

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-149-160
УДК 62-83:629.5

В.И. Вершинин, С. В. Махонин, В.А. Паршиков, В.А. Хомяк
Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБА ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ В ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ СУДОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

Объект и цель научной работы. Объект работы – автоматизированный частотно-регулируемый электропривод судового механизма (подруливающего устройства), входящего в состав систем электродвижения перспективных судов различного назначения. Цель работы – разработка функциональной схемы частотно-регулируемого электропривода судового механизма (на примере подруливающего устройства), в котором вместо способа генераторного торможения, традиционно применяемого в настоящее время, используется способ динамического торможения, позволяющий заметно улучшить массогабаритные показатели электропривода в целом.

Материалы и методы. Научно-техническая информация, а также личные наработки и многолетний опыт, накопленные авторами в ходе проведения НИР и ОКР по разработке электроприводов судовых механизмов различного назначения. Решение поставленной перед авторами задачи базируется на способе построения частотно-регулируемого электропривода, в котором используемый статический преобразователь способен функционировать в режиме преобразования системы трехфазного напряжения с неизменными параметрами в трехфазную систему напряжения, параметры которого могут плавно регулироваться, и в режиме преобразования системы трехфазного напряжения с неизменными параметрами в систему постоянного напряжения, уровень которого может также плавно регулироваться.

Основные результаты. Разработана функциональная схема частотно-регулируемого электропривода судового механизма (подруливающего устройства), в котором используется способ динамического торможения, а также указывается область (номенклатура) судовых механизмов, в электроприводах которых целесообразно использовать предлагаемую функциональную схему. Полученные результаты подтверждаются моделированием электромеханических процессов, протекающих в конкретном электроприводе судового подруливающего устройства. Диаграммы этих процессов и их анализ представлены в статье.

Заключение. Предлагаемые технические решения могут быть использованы при проведении ОКР по созданию электроприводов механизмов перспективных судов.

Ключевые слова: автоматизированный частотно-регулируемый электропривод, преобразователь частоты, асинхронный двигатель, электромагнитный момент, тормозной резистор, режим генераторного торможения, режим динамического торможения, широтно-импульсная модуляция.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-149-160
UDC 62-83:629.5

V. Vershinin, S. Makhonin, V. Parshikov, V. Khomyak
SET Branch, Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

APPLICATION OF DYNAMIC BRAKING IN FREQUENCY-CONTROLLED DRIVES OF SHIP MACHINERY

Object and purpose of research. This paper studies automated frequency-controlled electric drive of a ship mechanism (thruster) in the electric propulsion system of various advanced ships. The purpose of this work is to develop

Для цитирования: Вершинин В.И., Махонин С.В., Паршиков В.А., Хомяк В.А. Области применения способа динамического торможения в частотно-регулируемых электроприводах судовых механизмов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 386(4): 149–160.

For citations: Vershinin V., Makhonin S., Parshikov V., Khomyak V. Application of dynamic braking in frequency-controlled drives of ship machinery. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 386(4): 149–160 (in Russian).

a flow chart of frequency-controlled electric drive of ship mechanism (a thruster, as an example) that would feature, instead of currently used generator-based braking, the dynamic braking that offers significant gains in weight and size of the whole drive.

Materials and methods. Scientific and technical information, as well as personal findings and experience of the authors, gathered over the years of various R&D projects in electric drives for various ship machinery. The solution to the challenge discussed in this paper is based on the method of developing a frequency-controlled electric drive, where static converter can convert the system of three-phase voltage with constant parameters into the one with smoothly-adjustable parameters, as well as to convert the said system into the system of constant, smoothly-adjustable voltage.

Main results. The authors have developed a flow chart of frequency-controlled electric drive for ship mechanism (thruster) with dynamic braking, as well as enumerated other ship machinery items where electric drives are also practicable to feature this system. Their results are confirmed by simulations of electromechanical processes taking place in given electric drive of ship thruster. The diagrams of these processes, as well as their analysis, are also given in this paper.

Conclusion. These solutions can be implemented in development of electric drives for machinery of advanced ships.

Keywords: automated frequency-controlled electric drive, frequency converter, asynchronous motor, electromagnetic torque, brake resistor, generator-based braking, dynamic braking, pulse-width modulation.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

В настоящее время на действующих и перспективных судах различного назначения широкое применение находят частотно-регулируемые электроприводы судовых механизмов на основе асинхронных двигателей (АД) с короткозамкнутым ротором. Регулирование выходных параметров (частота вращения, напор, производительность) в таких электроприводах осуществляется с помощью статических преобразователей частоты (ПЧ), посредством которых изменяются параметры напряжения (действующее значение, частота), подводимого к обмоткам статора АД. Схема сило-

вой части ПЧ, наиболее часто используемых в частотно-регулируемых электроприводах, приведена на рис. 1. Для реализации тормозных режимов в таких электроприводах традиционно используется режим генераторного торможения [1]. В этом режиме электрическая энергия, вырабатываемая АД, рассеивается в виде тепла на тормозном резисторе R_t , подключаемом к звену постоянного тока ПЧ. Важнейшим преимуществом способа генераторного режима торможения является его органичность, заключающаяся в том, что он возникает автоматически, т.е. для его реализации не требуется применять специальные схмотехнические или алгоритмические решения.

В то же время этому способу присущ и серьезный недостаток: в составе электропривода находятся тормозные резисторы, подключаемые к ПЧ, обладают достаточно большими массогабаритными параметрами и к тому же требуют средств принудительного охлаждения. Указанный недостаток особо актуален при создании электроприводов, к массогабаритным характеристикам которых предъявляются жесткие требования.

