

УДК 621.314.333, 621.314.6

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА
ПОСТОЯННОГО ТОКА С АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ**

П.А. Борисов, А.К. Седнев

Рассмотрена структура энергетической подсистемы с сетевым понижающим трансформатором и активным выпрямителем, обеспечивающая двухсторонний обмен энергией между питающей сетью и электрической машиной, для низковольтных электроприводов постоянного тока. В пакете MATLAB/Simulink с применением приложения SimPowerSystems разработана модель замкнутой системы электропривода постоянного тока с активным выпрямителем на базе низковольтной машины ПБВ-100М, проведено моделирование и проанализированы его результаты.

Ключевые слова: активный выпрямитель, замкнутая система подчиненного регулирования, широтно-импульсный преобразователь, электропривод постоянного тока, энергия рекуперации.

Введение

В настоящее время основные усилия по энергосбережению сконцентрированы в сфере потребления электроэнергии. Учитывая, что более 60% всей вырабатываемой электроэнергии потребляют электроприводы, высокую актуальность приобретают задачи энергосбережения при проектировании, эксплуатации, а также модернизации современных систем электропривода.

Широкое применение в промышленном и научном приборостроении и других отраслях получили замкнутые системы электропривода постоянного тока (ЗС ЭППТ) малой и средней мощности, построенные по двухзвенной структуре [1]: выпрямитель – промежуточное звено постоянного тока (ЗПТ) – транзисторный широтно-импульсный преобразователь (ШИП). С точки зрения улучшения электромагнитной совместимости и экономичности использования электроэнергии целесообразно использовать активные выпрямители на управляемых ключах, что при обратимости самого ШИП позволит рекуперировать в первичный источник энергию вращающихся частей машины и тем самым повысить к.п.д. всей системы в целом [1].

Энергетические подсистемы (ЭП), построенные на базе активных выпрямителей напряжения (АВН), при питании непосредственно от сети (бестрансформаторные схемы) могут использоваться только в высоковольтных установках, так как напряжение в ЗПТ у таких схем в рабочем режиме существенно превышает амплитуду напряжения сети. В статье рассматривается структура ЭП с сетевым понижающим трансформатором и АВН, обеспечивающая двухсторонний обмен энергией между питающей сетью и электрической машиной, применимая для низковольтных электроприводов постоянного тока. Разработана модель ЗС ЭППТ с АВН на базе низковольтной машины ПБВ-100М, проведено моделирование в пакете MATLAB/Simulink с применением приложения SimPowerSystems, проанализированы его результаты.

Структура электропривода постоянного тока с активным выпрямителем

Современные системы автоматизированного электропривода проектируются на базе двух подсистем – энергетической и информационной. Энергетическая подсистема включает в себя силовые цепи первичного источника питания, полупроводникового и электромеханического преобразователей (электрической машины) и осуществляет

двухсторонний обмен энергией между первичным источником питания и электрической машиной посредством коммутации силовых ключей. Полупроводниковый преобразователь является неотъемлемой частью современных систем автоматизированного электропривода и обеспечивает их электрической энергией требуемого вида и качества. Информационная подсистема включает в себя систему управления полупроводниковым преобразователем с информационно-измерительной частью и осуществляет реализацию заданного алгоритма регулирования координат электропривода. Предельные динамические возможности электропривода определяются параметрами энергетической подсистемы, так как информационная подсистема не может обеспечить требуемые моменты, скорости и ускорения двигателя, если они не заложены в ЭП [1].

Наиболее массовое практическое применение в регулируемых электроприводах получили двухзвенные преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока. В современных системах электропривода постоянного тока энергетическая подсистема, если нет необходимости в автономном источнике питания, включает в себя силовые цепи сети переменного тока, выпрямитель, диодный или на управляемых ключах, т.е. с инвертором рекуперации (ИР), силовой фильтр (СФ), тормозную цепь (ТЦ), силовой каскад транзисторного ШИП, двигатель постоянного тока (ДПТ).

