

Научная статья  
УДК 621.314.1  
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-85-89>

## Разработка функциональной схемы цифроаналоговой системы управления судовым электроприводом

Александр Сергеевич Бордюг✉

Керченский государственный морской технологический университет,  
Керчь, Россия, [alexander.bordyug@mail.ru](mailto:alexander.bordyug@mail.ru) ✉

**Аннотация.** Рассматривается возможность прямого цифрового управления на основе микропроцессорной техники, имеющей как несомненные преимущества при реализации, так и ряд трудностей, в частности необходимость работы в реальном масштабе времени. При разработке системы управления учитывались две основные проблемы – компромисс в выборе возможного оборудования и устройств обработки сигналов. Предложена функциональная схема цифроаналоговой системы управления судовым электроприводом, с помощью которой можно повысить надежность электропривода с регулируемой частотой вращения. Для любого электропривода при контроле и регулировании контролируют ток, напряжение, частоту вращения привода, угол поворота вала привода. Дополнительно разработана функциональная схема электропривода с частотным управлением, в которой сигнал преобразуется в аналоговую форму с помощью цифро-аналогового преобразователя. Предложено применение генератора двухфазного синусоидального сигнала и формирователя напряжения, что позволит получить синусоидальные сигналы высокой стабильности как по сдвигу фаз, так и по амплитуде (важно с точки зрения энергетических характеристик электропривода). В дальнейшем сигнал преобразуется в аналоговую форму с помощью цифро-аналогового преобразователя и используется в качестве опорного напряжения, формирующего синусоидальные сигналы. После выбора элементной базы можно сделать вывод, что программирование постоянного запоминающего устройства производится для каждого двигателя отдельно, в отличие от остальных блоков схемы, являющихся универсальными, что создает трудности для формирования универсальной системы управления судовым электроприводом. Выявлена вероятность реализации системы управления электроприводом с частотным токовым управлением путем рационального распределения функций между микропроцессором, цифровыми и аналоговыми устройствами.

**Ключевые слова:** цифро-аналоговое управление, асинхронный двигатель, электропривод, генератор двухфазного синусоидального сигнала, преобразователь частоты

**Для цитирования:** Бордюг А. С. Разработка функциональной схемы цифроаналоговой системы управления судовым электроприводом // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 1. С. 85–89. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-85-89>.

Original article

## Developing function diagram of digital-analogue control system of ship electric drive

Alexander S. Bordyug✉

Kerch State Maritime Technological University,  
Kerch, Russia, [alexander.bordyug@mail.ru](mailto:alexander.bordyug@mail.ru) ✉

**Abstract.** The article considers the direct digital control based on microprocessor technology, which has both the undoubted advantages in implementation and some difficulties, for example, work in real time. When developing the control system, two main problems were taken into account: a compromise in choosing possible equipment and signal processing devices. A function diagram of a digital-analogue control system for a ship electric drive is proposed, which can help to increase the reliability of an electric drive with a variable speed. When an electric drive is monitored and regulated, the current, voltage, drive rotation frequency, and the drive shaft rotation angle are under control. In addition, a functional diagram of an electric drive with frequency control has been developed, in which the signal is converted into analog form using a digital-to-analog converter. The application of a two-phase sinusoidal signal generator and a voltage shaper are proposed for obtaining sinusoidal signals of high stability both in phase displacement and in amplitude, which is important from the point of view of the energy characteristics of the electric drive. Further, the signal is converted to the analog form using a digital-to-analog converter and is used as a reference voltage that generates sinusoidal signals. After choosing the element base it can be concluded that the read-only memory device programming is carried out for each engine separately, in contrast to the rest circuit blocks, which are universal, which

creates difficulties for creating a universal control system for a ship electric drive. There has been found the possibility of implementing the control system of the electric drive with frequency current control by using the rational distribution of functions between the microprocessor and digital and analog devices.