В то же время в нерегулируемых электроприводах общепромышленного назначения для реализации тормозных режимов широко используется способ динамического торможения. Для создания режима динамического торможения обмотку статора АД отключают от сети переменного тока и подключают к источнику постоянного напряжения. Протекающий в результате этого по обмотке статора постоянный ток создает в воздушном зазоре АД неподвижное магнитное поле. Вследствие взаимодействия неподвижного магнитного поля,

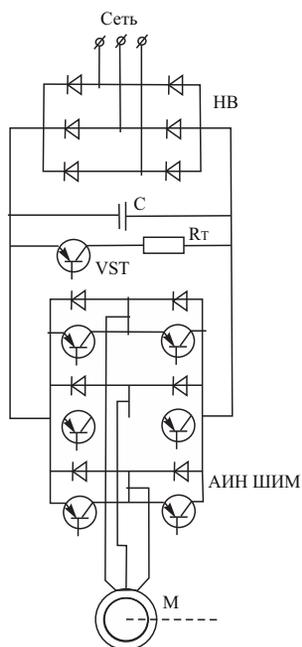


Рис. 1. Схема силовой части преобразователя частоты для частотно-регулируемого электропривода

Fig. 1. Power part layout of frequency converter for frequency-controlled electric drive

создаваемого обмоткой статора, с током, протекающим в проводниках ротора, на последнем будет формироваться отрицательный (тормозной) электромагнитный момент.

Вид механических характеристик АД и характер изменения тока ротора в режиме динамического торможения могут быть достаточно просто определены, если двигатель представить в виде обращенного синхронного генератора с неявнополюсным возбуждением, который работает в режиме короткого замыкания с уменьшающейся частотой вращения [2]. Величина тока короткого замыкания такого генератора I_K определяется выражением

$$I_K = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^{*2} + X_2^{*2}}}, \quad (1)$$

где E_2 – электродвижущая сила фазы ротора, приведенная к статору; R_2^* – активное сопротивление фазы ротора, приведенное к статору; X_2^* – индуктивное сопротивление фазы ротора, приведенное к статору.

Электродвижущая сила ротора и индуктивное сопротивление ротора являются функциями его частоты вращения:

$$E_2 = C\omega, \quad (2)$$

$$X_2^* = 2\pi fL = K\omega,$$

где ω – частота вращения ротора; L – индуктивность фазы ротора; C, K – коэффициенты пропорциональности.

Следовательно, ток короткого замыкания будет определяться выражением, получаемым после подстановки (2) в (1):

$$I_K = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^{*2} + X_2^{*2}}} = \frac{C\omega}{\sqrt{R_2^{*2} + (K\omega)^2}}. \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что величина тока короткого замыкания будет приблизительно неизменной при значительных частотах вращения ротора. Однако при сильном снижении частоты вращения индуктивное сопротивление фазы ротора становится соизмеримым с активным сопротивлением, и последнее начинает влиять на величину тока в сторону его уменьшения. Активная составляющая тока ротора I_{Ka} , которая определяет величину электромагнитного момента, в свою очередь, находится из выражения

$$I_{Ka} = I_K \cos \varphi_2 = I_K \frac{R_2^*}{\sqrt{R_2^{*2} + X_2^{*2}}} = I_K \frac{R_2^{*2}}{\sqrt{R_2^{*2} + (K\omega)^2}}. \quad (4)$$

Характер изменения тока ротора и активной составляющей этого тока в зависимости от частоты вращения ротора показан на рис. 2.

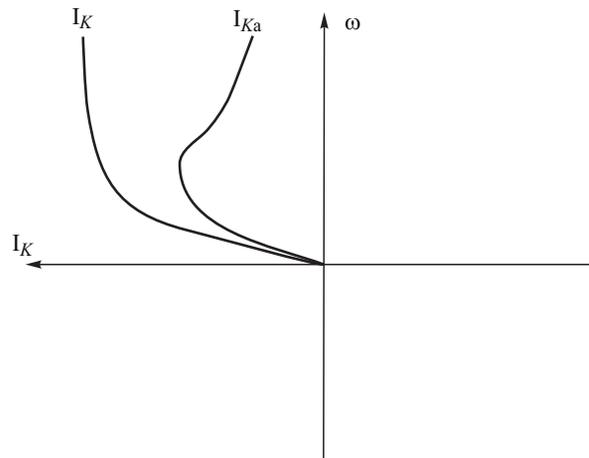


Рис. 2. Характер зависимости тока ротора и его активной составляющей от частоты вращения ротора в режиме динамического торможения

Fig. 2. Rotor current and its active component versus rotor speed. Dynamic braking

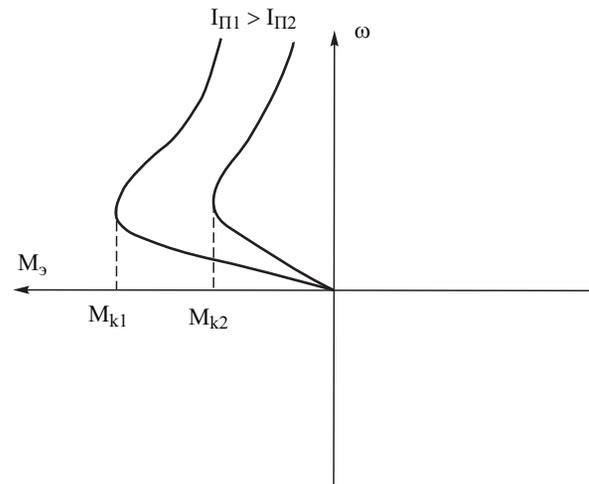


Рис. 3. Механические характеристики асинхронного двигателя, работающего в режиме динамического торможения

Fig. 3. Speed-torque characteristics of asynchronous motor in dynamic-braking conditions