В настоящее время основой построения унифицированных систем автоматизированного электропривода в отечественной и зарубежной практике служит структура подчиненного регулирования [1], содержащая ряд замкнутых контуров, последовательно охватывающих друг друга. Структура подчиненного регулирования, кроме удобства построения унифицированных систем на ее основе, привлекает своей простотой и однозначностью соотношений для расчета параметров регуляторов из условия обеспечения заданных динамических качеств. Поэтому будем рассматривать только системы электропривода, построенные по структуре подчиненного регулирования, в которой электрическая цепь машины является объектом для подчиненного контура регулирования тока, а механическая часть – объектом для контура регулирования скорости вращения.

При торможении электропривода кинетическая энергия, которой обладают вращающиеся массы привода в начальный момент торможения, превращается в электрическую энергию и возвращается в звено постоянного тока. Избыточную энергию необходимо аккумулировать или преобразовывать в другую форму. Принципиально существует три возможности:

- аккумуляция (запас) энергии в конденсаторе силового фильтра;
- использование ТЦ, состоящей из прерывателя и тормозного сопротивления (преобразование энергии в тепло);
- рекуперация (возврат) энергии в сеть посредством ИР (использование электрической энергии другим пользователем).

Методика структурно-параметрического анализа и синтеза ЗС ЭППТ при двухстороннем энергообмене между источником и электрической машиной изложена в [2, 3] и позволяет выбрать наиболее эффективный способ использования энергии рекуперации и правильно определить структуру ЗПТ ЗС ЭППТ, а также выбрать состав оборудования ЭП (СФ, ТЦ и АВН), определить электромагнитные нагрузки на их элементы в зависимости от величины рекуперированной энергии вращающихся частей электропривода, уровня токоограничения и циклограмм работы ЗС электропривода.

С точки зрения улучшения электромагнитной совместимости и экономичности использования электроэнергии целесообразно использовать активные выпрямители на управляемых ключах, что при обратимости самого ШИП позволит рекуперировать в первичный источник энергию вращающихся частей машины и тем самым повысить к.п.д. всей системы в целом.

Преобразователи, обеспечивающие двухстороннее энергопотребление, т.е. возможность работы в 4 квадрантах комплексной плоскости на стороне переменного тока, носят в отечественной литературе [4] название активных преобразователей. В англоязычной литературе используется обобщенный термин – преобразователь переменного/постоянного тока, соответствующий терминологии стандарта МЭК 60050-551 (AC/DC Converter). Управляемые силовые модули, на базе которых строится преобразователь, могут иметь разное исполнение, обеспечивая полную управляемость им в режиме потребления нагрузкой энергии и (или) рекуперации энергии в сеть.

Активный выпрямитель напряжения представляет собой автономный инвертор напряжения, выполненный на силовых ключах с обратными диодами, обращенный на сторону переменного тока. В режиме рекуперации энергия возвращается в сеть через инвертор рекуперации. Неуправляемый выпрямитель (НУВ) структурно входит в состав АВН, и выпрямление осуществляется через обратные диоды. Для обмена реактивной мощностью, включающей мощность высших гармоник, между сетью переменного тока и АВН используется конденсатор СФ ЗПТ. В принцип работы АВН заложен импульсный повышающий напряжение регулятор, поэтому он обязательно содержит в своем составе токоограничивающий дроссель, устанавливаемый на стороне переменного тока. По этой причине в АВН могут быстро развиваться аварийные процессы, и построение устройства защиты здесь требует особого внимания [5].

Моделирование ЗС ЭППТ с АВН в пакете MATLAB/Simulink

Структурно-имитационная модель ЗС ЭППТ с трехфазным АВН и транзисторным ШИП, реализованная в пакете MATLAB/Simulink с применением приложения SymPowerSystems, представлена на рис. 1.