**Keywords:** digital-analogue control, asynchronous motor, electric drive, two-phase sine signal generator, frequency converter

**For citation:** Bordyug A. S. Developing function diagram of digital-analogue control system of ship electric drive. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2022;1:85-89. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-85-89>.

### Введение

Вместо традиционного управления байпасом или дросселем на судах насосы мощностью более 50 кВт обычно получают энергию от преобразователей частоты (ПЧ). Потребление энергии может быть уменьшено на 30 %, если насос работает на пониженных скоростях – от 15 до 20 %. Основные преимущества ПЧ:

- повышение эффективности системы привода с переменной нагрузкой путем изменения скорости двигателя;
- управление процессом может осуществляться точно и непрерывно в широком диапазоне скоростей;
- контроль температуры процесса, расхода или давления без использования отдельного контроллера: приводное оборудование с ПЧ взаимодействует с помощью электроники и датчиков;

- сокращение затрат на обслуживание и продление срока службы подшипников за счет уменьшения скорости двигателя;

- исключение использования дросселей и демпферов, снижение сложности управления;

- исключение использования устройства плавного пуска;

- устранение проблем гидравлического удара путем контроля скорости разгона в жидкостной системе;

- обеспечение возможности контроля крутящего момента, который может защитить оборудование от чрезмерного крутящего момента.

### Материалы исследования

Типичная топология ПЧ приведена на рис. 1. Обычно ПЧ содержит выпрямитель, конденсатор постоянного тока, инвертор и схему управления.

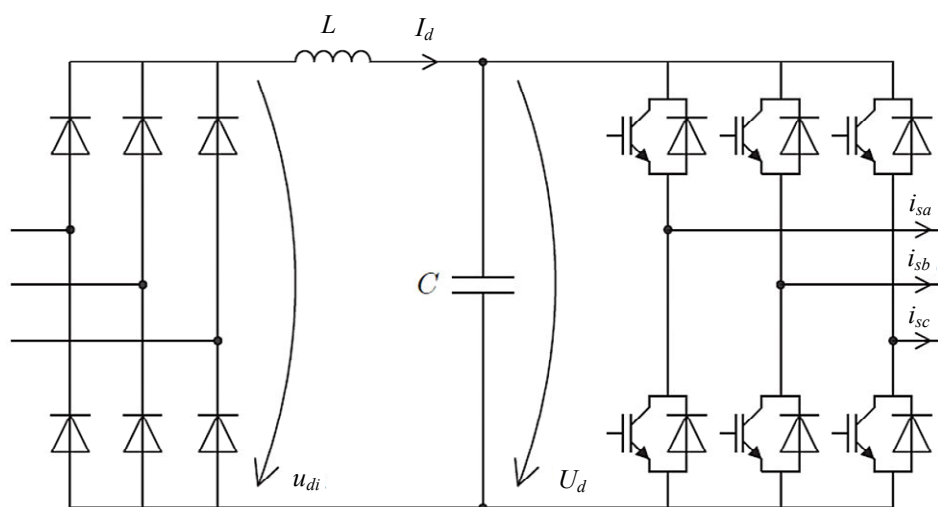


Рис. 1. Типичная топология системы преобразователя частоты

Fig. 1. Typical topology of a frequency converter system

Частотно-токовое управление (ЧТУ) асинхронным электроприводом (ЭП) находит применение при построении высококачественных систем регулирования [1]. Характерной особенностью такого ЭП является формирование синусоидальных токов в фазах асинхронного короткозамкнутого двигателя (АД) путем переключения силовых ключей (СК) инвертора с достаточно высокой частотой (обычно 1–2 кГц). В отличие от различных вариантов про-

граммных ШИМ [2], обеспечивающих также квазисинусоидальный ток, здесь переключение СК осуществляется путем контроля за мгновенной величиной фактического значения тока в фазах двигателя. Обычно структура такого ЭП строится по классическому принципу подчиненного регулирования [3] и содержит контуры регулирования тока (РТ), скорости (РС) и положения (РП) с соответствующими регуляторами.