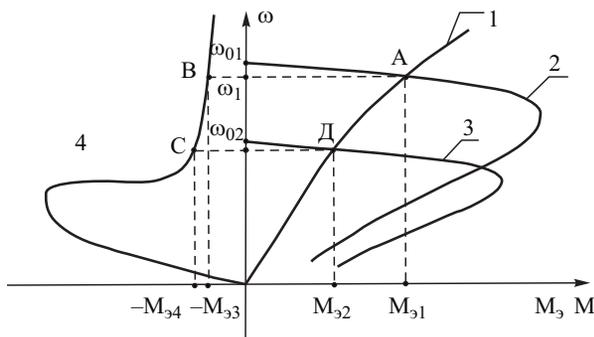


Рис. 4. Механические характеристики асинхронного двигателя, работающего в двигательных режимах и режиме динамического торможения: 1 – механическая характеристика механизма, на который нагружен АД; 2 – механическая характеристика АД, соответствующая частоте переменного напряжения на выходе ПЧ, равной f_1 и величине напряжения U_1 ; 3 – механическая характеристика АД, соответствующая частоте переменного напряжения на выходе ПЧ, равном f_2 и величине напряжения U_2 ; 4 – механическая характеристика АД, работающего в режиме динамического торможения, когда в обмотке статора протекает постоянный ток I_n

Fig. 4. Speed-torque characteristics of asynchronous motor in propulsion mode and dynamic-braking mode: 1 – speed-torque characteristic of the mechanism powered by the asynchronous motor; 2 – speed-torque characteristic of the electric motor corresponding to alternating-voltage frequency f_1 at the output of frequency converter, and voltage U_1 ; 3 – speed-torque characteristic of asynchronous motor corresponding to alternating-voltage frequency f_2 at the output of frequency converter, and voltage U_2 ; 4 – speed-torque characteristic of asynchronous motor in dynamic-braking mode, when stator winding is under direct current I_p

Механические характеристики АД, работающего в режиме динамического торможения, построенные для различных значений постоянного тока (I_n), протекающего в обмотке статора, показаны на рис. 3. Процессы перехода АД из двигательного режима в режим динамического торможения и обратно можно проиллюстрировать с помощью механических характеристик, показанных на рис. 4.

Пусть частота напряжения на выходе статического ПЧ равна f_1 и электропривод функционирует в двигательном режиме, параметры которого характеризуются координатами точки А, лежащей на пересечении механической характеристики двигателя (2), соответствующей частоте напряжения f_1 , и механической характеристики механизма (1). Иными словами, двигатель развивает электромагнитный момент M_{31} при частоте вращения ротора ω_1 . Если в процессе регулирования частоты вращения двига-

теля частота напряжения на выходе ПЧ мгновенно уменьшится и примет значение f_2 , то механическая характеристика двигателя также мгновенно изменится и перейдет из положения 2 в положение 3. В результате частота вращения магнитного поля ω_{02} станет меньше частоты вращения ротора двигателя ω_1 и двигатель должен автоматически перейти в режим генераторного торможения. Но вместо генераторного торможения двигатель можно принудительно ввести в режим динамического торможения. Для этого, как только частота вращения ротора станет больше частоты вращения магнитного поля, необходимо подключить обмотку статора к источнику постоянного напряжения. В этом случае через обмотки статора двигателя начнет протекать постоянный ток и механическая характеристика двигателя займет положение 4. Поскольку частота вращения ротора в силу инерции не сможет измениться мгновенно, то электропривод начнет работать в новом режиме. Параметры этого режима будут характеризоваться точкой В, лежащей на пересечении механической характеристики (4), и прямой, проходящей через ординату и соответствующей частоте вращения ω_1 . Значит, двигатель разовьет тормозной момент $-M_{33}$, а частота вращения ротора будет равна ω_1 . Под действием тормозного момента и статического момента нагрузки частота вращения двигателя начнет уменьшаться, а тормозной момент увеличиваться. Как только частота вращения двигателя уменьшится до значения ω_{02} , которое будет равна частоте вращения магнитного поля, соответствующей частоте напряжения статора f_2 , обмотку статора необходимо снова подключить к ПЧ. В результате этого механическая характеристика двигателя перейдет из положения 4 в положение 3, а двигатель снова перейдет в двигательный режим работы. Параметры нового режима будут характеризоваться точкой Д, лежащей на пересечении механической характеристики 3 двигателя и механической характеристики 1 механизма.

К существенному недостатку способа динамического торможения следует отнести одно обстоятельство. Величина тормозного момента, как это следует из графических изображений механических характеристик на рис. 4, сильно зависит и от частоты вращения ротора двигателя, и от величины постоянного тока, протекающего по обмоткам статора.

Расчеты показывают, что при протекании по обмоткам статора постоянного тока, величина которого равна номинальному действующему значению переменного тока АД, тормозной электромагнитный момент при номинальной частоте вращения составляет примерно 0,1 Мн и только по мере значительного