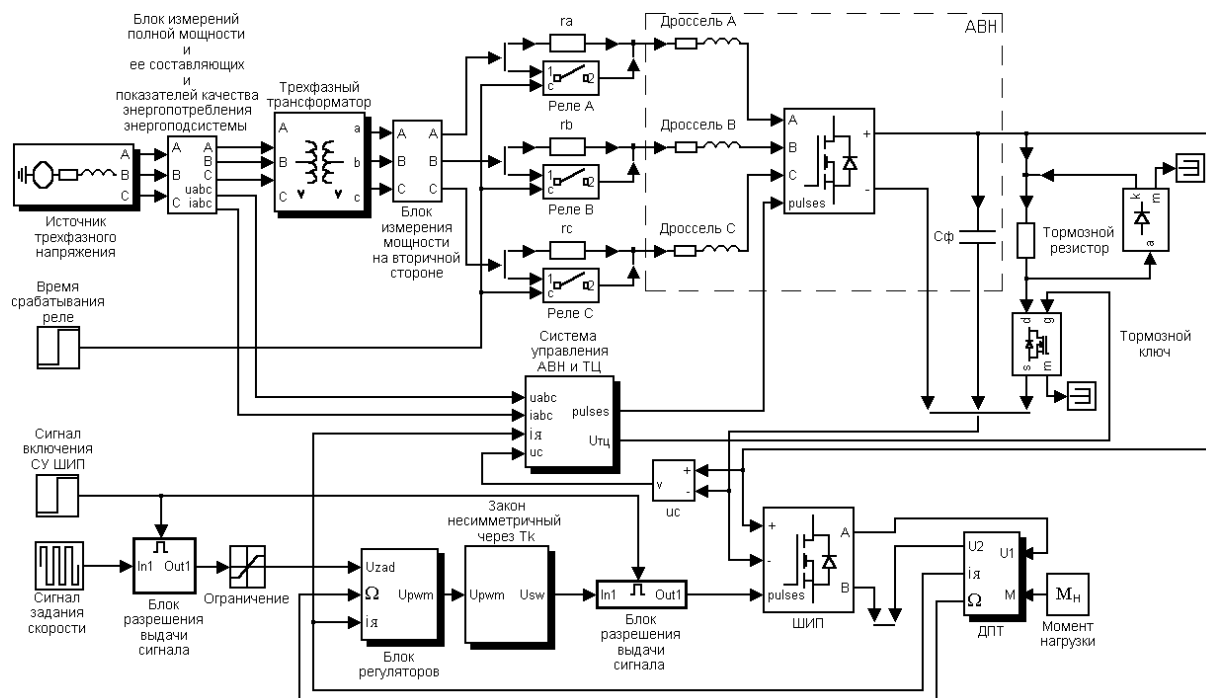


Рис. 1. Модель ЗС ЭППТ с трехфазным АВН и транзисторным ШИП

В нее входят элементы ЭП, часть которых выполнена в виде подсистем:

- источник трехфазного напряжения и трехфазный трансформатор;

- вентильный блок выпрямителя с инвертором рекуперации (т.е. АВН), цепью запуска и токоограничивающими дросселями;
- силовой фильтр ЗПТ с тормозной цепью;
- ШИП на полевых транзисторах (MOSFET), также возможен выбор IGBT;
- схемно-структурная модель ДПТ.

В информационную подсистему входят:

- блок измерений, состоящий из измерительной схемы полной мощности и составляющих ее трехфазных трехпроводных несимметричных ЭП и вычислителя показателей качества энергопотребления ЭП [6, 7];
- система управления и регулирования АВН и тормозной цепью;
- система управления ШИП, состоящая из блока регуляторов двухконтурной системы подчиненного регулирования скорости и формирователя сигналов управления ключами ШИП по несимметричному поочередному «через T_K » закону управления;
- виртуальные датчики измерения сетевых токов и напряжений, напряжения в ЗПТ, тока якоря и скорости.