В механизмах с большим диапазоном регулирования скорости применяется система управления с датчиком скорости. Динамические характеристики таких электроприводов аналогичны динамическим характеристикам электроприводов постоянного тока. Достигается это управлением составляющими  $I_\omega$  и  $I_\mu$  вектора тока, первая из которых пропорциональна моменту двигателя, а вторая – потокоцеплению. Величины  $I_\omega$  и  $I_\mu$  оцениваются

по динамической модели двигателя, составленной представлением мгновенных значений переменных в виде результирующих векторов и переходом к вращающимся системам координат. В системе предусматривается возможность ограничивать момент двигателя в соответствии с заданным значением и управлять интенсивностью изменения момента. Функциональная схема ЭП с ЧТУ приведена на рис. 2.

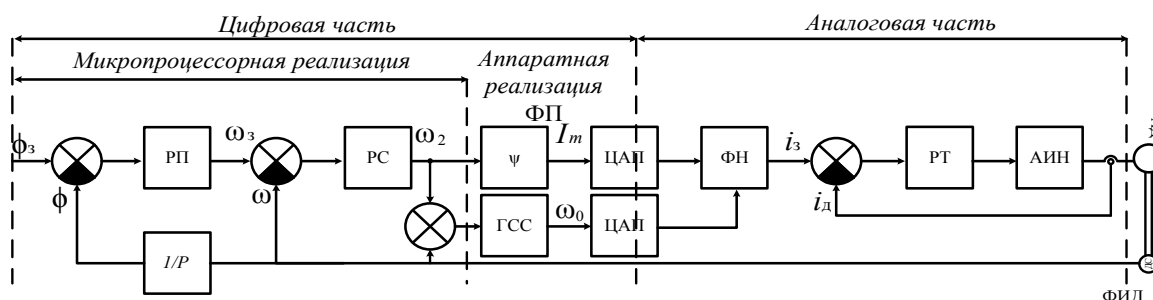


Рис. 2. Функциональная схема электропривода с частотно-токовым управлением:  
 ФП – функциональный преобразователь; ГСС – генератор двухфазного синусоидального сигнала;  
 ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ФН – формирователь напряжения;  
 АИН – автономный инвертор напряжения; ФИД – фотоимпульсный датчик; ДС – датчик скорости

Fig. 2. Function diagram of an electric drive with frequency-current control: ФП - functional converter;  
 ГСС - two-phase sinusoidal signal generator; ЦАП - digital-to-analog converter; ФН - voltage driver;  
 АИН - autonomous voltage inverter; ФИД - photopulse sensor; ДС - speed sensor

При разработке системы управления необходимо иметь в виду решение следующих проблем:

- разумный компромисс между микропроцессорным и аппаратным способами реализации алгоритма управления;
- рациональное сочетание цифровых и аналоговых устройств обработки сигналов.

Прямое цифровое управление на основе микропроцессорной техники, имеющей несомненные преимущества при реализации, встречает ряд трудностей, основной из которых является необходимость работы в реальном масштабе времени. Практически однозначно можно говорить лишь о реализации РП и РС на основе микропроцессорных средств, получивших широкое распространение в отечественной практике. В то же время микропроцессорная реализация РТ практически неосуществима из-за недостаточного быстродействия микропроцессоров. Контролируемые параметры ЭП – ток, напряжение, частота вращения  $\omega$ , угол поворота вала  $c_p$  – по своей сущности аналоговые величины. Широко распространенные ФИД хорошо стыкуются с цифровыми системами и позволяют измерять скорость и путь. Что касается контура тока, то здесь возможны следующие решения:

- преобразование сигналов тока в цифровую форму с помощью аналогово-цифрового преобразователя и в дальнейшем их обработка (сравнение сигналов, реализация РТ) также в цифровом виде;
- преобразование цифровых сигналов с выхода

РС в аналоговую форму и реализация контура тока на основе аналоговых устройств.