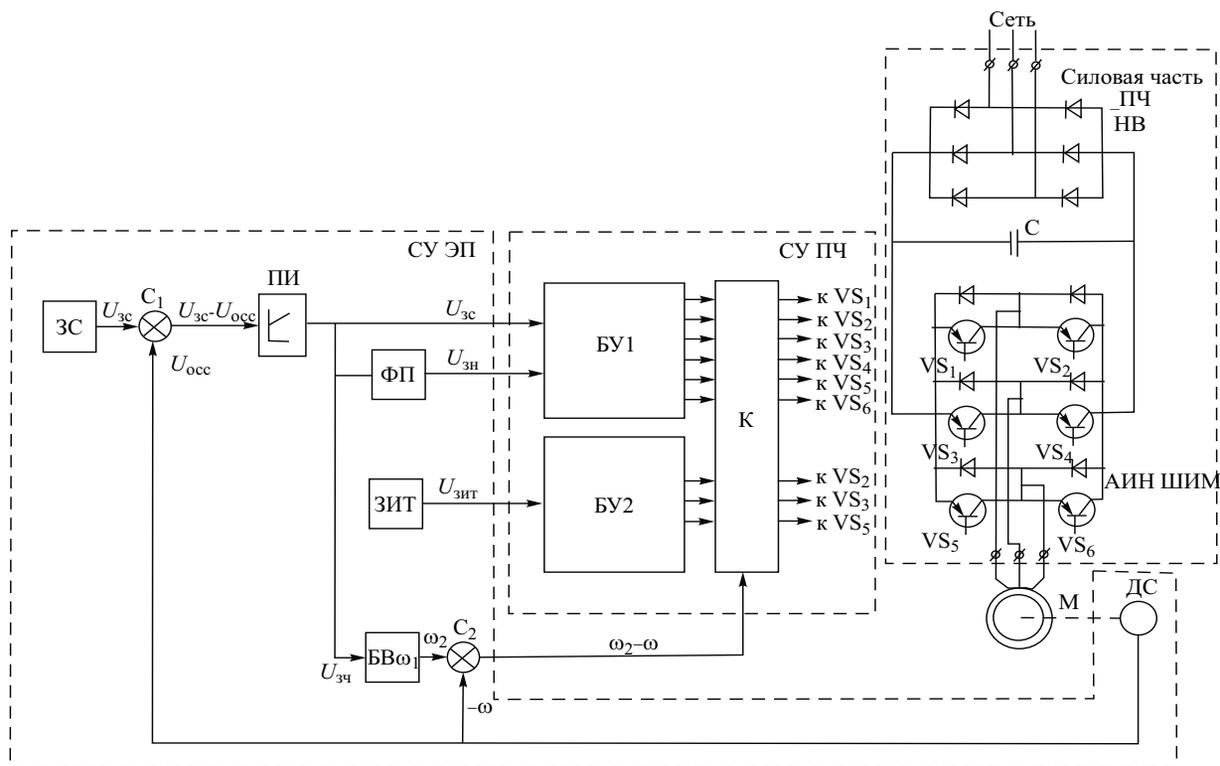


Рис. 5. Функциональная схема частотно-регулируемого электропривода с реализацией способа динамического торможения

Fig. 5. Flow chart of frequency-controlled electric drive with dynamic-braking capability

снижения частоты вращения ротора возрастает до 0,5 Мн. Поэтому для получения тормозных электромагнитных моментов, по величине близких к номинальному значению, необходимо в режиме динамического торможения в обмотке статора двигателя пропускать постоянный ток, величина которого приблизительно в 3 раза превышает номинальное действующее значение переменного тока статора.

Отмеченный недостаток делает нецелесообразным использование способа динамического торможения в частотно-регулируемых гребных электроприводах, поскольку в соответствии с реверсивными механическими характеристиками гребных винтов величины статического момента нагрузки при частотах вращения, близких к нулю, превышают номинальное значение. А это значит, что для остановки гребного винта судна, идущего полным ходом, нужно пропускать по обмоткам статора двигателя постоянный ток, величина которого более чем в 3 раза превышает номинальное действующее значение переменного тока, на которое рассчитан двигатель.

Однако вышеуказанный недостаток не препятствует применению способа динамического тормо-

жения в частотно-регулируемых электроприводах судовых механизмов, у которых величина статического момента нагрузки связана с частотой вращения линейной или квадратичной зависимостью. К числу таких механизмов относятся насосы, вентиляторы, компрессоры, подруливающие устройства (ПУ) и пр.

В настоящей статье приводятся результаты исследования особенностей синтеза частотно-регулируемых электроприводов таких механизмов, в которых реализация режимов электрического торможения производится с использованием не традиционно применяемого способа генераторного торможения, а путем динамического торможения. Функциональная схема электропривода с алгоритмом динамического торможения приведена на рис. 5.

В соответствии с функциональной схемой в состав электропривода входят:

- исполнительный двигатель (М);
- ПЧ, состоящий из силовой части и системы управления статическим преобразователем частоты (СУ ПЧ);
- система управления электроприводом (СУ ЭП).

В качестве исполнительного двигателя в электроприводе используется АД с короткозамкнутым ротором. Силовая часть ПЧ включает в себя неуправляемый выпрямитель (НВ), автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией (АИН ШИМ) и конденсатор в звене постоянного тока C . Система управления статическим преобразователем состоит из трех блоков:

- блок БУ1, формирующий импульсы управления полупроводниковыми ключами VS_1 – VS_6 , которые обеспечивают синусоидальную широтно-импульсную модуляцию трехфазного выходного напряжения ПЧ при работе электропривода в двигательном режиме;
- блок БУ2, формирующий импульсы управления полупроводниковыми ключами VS_2 , VS_3 , VS_5 , которые обеспечивают широтно-импульсную модуляцию постоянного напряжения на выходе ПЧ, прикладываемого к фазам обмотки статора при работе электропривода в режиме динамического торможения;
- коммутатор цепей прохождения импульсов управления К.

Система управления электроприводом включает в себя следующие элементы и блоки:

- блок задания скорости (ЗС);
- датчик скорости ДС;
- пропорционально-интегральный регулятор (ПИ);
- два сумматора – C_1 и C_2 ;
- функциональный преобразователь (ФП);
- задатчик интенсивности торможения (ЗИТ);
- блок вычисления синхронной частоты вращения ($BV\omega_0$).

При работе в двигательном режиме электропривод представляет собой типовую замкнутую систему автоматического регулирования с алгоритмом скалярного управления и обратной связью по частоте вращения. Требуемое значение частоты вращения двигателя устанавливается с помощью ЗС, сигнал с выхода которого поступает на положительный вход сумматора C_1 . На отрицательный вход сумматора C_1 поступает сигнал, пропорциональный фактической частоте вращения двигателя. Разность сигналов, снимаемая с выхода сумматора C_1 , поступает на вход ПИ, который задает необходимую форсировку изменения частоты напряжения и величины напряжения на выходе ПЧ. Функциональный преобразователь ФП выполняет необходимую связь между частотой напряжения и действующим значением напряжения на выходе ПЧ. Эта связь определяется законом скалярного управления, сформулированным академиком М.П. Костенко.

