

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 ЭПТ с АВН в пакете MATLAB/Simulink

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

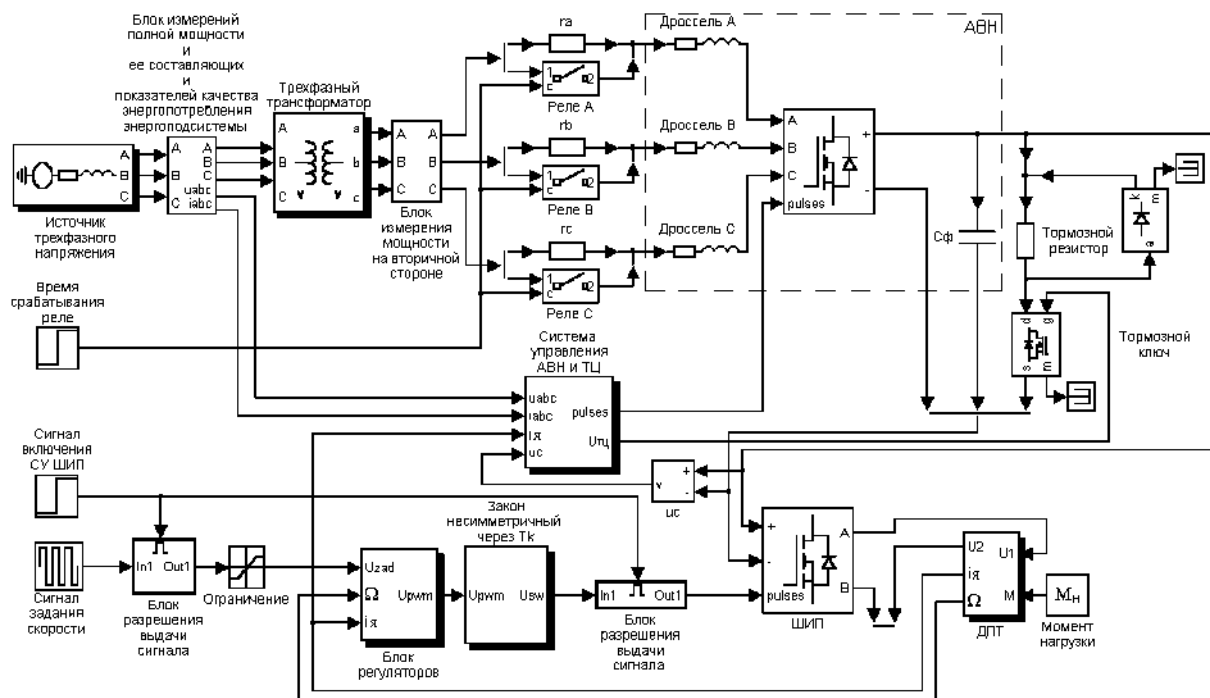


Рис. 1. Модель ЗС ЭПТ с трехфазным АВН и транзисторным ШИП

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  $\Omega$  – 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.

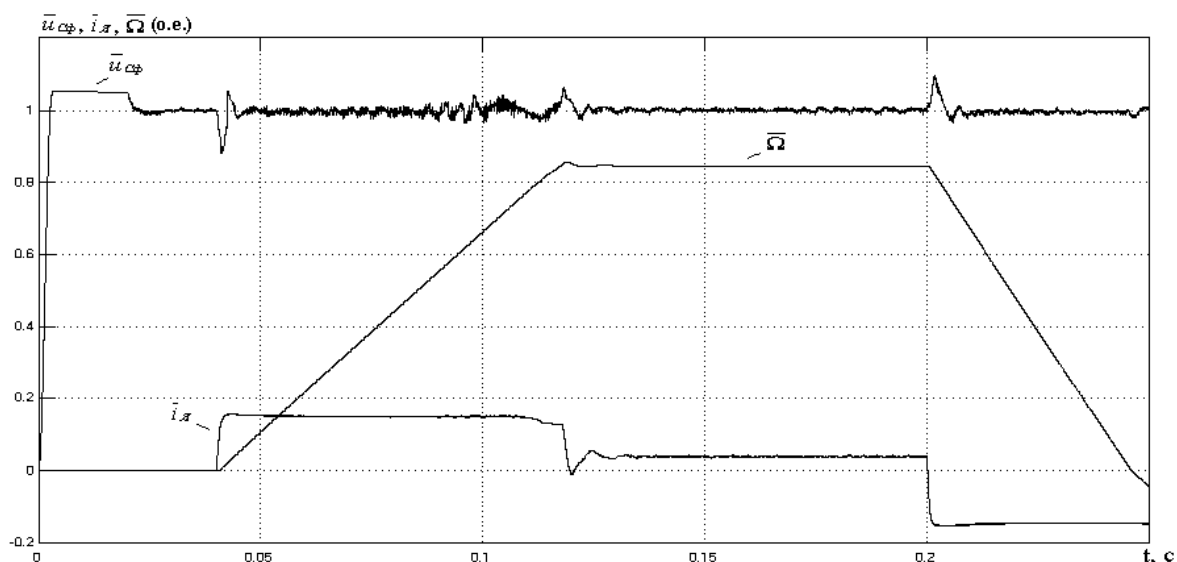


Рис. 2. Осциллограммы (в относительных единицах) напряжения на конденсаторе СФ ЗПТ  $\bar{u}_{сф}$ , тока якоря  $\bar{i}_я$ , скорости  $\bar{\Omega}$  в ЭП ЗС ЭПТТ на базе АВН