Второе решение представляется более рациональным.

### Результаты исследования

Функциональная схема ЭП с ЧТУ, приведенная на рис. 2, содержит функциональный преобразователь (ФП), генератор двухфазного синусоидального сигнала (ГСС) со сдвигом на 90 эл. град, формирователь напряжения (ФН) и автономный инвертор напряжения (АИН). Реализация ГСС и ФН осуществлена цифроаналоговыми устройствами. Это позволяет получить синусоидальные сигналы высокой стабильности как по сдвигу фаз, так и по амплитуде, что важно с точки зрения энергетических характеристик АД.

Функциональная схема ГСС и ФН представлена на рис. 3. Формирование сигналов ГСС целесообразно производить в два этапа. На первом образуются два синусоидальных сигнала в цифровой форме, сдвинутых на 90 эл. град. Для этого сигналы от генератора тактовых импульсов (ГТИ) частоты 1,6 МГц поступают на управляемый делитель частоты (УДЧ), на который также подается код частоты питания  $f_0$  двигателя, полученный в результате сложения частот скольжения и вращения ротора. В итоге на выходе УДЧ имеет место частота  $f_T$ , пропорциональная коду числа на его входе.

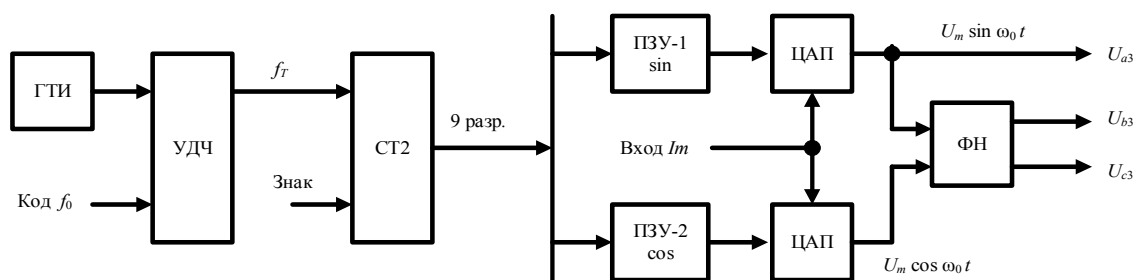


Рис. 3. Функциональная схема генератора двухфазного синусоидального сигнала и функционального преобразователя: ПЗУ – постоянное запоминающее устройство

Fig. 3. Function diagram of a two-phase sinusoidal signal generator and a functional converter: ПЗУ - read-only memory (ROM)

Указанные сигналы, а также сигнал направления вращения подаются на вход реверсивного 16-разрядного двоичного счетчика СТ2, который имеет возможность отключения произвольного числа разрядов (от 1 до 15) путем изменения состояния входов А0 – А3. Число отключенных разрядов (начиная с младшего) соответствует десятичному числу, поданному в двоичном представлении на входы А0 – А3. Например, если на входы А0, А1, А2, А3 поданы логические уровни 1, 1, 0, 0, что соответствует десятичному числу 3, то отключаются разряды  $2^0, 2^1, 2^2$  соответственно.

Выходы СТ2 подключены ко входам ПЗУ-1 и ПЗУ-2 с организацией 8К\*8, в которых запрограммированы коды, соответствующие синусоидальному (ПЗУ-1) и косинусоидальному (ПЗУ-2) сигналам. Число адресных входов ПЗУ равно 9, следовательно, синусоидальный сигнал имеет  $2^9 = 512$  значений на периоде. Количество информационных входов ПЗУ равно 8, поэтому число уровней синусоидального сигнала от минимального до максимального значения составляет  $2^8 = 256$ . Входы А0 – А3 применяются для деления синусоиды на разные числа и изменения диапазона рабочих частот. Коды для программирования ПЗУ могут быть найдены по формулам

$$N_1 = 255 - 127 \sin\left(\frac{2\pi i}{512}\right);$$

$$N_2 = 255 - 127 \cos\left(\frac{2\pi i}{512}\right),$$

где  $i$  – адрес ПЗУ.