При резком уменьшении сигнала задания частоты вращения $U_{зс}$ сигналы задания частоты напряжения $U_{зч}$ и величины напряжения $U_{зн}$ на выходе ПЧ также уменьшаются, в результате чего АД должен будет перейти в режим генераторного торможения. Но в рассматриваемом электроприводе используется режим не генераторного, а динамического торможения.

Перевод АД в режим динамического торможения производится следующим образом. Сигнал задания частоты напряжения $U_{зч}$ поступает в блок вычисления синхронной частоты вращения двигателя. Этот блок выполняет вычисления в соответствии с выражением

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_3}{P_{\Pi}}, \quad (5)$$

где f_3 – величина заданного значения частоты напряжения на выходе ПЧ; P_{Π} – число пар полюсов двигателя.

Сигнал, пропорциональный вычисленному значению синхронной частоты вращения ω_0 , поступает на положительный вход сумматора C_2 . На отрицательный вход сумматора C_2 поступает сигнал, пропорциональный фактическому значению частоты вращения двигателя. Разность между этими сигналами поступает на вход коммутатора цепей сигналов управления К. Как только эта разность становится отрицательной, коммутатор К срабатывает, отключая цепи управления полупроводниковых ключей VS_1 – VS_6 от блока управления БУ1 и подключая цепи управления полупроводниковых ключей VS_2 , VS_3 , VS_5 к блоку управления БУ2. Блок управления БУ2 вырабатывает периодическую последовательность импульсов управления, коэффициент заполнения которых определяется величиной сигнала, поступающего от задатчика интенсивности торможения. Чем больше величина этого сигнала, тем больше величина коэффициента заполнения импульсов постоянного напряжения на выходе ПЧ и тем больше величина постоянного тока, протекающего по фазам обмотки статора, следовательно, тем интенсивней будет выполняться режим динамического торможения.

Как только в результате торможения частота вращения двигателя станет меньше синхронной, разность сигналов на выходе сумматора снова станет положительной и коммутатор К подключит цепи управления полупроводниковых ключей VS_1 – VS_6 к выходу блока БУ1. В результате этого АД перейдет из режима динамического торможения в двигательный режим работы с новой частотой

вращения. Таким образом, электропривод, выполненный в соответствии с рассматриваемой функциональной схемой, в режимах регулирования частоты вращения в сторону увеличения работает аналогично электроприводам со скалярным управлением, выполненным по типовой схеме. В режимах регулирования частоты вращения в сторону уменьшения, а также в режимах экстренного торможения используется режим динамического торможения, в котором с обмотки статора снимается трехфазное переменное напряжение и подается постоянное напряжение.

Ниже приводятся результаты компьютерного моделирования электромеханических процессов, протекающих в частотно-регулируемом электроприводе судового ПУ, выполненном в соответствии с функциональной схемой на рис. 5. В качестве исполнительного двигателя ПУ используется АД типа АДР-550-4, номинальные параметры которого приведены в таблице.

Схема компьютерной модели электропривода, построенная средствами пакета прикладных программ MATLAB [3], приведена на рис. 6. В состав модели входят следующие подсистемы и библиотечные блоки:

а) AD – подсистема, имитирующая асинхронный двигатель;

- б) ZS – подсистема, имитирующая задатчик скорости;
- в) AISim – подсистема, имитирующая ПЧ, который формирует переменное напряжение с широтно-импульсной модуляцией;
- г) AISim1 – блок, имитирующий ПЧ, который работает в режиме широтно-импульсного преобразователя постоянного напряжения;
- д) BWS – модель блока вычисления разности частот (синхронной частоты вращения и частоты вращения ротора);
- е) Transfer FSN1 – блок, имитирующий пропорционально-интегральный регулятор;
- ж) Transfer FSN2 – блок, имитирующий механическую часть электропривода.

В качестве подсистемы, имитирующей асинхронный двигатель, использовалась классическая модель, построенная в соответствии с уравнениями Парка – Горева для двухфазной обобщенной электрической машины в неподвижных осях α , β .

Схема подсистемы, реализующей задатчик скорости ZS, показана на рис. 7. Схема позволяет устанавливать задание частоты вращения (блок Constant) и интенсивность увеличения частоты вращения двигателя до заданного значения (блоки Transfer Fcn1, Saturation 1) при его пуске и разгоне. Также она позволяет устанавливать задание частоты

Номинальные параметры асинхронного двигателя типа АДР-550-4

Nominal parameters of ADR-550-4 asynchronous motor

Наименование параметра	Величина параметра
Номинальная мощность, кВт	550
Номинальное действующее значение линейного напряжения, В	960
Номинальное действующее значение фазного тока, А	380
Количество фаз, ед.	3
Номинальная частота напряжения статора, Гц	50
Синхронная частота вращения, 1/с	157
Номинальная частота вращения, 1/с	152
Номинальный электромагнитный момент, Нм	3618
Число пар полюсов, шт.	2
Активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом	0,91847
Активное сопротивление фазы ротора, Ом	0,00981
Индуктивность рассеивания обмотки статора, Гн	0,000328
Индуктивность рассеивания фазы ротора, Гн	0,000328
Взаимная индуктивность, Гн	0,02005
Момент инерции ротора двигателя с учетом моментов инерции редуктора и гребного винта с присоединенными массами воды, приведенными к валу двигателя, кгм ²	30