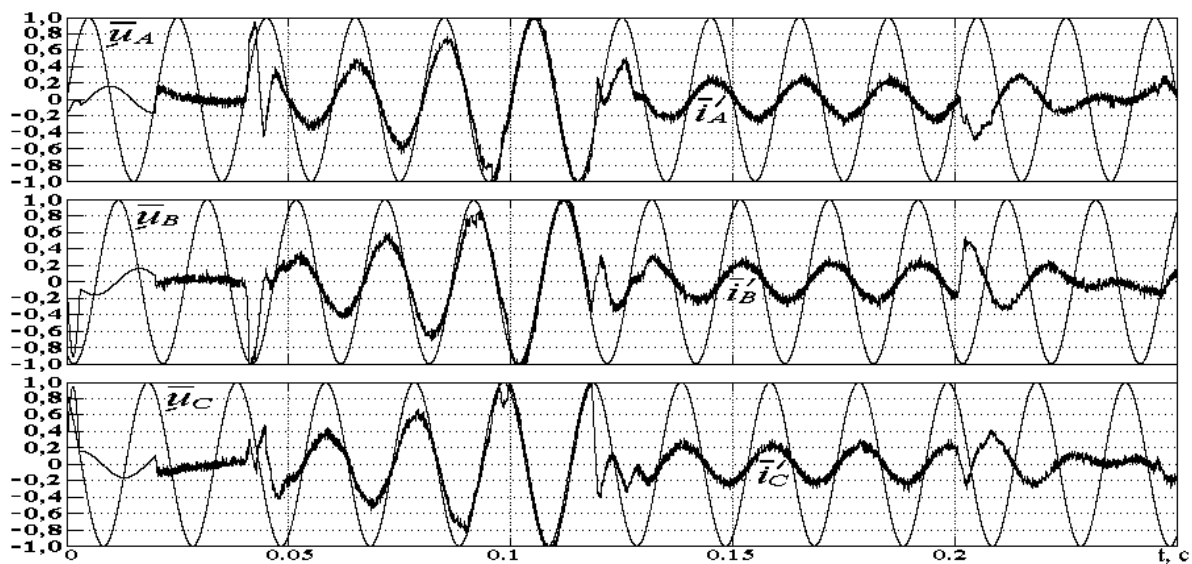


Рис. 3. Осциллограммы (в относительных единицах) фазных напряжений  $\bar{u}_A$ ,  $\bar{u}_B$ ,  $\bar{u}_C$  и токов  $\bar{i}_A$ ,  $\bar{i}_B$ ,  $\bar{i}_C$  на первичной стороне трансформатора в ЭП ЗС ЭПТТ на базе АВН

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

УДК 681.532.8

## **ДИНАМИКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОДДЕРЖАНИЯ КУРСА КОРАБЛЯ НА ОСНОВЕ РУЛЕВОГО ПРИВОДА С ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ**

**И.Е. Овчинников, Н.Г. Ватунская**

Рассматривается нелинейная задача динамики управления курсом корабля с вентильным двигателем в приводе рулевой машины. Синтезируется закон управления, выбираются коэффициенты усиления и передаточное отношение редуктора.

**Ключевые слова:** вентильный двигатель, привод рулевой машины, закон управления, коэффициенты усиления, передаточное отношение редуктора.

### **Введение**

Применение вентильных двигателей в приводах рулевых механизмов судов разных типов представляется перспективным с точки зрения известных преимуществ этого класса электрических машин, таких как отсутствие необходимости обслуживания, высокий длительный момент на единицу массы двигателя, высокий к.п.д. Все эти факторы достаточно важны для автономных транспортных объектов, какими и являются морские и речные суда.

Вентильные двигатели, несмотря на общность свойств и характеристик с двигателями постоянного тока, обладают специфическими отличиями, связанными с нелинейностью механических характеристик [1]. В этой связи поставлена задача изучения некоторых динамических процессов, возникающих в замкнутой системе управления курсом корабля с помощью рулевой машины, приводимой в движение вентильным двигателем.

### **Вывод динамики управления курсом корабля**

На рис. 1 показан контур корабля  $C$  в плане, причем продольная ось  $X$  и связанной с ней вектор скорости корабля  $\vec{V}$  отклонены от заданного направления на угол  $\Delta\Psi$ . Начальное значение отклонения равно  $\Psi_0$  и соответствует положению продольной оси  $OX_0$ . Текущее изменение угла  $\Psi$  и ошибка отработки угла связаны зависимостью  $\Delta\Psi = \Psi_0 - \Psi$ . Изменение курсового угла  $\Psi$  и отработка рассогласования  $\Delta\Psi$