прибора разложения в ряд Фурье напряжения на конденсаторе. Разность подается на пропорционально-интегральный регулятор, и получаемый сигнал управления добавляется к амплитудам всех задающих токов силового фильтра.

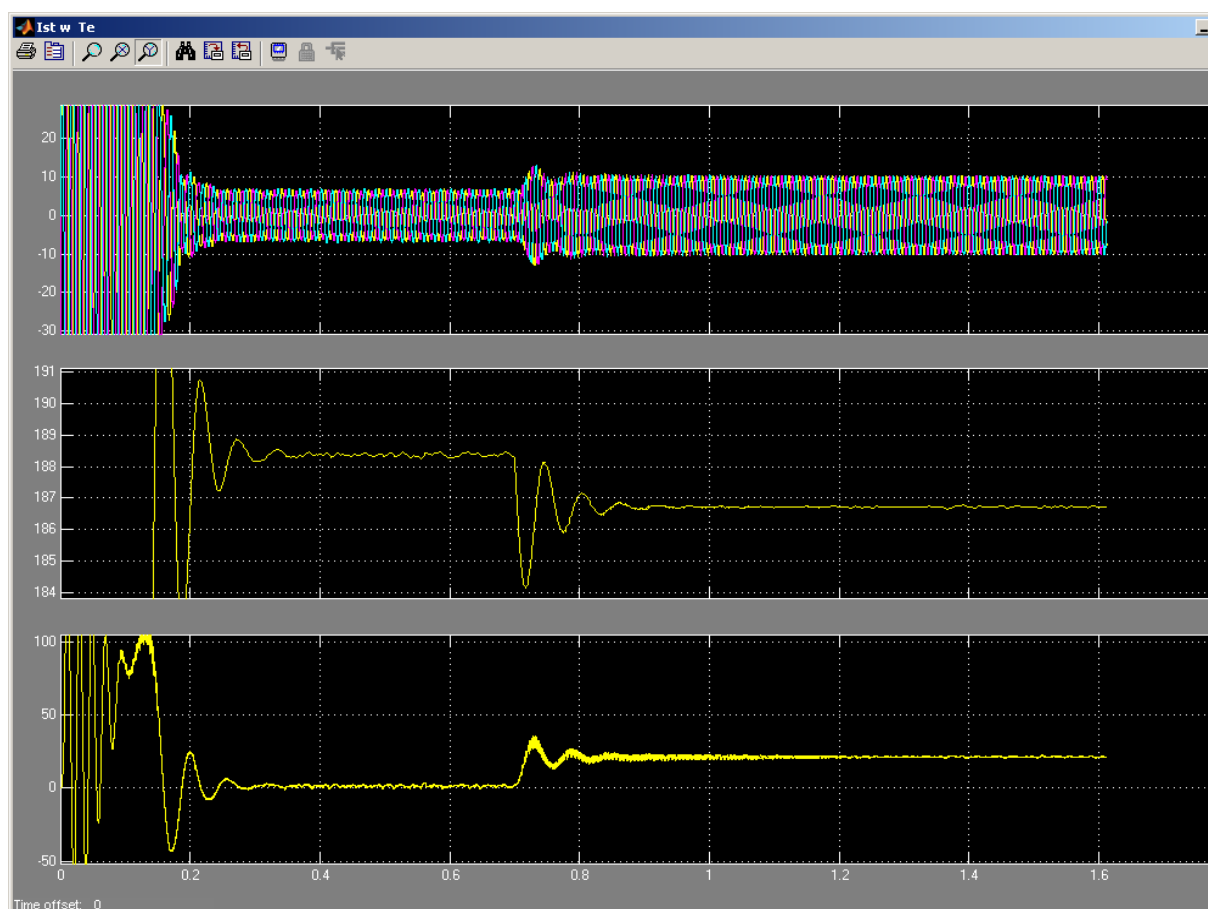


Рис. 5. Временные диаграммы токов статора, скорости вращения и электромагнитного момента асинхронного двигателя

Результаты моделирования системы с фильтром подтверждают ее работоспособность. На рис.5 приведены диаграммы выходных величин модели асинхронного двигателя. До момента времени 0,2 с протекает характерный процесс прямого пуска асинхронного двигателя на холостом ходе. При установлении холостого хода развиваемый электромагнитный момент преодолевает момент вязкого трения (около 1,5 Нм). При набросе момента в запрограммированный момент времени 0,7 с переходный процесс приводит к увеличению электромагнитного момента двигателя до 21,5 Нм. При этом скорость вращения несколько снижается, а фазные токи увеличиваются. При этом двигатель работает с недогрузом и потребляет существенную реактивную мощность, соизмеримую с активной мощностью, идущей на выполнение полезной работы. Амплитуды токов в статорных обмотках

двигателя несколько превышает 10 А. В то же время благодаря компенсирующему действию активного фильтра, амплитуды фазных токов в источниках и линиях электропередачи составляют величину 7,23 А (это видно и из временных диаграмм, и из показаний приборов в системе управления), что существенно меньше в сравнении с токами в статорных обмотках асинхронного двигателя. Ток уставки принимался равным 10 А по амплитуде, во всех случаях постоянная составляющая напряжения на накопительном конденсаторе в установившемся режиме при любой механической нагрузке весьма близка к напряжению задания 750 В. Это свидетельствует о правильной работе оптимизирующего узла системы управления силовым активным фильтром.