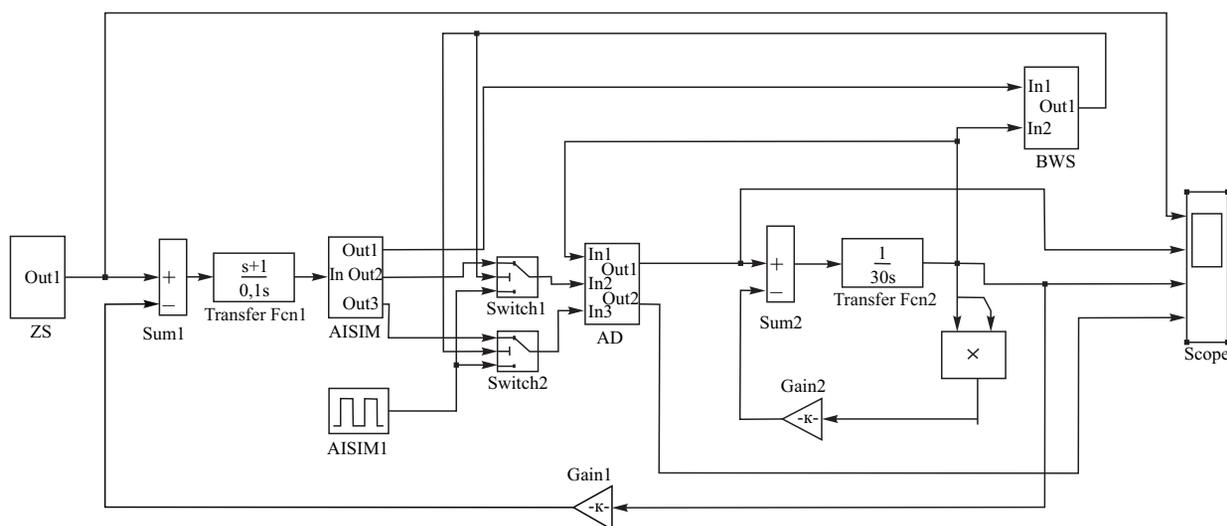


Рис. 6. Схема компьютерной модели электропривода подруливающего устройства

Fig. 6. Layout of computer-based model for electric drive of thruster

ты вращения (блок Step) и интенсивность уменьшения частоты вращения двигателя до заданного значения (блоки Transfer Fcn2, Saturation 2) в случае регулирования в сторону ее снижения.

Схема подсистемы, которая имитирует ПЧ, формирующий двухфазное переменное с широтно-импульсной модуляцией напряжения, показана на рис. 8. На вход подсистемы поступает сигнал управления U_y , формируемый пропорционально-интегральным регулятором ПМ, а с выходов снимаются синусоидальные напряжения $U_{1\alpha}$ и $U_{1\beta}$, поступающие на входы подсистемы, имитирующей АД. Кроме того, с выхода подсистемы снимается сигнал, пропорциональный величине заданной частоты выходного напряжения инвертора f_3 .

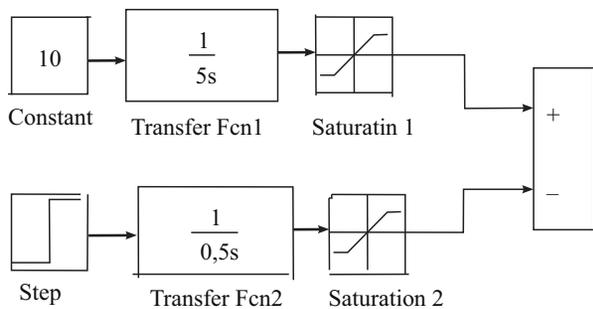


Рис. 7. Схема подсистемы, реализующей задатчик скорости

Fig. 7. Layout of speed controller

Субсистема, моделирующая ПЧ, работающий в режиме широтно-импульсного преобразователя постоянного напряжения, реализовывалась библиотечным блоком Pulse Generator. На вкладках этого блока устанавливалась амплитуда импульсов постоянного напряжения на выходе ПЧ, величина коэффициента заполнения импульсов напряжения и частота их следования.

Схема подсистемы блока вычисления разности частот вращения магнитного поля и ротора показана на рис. 9. На вход подсистемы поступает сигнал, пропорциональный заданному значению частоты f_3 напряжения на выходе ПЧ. В блоке Gain 1 производится вычисление синхронной частоты вращения двигателя ω_{30} , соответствующее заданному значению частоты напряжения на выходе ПЧ. Вычисления производятся в соответствии с выражением 5. Вычисленное значение заданной синхронной частоты вращения двигателя ω_{30} поступает на положительный вход сумматора Sum 1. На отрицательный вход сумматора поступает значение частоты вращения двигателя ω . С выхода подсистемы снимается разность этих значений, которая поступает на блоки Switch 1 и Switch 2, имитирующие коммутатор цепей прохождения импульсов управления К.

В том случае, если разность между синхронной частотой вращения и частотой вращения ротора является величиной положительной (двигательный режим работы), то ключи в блоках Switch 1 и Switch 2 находятся в верхнем положении. При