Расчет регуляторов скоростной системы подчиненного регулирования производится по известным методикам, исходя из настроек на заданный переходный процесс [1]. Система регулирования АВН выполнена подчиненной двухконтурной с внешним контуром регулирования напряжения ЗПТ с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором и внутренним контуром регулирования сетевых токов, выполненным на базе трех релейных регуляторов. По параметрам автоколебаний, возникающих в замкнутой системе, определяются на модели требуемые настройки ПИ-регулятора (метод Циглера–Николса). Помимо регулирования ширины сигналов управления АВН, в модели организована фазоследящая система. Таким образом, независимо от характера реактивности в нагрузке, система автоматически регулирует фазу сетевого тока, обеспечивая высокие коэффициенты мощности и сдвига.

Отметим, что при снятых импульсах управления АВН модель (рис. 1) позволяет проводить анализ ЗС ЭППТ с ЭП на базе НУВ.

При проектировании ЭП необходимо определить максимальные электромагнитные нагрузки на ее элементы [3]. Наиболее тяжелым режимом работы ЗС ЭППТ с ШИП, при котором эти нагрузки максимальны, является режим периодического реверса скорости с выходом в зону ограничения тока якоря на заданном уровне I_0 [3]. Результаты моделирования ЗС ЭППТ с АВН на базе машины ПБВ-100М при работе в режиме периодического реверса скорости с токоограничением приведены на рис. 2 и 3 в виде осциллограмм электромеханических и электромагнитных процессов (в относительных единицах).

Основные технические данные двигателя серии ПБВ-100М: номинальный момент $M_n = 7,16$ Н·м, номинальная частота вращения $n = 1000$ об/мин, частота вращения холостого хода $n_{xx} = 1080$ об/мин, напряжение питания $U_n = 52$ В, номинальный ток $I_n = 18$ А, сопротивление обмотки якоря $r_y = 0,22$ Ом. Уровень ограничения тока якоря $I_0 = 2I_n$. Согласно методикам [2, 3], напряжение $u_{сф}$ на конденсаторе СФ ЗПТ приводится к U_n , ток якоря i_y – к току короткого замыкания $I_{кз} = U_n / r_y$, скорость вращения Ω – к скорости холостого хода. Фазные напряжения и токи на первичной стороне трансформатора отнесены к амплитуде напряжения фазы $U_{1m} = 311$ В и амплитуде номинального тока фазы $I_{1m} = 5$ А первичной стороны трансформатора.