**Список литературы:** 1. Шидловский А.К. Анализ и синтез фазообразовательных цепей / А.К.Шидловский, И.В.Мостовяк, В.Г. Кузнецов - Киев: Наукова думка, 1979. – 299 с. 2. Шидловский А.К. Уравновешивание режима многофазных цепей / А.К.Шидловский, И.В. Мостовяк, Г.А. Москаленко - Киев: Наукова думка, 1990. - 272 с. 3. Ягуп В.Г. Расчет режима компенсации реактивной мощности в несимметричной системе электроснабжения методом поисковой оптимизации / В.Г. Ягуп, Е.В. Ягуп // Наукові праці Донецького національного технічного університету. -Серія «Електротехніка і енергетика», вип. 11 (186). – Донецьк, 2011. – С. 449-454. 4. Ягуп В.Г. Синтез электрической системы во временной области методом поисковой оптимизации / В.Г. Ягуп, Е.В. Ягуп // Технічна електродинаміка. – 2015. - №2. – С. 24-29. 5. Ягуп В.Г. Моделирование процессов компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения асинхронного двигателя / В.Г. Ягуп, Е.В. Ягуп // Вісник нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу – 2013. – №36(1009). – С. 378-379. 6. Ягуп В.Г. Оптимізація режиму живлення асинхронного двигуна в умовах несиметрії системи електропостачання / В.Г. Ягуп, Е.В. Ягуп // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – №1(112). – С. 74-77. 7. Akagi H Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning / Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. – IEEE Press. – 2007. – 379 p. 8. Strzelecki R Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks / Strzelecki R., Benysek G. – Springer-Verlag London Limited. – 2008. – 414 p. 9. Benysek G. Power Theories for Improved Power quality / Benysek G., Pasko M. – Springer-Verlag London. – 2012. – 213 p.

**Bibliography (transliterated):** 1. Shydlovskiy A.K., Mostoviyak I.V., Kuznetsov V.G. *Analiz i sintez fazopreobrazovatel'nyh cepej*. - Kiev: Naukova Dumka, 1979. - 299 p. (Rus). 2. Shydlovskiy A.K., Mostoviyak I.V., Moskalenko G.A. *Upravnoveshivanie rezhima mnogofaznyh cepej* - Kiev: Naukova Dumka, 1990. - 272 p. (Rus). 3. Yagup V.G., Yagup E.V. "Raschet rezhima kompensacii reaktivnoj moshnosti v nesimmetritshnoj sisteme jelektrsnabzhenija metodom poiskovoj optimizacii" // *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehnicnogo universitetu - Serija "Elektrotehnika i Jenergetika"*. - Vol. 11 (186). - Donetsk, 2011. - Pp. 449-454. (Rus). 4. Yagup V.G., Yagup E.V. "Sintez jelektricheskoy sistemy metodom poiskovoj optimizacii" // *Tehnichna Jeledrodynamika*. – 2015. - №2. – Pp.24-29. (Rus). 5. Yagup V.G., Yagup E.V. "Modelirovanie processov kompensacii reaktivnoj moshnosti v sisteme jelektrsnabzhenija asinhronnogo dvigatelja". *Visnyk nacional'nogo tehnicnogo universitetu "Harkivs'kyj politehnicnij instytut"*. Serija: *Problemy avtomatyzovanogo jelectropryvodu*. – 2013, №36 (109). Pp.378-379.. 6. Yagup V.G., Yagup E.V. "Optimizacija rezhymu zhyvlennja asynhronnogo dvyguna v umovah nesymetrii systemy jelektropostachannja" // *Visnyk Vinnyc'kogo politehnicnogo instytutu*. – 2014, №1 (112). – Pp. 74-77. 7. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. –IEEE Press. – 2007. 379 p. 8. Strzelecki R., Benysek G. *Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks*. – Springer - Verlag London Limited. – 2008. – 414 p. 9. Benysek G., Pasko M. *Power Theories for Improved Power quality*. – Springer-Verlag London. – 2012. – 213 p.

Поступила(received) 27.08.2015