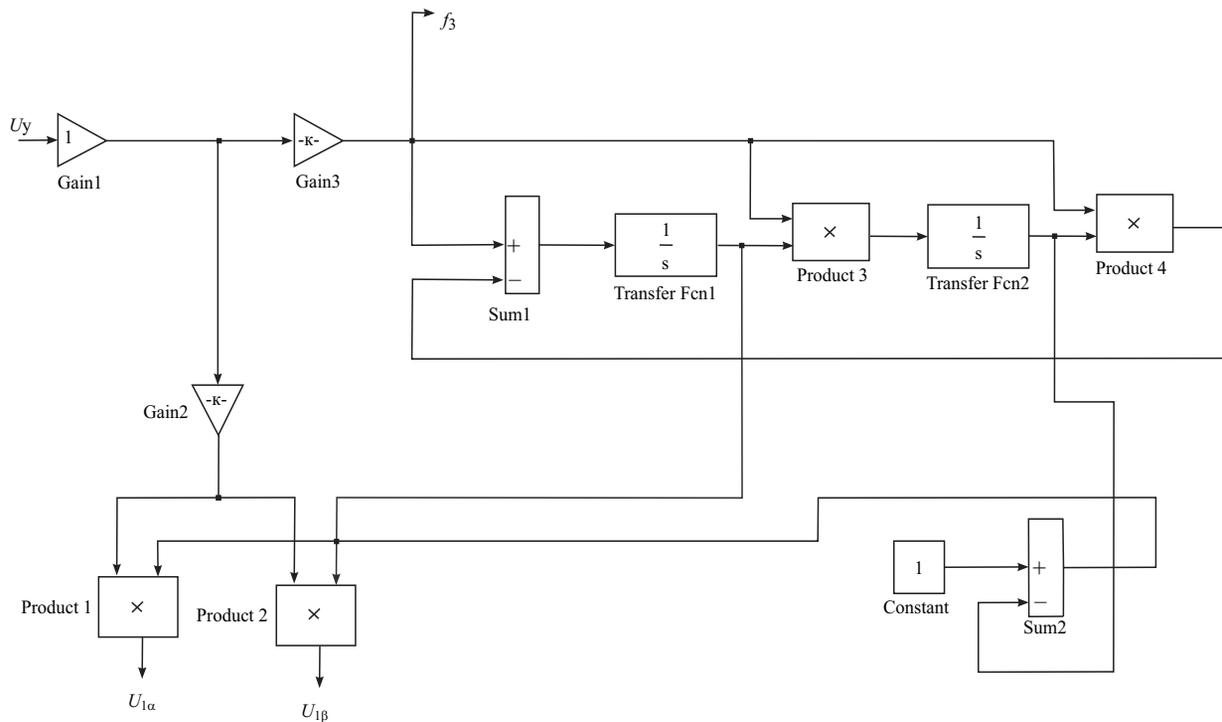


Рис. 8. Схема подсистемы, имитирующей преобразователь частоты, формирующий двухфазное переменное напряжение с широтно-импульсной модуляцией

Fig. 8. Layout of frequency converter generating 2-phase alternating voltage with pulse-width modulation

этом обмотки статора модели асинхронного двигателя подключены к выходным портам модели ПЧ, формирующего двухфазное переменное напряжение. Соответственно, как только разность между синхронной частотой вращения и частотой вращения ротора становится величиной отрицательной (переход в режим электрического торможения), ключи блоков Switch 1 и Switch 2 переходят в нижнее положение. В результате этого обмотки статора модели асинхронного двигателя подключаются к выходу модели ПЧ, работающего в режиме широтно-импульсного преобразователя постоянного напряжения.

Система управления электроприводом, включающая в себя сумматор, пропорционально-интегральный регулятор, датчик частоты вращения, имитировались с помощью библиотечных блоков Sum 1, Transfer FSN1, Gain 1.

Механическая часть электропривода, входящая в состав компьютерной модели, имитировалась посредством библиотечного блока Transfer FSN2, в окне задания параметров которого устанавливалась суммарная величина момента инерции двига-

теля и моментов инерции редуктора, а также гребного винта, приведенных к валу двигателя. С помощью библиотечных блоков Gain 2 и Product имитировалась механическая характеристика гребного винта ПУ.

Характер изменения задания частоты вращения, фактической частоты вращения, электромагнитного момента и тока в обмотках статора АД наблюдались и регистрировались на экране виртуального осциллографа, который имитировался посредством библиотечного блока Scope.

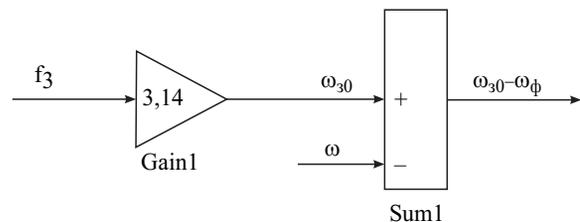


Рис. 9. Схема подсистемы блока вычисления BWS

Fig. 9. Layout of BWS calculation unit

На диаграммах, приведенных на рис. 10–13, показан характер электромеханических процессов, протекающих в модели частотно-регулируемого электропривода ПУ в различных режимах работы. Так, на рис. 10 (см. вклейку, по порядку сверху вниз) показаны диаграммы изменения частоты вращения, электромагнитного момента и тока фазы статора при остановке исполнительного двигателя ПУ путем выключения ПЧ. При выключении на 10 секунде ПЧ ток фазы статора и электромагнитный момент, развиваемый двигателем, становятся равными нулю, в результате чего частота вращения двигателя начинает уменьшаться под действием статического момента нагрузки, действующего на гребной винт ПУ. В силу большого значения момента инерции ротора двигателя, а также моментов инерции редуктора, гребного винта и присоединенных к нему масс воды, приведенных к валу двигателя, процесс уменьшения частоты вращения до полной остановки длится около одной минуты.

Длительность процесса снижения частоты вращения исполнительного двигателя ПУ значительно сокращается, если рассматриваемый электропривод вводит в режим динамического торможения. На рис. 11, 12 (см. вклейку) приведены аналогичные диаграммы, характеризующие характер электромеханических процессов при различных значениях величин постоянного тока, протекающего в фазных обмотках статора исполнительного двигателя в режиме динамического торможения. Диаграммы на рис. 11 соответствуют величине постоянного тока 380 А, которая равна номинальному действующему значению переменного тока статора, а диаграммы на рис. 12 получены при величине постоянного тока 760 А, что в два раза превышает номинальное действующее значение переменного тока. Как следует из приведенных диаграмм, длительность переходного процесса до полной остановки двигателя в первом случае составляет 7 с, во втором – 4 с.

Полученные результаты вполне соответствуют выводам, сделанным в ходе анализа механических характеристик двигателя, приведенных на рис. 4 (отрицательный электромагнитный момент, развиваемый АД в режиме динамического торможения, определяется величиной постоянного тока и увеличивается по мере снижения частоты вращения).