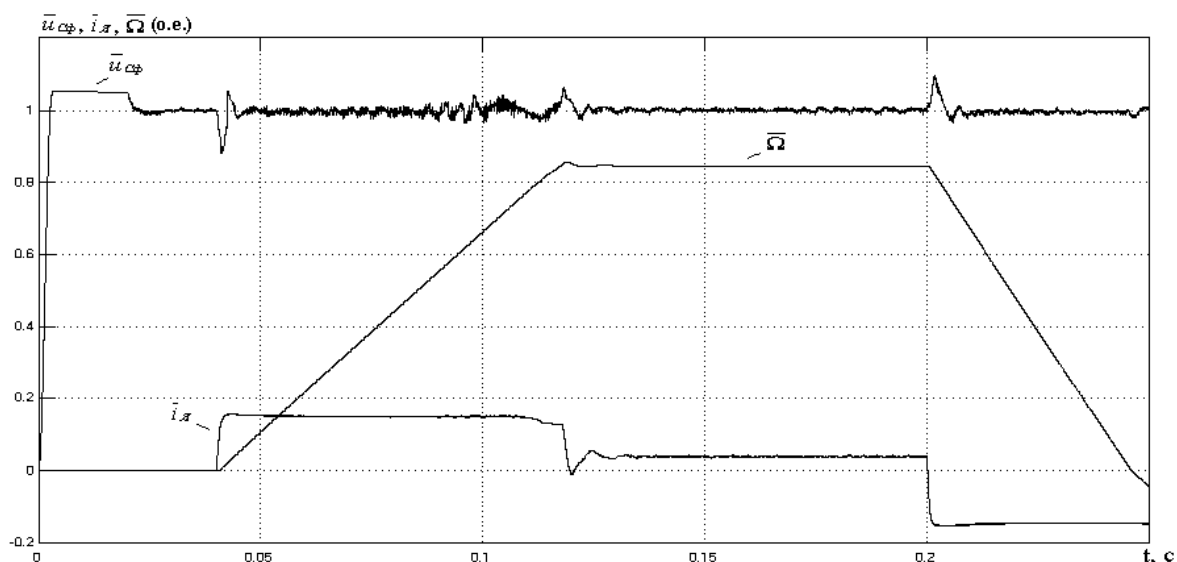


Рис. 2. Осциллограммы (в относительных единицах) напряжения на конденсаторе СФ ЗПТ $\bar{u}_{сф}$, тока якоря $\bar{i}_я$, скорости $\bar{\Omega}$ в ЭП ЗС ЭПТТ на базе АВН

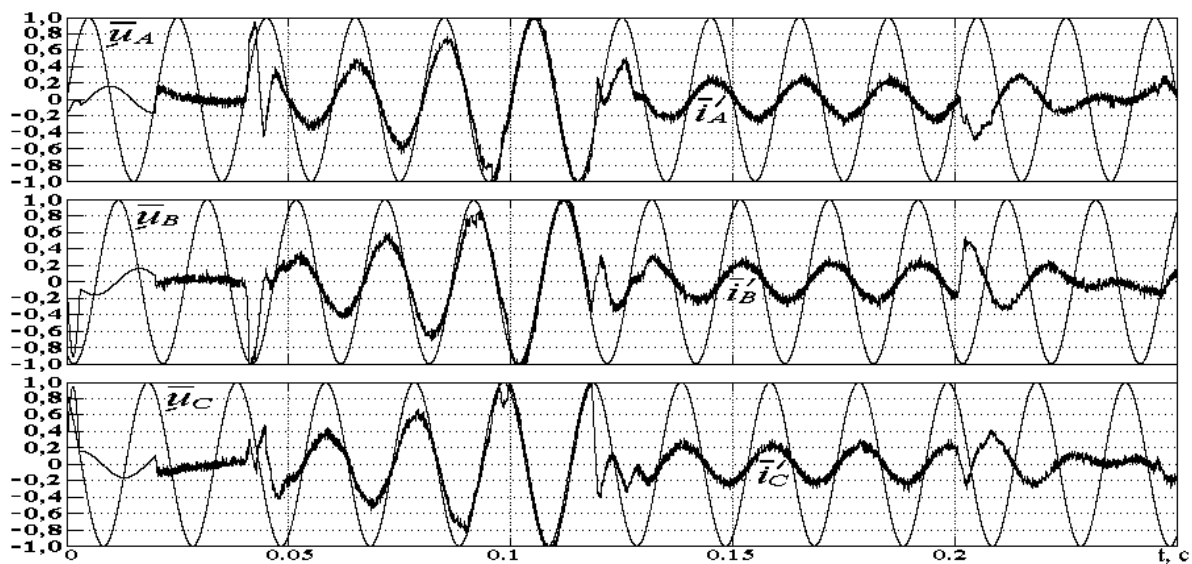


Рис. 3. Осциллограммы (в относительных единицах) фазных напряжений \bar{u}_A , \bar{u}_B , \bar{u}_C и токов \bar{i}_A , \bar{i}_B , \bar{i}_C на первичной стороне трансформатора в ЭП ЗС ЭПТТ на базе АВН

По результатам моделирования ЗС ЭПТТ с ЭП на базе АВН выявлены ее достоинства.

1. В ЭП на базе НУВ величина емкости конденсатора СФ ЗПТ выбирается согласно методике [2] в целях ограничения напряжения на нем в режиме рекуперации, когда ТЦ и АВН не используются. В ЭП с АВН требуемая величина емкости конденсатора СФ ЗПТ снижена относительно ЭП на базе НУВ с 34,5 до 2 мФ, что позволяет при наличии сетевых токоограничивающих дросселей не использовать цепь запуска и улучшить тем самым массогабаритные показатели системы.