На рис. 13 (см. вклейку) показаны диаграммы электромеханических процессов, протекающих в частотно-регулируемом электроприводе ПУ, в котором традиционно используется режим генераторного торможения (ПЧ содержит резистор, на кото-

ром рассеивается энергия, генерируемая исполнительным двигателем в режиме торможения). Диаграммы получены посредством компьютерной модели, схема которой приведена на рис. 6 (для осуществления возможности имитации режима генераторного торможения в модели убиралась связь между блоками BWS и Switch 1, Switch 2). Здесь (по порядку сверху вниз) представлены диаграмма задания частоты вращения ($1/c$), диаграмма фактического изменения частоты вращения ($1/c$), диаграмма электромагнитного момента (Нм), развиваемого двигателем, и диаграмма фазного тока обмотки статора (А). Из диаграмм, в частности, следует, что в процессе регулирования частоты вращения в направлении ее уменьшения исполнительный двигатель переходит в режим генераторного торможения (электромагнитный момент становится отрицательным). При этом энергия, которая вырабатывается двигателем, должна в виде тепла рассеяться на резисторе, подключаемом к звену постоянного тока ПЧ.

На рис. 14 (см. вклейку) приведены аналогичные диаграммы, полученные при моделировании частотно-регулируемого электропривода ПУ, в котором используется режим динамического торможения (связь между блоками BWS и Switch 1, Switch 2 компьютерной модели была восстановлена). В процессе моделирования величина интенсивности торможения, реализуемая посредством блока ЗИТ, устанавливалась так, чтобы величина постоянного тока, протекающего по обмоткам фаз статора двигателя, не превышала номинального действующего значения переменного тока (380 А). Здесь, так же как на предыдущем рисунке (по порядку сверху вниз), представлены диаграмма задания частоты вращения ($1/c$), диаграмма фактического изменения частоты вращения ($1/c$), диаграмма электромагнитного момента (Нм), развиваемого двигателем, и диаграмма фазного тока обмотки статора (А).

Анализ диаграмм на рис. 13, 14 позволяет заключить следующее:

1. Процессы пуска и регулирования частоты вращения до номинального значения, протекающие в частотно-регулируемом электроприводе ПУ с предлагаемым алгоритмом режима динамического торможения, не отличаются от аналогичных процессов, реализуемых в частотно-регулируемых электроприводах, в которых традиционно реализуется способ генераторного торможения.
2. Существенные различия между ними наблюдаются в процессе регулирования частоты враще-

ния в сторону ее уменьшения, которое заключаются в следующем:

- нарушается линейная зависимость между сигналом задания частоты вращения и ее фактическим значением;
 - на несколько секунд увеличивается время протекания переходного процесса.
3. Недостатки, указанные в предыдущем пункте, компенсируются уменьшением массогабаритных характеристик оборудования, входящего в состав электропривода. Это уменьшение обусловлено отсутствием тормозного резистора и полупроводниковых ключей, посредством которых резистор подключается к звену постоянного тока ПЧ.

ПЧ, используемые в судовых частотно-регулируемых электроприводах ПУ, как правило, рассчитаны на двойную перегрузку по току, действующую в течение 5–6 с (режим заклинивания), поэтому в целях увеличения тормозного электромагнитного момента вполне допустимо в режимах динамического торможения устанавливать величину постоянного тока, также превышающую номинальное действующее значение переменного фазного тока в два раза. На рис. 15 (см. вклейку) приведены диаграммы, характеризующие протекание электромеханических процессов в электроприводе при такой величине постоянного тока в режиме динамического торможения. Как следует из диаграмм, при двойной токовой перегрузке в режиме динамического торможения динамические свойства рассматриваемого электропривода ПУ в части линейного изменения частоты вращения и длительности переходного процесса практически не хуже, чем в традиционно используемых электроприводах с алгоритмом генераторного торможения.

Заключение

Conclusion

По материалам настоящей статьи можно сделать следующий вывод. В частотно-регулируемых электроприводах судовых механизмов различного назначения, к динамическим свойствам которых не предъявляются жестких требований и у которых механическая характеристика носит линейный или вентиляторный характер (насосы, вентиляторы ПУ и пр.), представляется целесообразной реализация режима динамического торможения. Этот режим позволит существенно уменьшить массогабаритные характеристики электроприводов, поскольку в данном случае из состава их оборудования исключаются

тормозной резистор и полупроводниковая коммутационная аппаратура, посредством которой последний подключается к звену постоянного тока ПЧ, а также исключается система их принудительного охлаждения.

Библиографический список

1. *Соколовский Г.Г.* Электроприводы переменного тока с частотным управлением. М: Академия, 2007.
2. *Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С.* Теория автоматизированного электропривода. М: Энергия, 1979.
3. *Герман-Галкин С.Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB. СПб.: Корона, 2001.

References

1. *Sokolovsky G.* Frequency-controlled AC drives. M.: Akademiya, 2007 (in Russian).
2. *Chilikin M., Klyuchev V., Sandler A.* Automated electric drive theory. M.: Energiya, 1979 (in Russian).
3. *German-Galkin S.* MATLAB simulation of semiconductor systems. SPb.: Korona, 2001 (in Russian).

Сведения об авторах

Вершинин Виктор Иванович, инженер 1 категории филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6. Тел.: 8 (812) 748-52-38. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Махонин Сергей Васильевич, начальник сектора – заместитель начальника отдела филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6. Тел.: 8 (812) 748-52-44. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Паршиков Владимир Алексеевич, начальник отдела филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6. Тел.: 8 (812) 748-52-43. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Хомяк Валентин Алексеевич, начальник отдела – главный конструктор ЕЭЭС и ГЕУ филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6. Тел.: 8 (812) 748-52-30. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the authors

Viktor V. Vershinin, 1st Category Engineer, SET Branch, Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st. St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: 8 (812) 748-52-38. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Sergey V. Makhonin, Head of Sector – Deputy Head of Department, SET Branch, Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st. St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: 8 (812) 748-52-44. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Vladimir A. Parshikov, Head of Department, SET Branch, Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st.

St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: 8 (812) 748-52-43. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Valentin A. Khomyak, Head of Department – Chief Designer of IEPS and Electric Propulsion Plants, SET Branch, Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st. St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: 8 (812) 748-52-30. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 20.04.18
Принята в печать / Accepted: 09.11.18
© Коллектив авторов, 2018