2. В начале моделирования импульсы управления АВН сняты (см. рис. 2 и 3), затем АВН вступает в работу и стабилизирует напряжение ЗПТ в режиме холостого хода до U_n (рис. 2). По данным моделирования (рис. 2) видно, что АВН позволяет стабилизировать и регулировать напряжение в ЗПТ как в режиме потребления энергии, в том числе в режиме холостого хода, так и в режиме рекуперации энергии в сеть.

Ожидаемые «колебания» напряжения ЗПТ имеют место в следующих случаях: при «набросе» нагрузки (см. момент старта на рис. 2); при выходе на заданный уровень ограничения сетевого тока (см. окончание интервала разгона на рис. 2 и 3), который определяется мощностью сетевого трансформатора; при реверсе в системе, т.е. в момент начала рекуперации.

3. АВН обеспечивает рекуперацию энергии в сеть, так как на интервале торможения сетевой ток находится в противофазе с напряжением (рис. 3), за счет чего повышается энергетическая эффективность системы электропривода.

4. Показатели качества энергопотребления ЭП с АВН, определенные с помощью соответствующего вычислителя [6, 7], в квазиустановившемся режиме лучше, чем ЭП на базе НУВ. Так, для интервала движения с постоянной скоростью величина коэффициента мощности увеличена с 0,73 до 0,98, величина коэффициента гармоник (коэффициент искажения синусоидальности кривой тока) снижена с 0,52 до 0,16.

Заключение

Рассмотрена структура ЭП с сетевым понижающим трансформатором и АВН, обеспечивающая двухсторонний обмен энергией между питающей сетью и электрической машиной, применимая для низковольтных электроприводов постоянного тока. Разработана модель ЗС ЭППТ с АВН на базе низковольтной машины ПБВ-100М, проведено моделирование в пакете MATLAB/Simulink с применением приложения SimPowerSystems, проанализированы его результаты. Установлено, что применение АВН в ЭП ЗС ЭППТ с ШИП позволяет:

- снизить емкость конденсатора СФ ЗПТ и его установленную мощность;
- стабилизировать напряжение в ЗПТ и регулировать его с заданной динамикой;
- обеспечить рекуперацию энергии в сеть и тем самым повысить энергетическую эффективность системы электропривода;
- улучшить показатели качества энергопотребления ЭП.

Литература

1. Козярук А.Е., Томасов В.С. История и перспективы развития полупроводниковой преобразовательной техники и систем электропривода на ее основе // Известия вузов. – Приборостроение. – 1998. – Т. 41. – № 1–2. – С. 85–93.
2. Борисов П.А., Томасов В.С. Методика выбора наиболее эффективного способа использования энергии рекуперации в системах электропривода на базе ШИП – ДПТ в зависимости от режима работы // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2004. – Выпуск 15. – С. 335–339.
3. Борисов П.А. Определение электромагнитных нагрузок на элементы энергоподсистемы автоматизированных электроприводов постоянного тока с ШИП // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития». – Магнитогорск, 2004. – Ч. I. – С. 332–334.
4. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Р.Т. Шрейнера. – Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. – 250 с., ил.
5. Борисов П.А., Томасов В.С. Моделирование и анализ электромагнитных процессов в силовых цепях активных выпрямителей напряжения // Труды V Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение». МКЭЭЭ–2003. – Часть I. – Алушта, 2003. – С. 727–730.

6. Борисов П.А., Томасов В.С. Определение составляющих полной мощности энергоподсистем электротехнических комплексов // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2004. – № 1. – С. 40–44.
7. Борисов П.А. Применение MATLAB/Simulink для измерения и оценки качества электроэнергии в трехфазных симметричных системах с активными преобразователями // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB. Труды II-й Всероссийской научной конференции. – М., 2004. – С. 1372– 1387.

Борисов Павел Александрович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, borisov@ets.ifmo.ru

Седнев Алексей Константинович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, sednev-aleksey@yandex.ru