Поскольку ко входам ПЗУ подключены разряды счетчика  $2^7 - 2^{15}$ , при десятичном числе 0 (на входах А0 – А3) младшие разряды счетчика работают в качестве делителя частоты. В общем случае частота выходного синусоидального сигнала определяется как

$$f_{\sin} = \frac{f_c}{2^{16-n}},$$

где  $f_c$  – частота следования импульсов на входе СТ2;  $n$  – число на входах А0 – А3 счетчика.

Необходимо отметить, что при  $n > 7$  число

уровней квантования периода синусоиды уменьшается в зависимости от количества отключенных разрядов. Преобразование кодов с выходов ПЗУ в аналоговый сигнал производится с помощью ЦАП. Формирование сигналов с фазовым сдвигом  $2\pi/3$  и  $4\pi/3$  осуществляется с помощью операционных усилителей блока ФН в соответствии с векторной диаграммой (рис. 4), на основании которой можно записать [4–6]:

$$U_a = U_1;$$

$$U_b = -0,5(U_1 - 3U_2);$$

$$U_c = -0,5(U_1 + 3U_2) = -(U_a + U_b);$$

$$U_1 = U_{\text{он}} \sin \omega_0 t;$$

$$U_2 = U_{\text{он}} \cos \omega_0 t,$$

где  $U_1, U_2$  – напряжения с выхода ЦАП;  $U_a, U_b, U_c$  – фазные напряжения единичной амплитуды;  $U_{\text{он}}$  – опорное напряжение ЦАП.

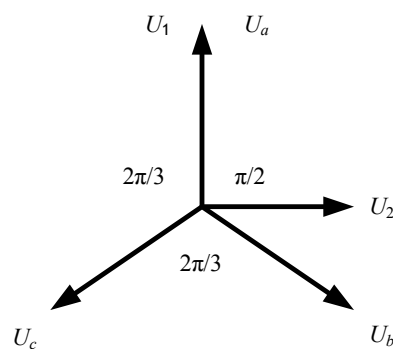


Рис. 4. Векторная диаграмма сформированных сигналов

Fig. 4. Vector diagram of generated signals

Помимо этого, в блоке ФН осуществляется умножение напряжения сигналов  $U_a, U_b, U_c$  на сигнал  $I_m$ , пропорциональный заданной амплитуде фазных токов двигателя. Этот сигнал в цифровом виде формируется функциональным преобразователем ФП, реализующем путем программирования ПЗУ зависимость  $I_m(\omega_2)$  в соответствии с формулой

$$I_m = \frac{\Phi_r}{L_m} \sqrt{1 + \omega_2 T_r}, \quad (1)$$

где  $I_m$ ,  $\Phi_r$  – амплитудные значения тока двигателя при нагрузке и магнитного потока ротора соответственно;  $T_r = L_r / R_r$ ;  $L_m$  – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора;  $L_r$ ,  $R_r$  – параметры схемы замещения АД.

В дальнейшем сигнал преобразуется в аналоговую форму с помощью ЦАП и используется в качестве опорного напряжения ЦАП, формирующих синусоидальные сигналы. Очевидно, что программирование ПЗУ в соответствии с (1) производится для каждого двигателя отдельно, в отличие от остальных

блоков схемы, являющихся универсальными.

### Заключение

Система управления судовым ЭП в насосной станции судна с ЧТУ может быть реализована путем рационального распределения функции между микропроцессором, цифровыми и аналоговыми устройствами. В статье представлена организация системы, в которой сигналы преобразуются в аналоговую форму и формируют синусоидальный сигнал. С помощью предложенного подхода возможно повысить надежность и экономичность судового электропривода за счет правильного управления.

### Список источников

1. Доровской В. А., Черный С. Г., Бордюг А. С. Компараторная идентификация частотных характеристик систем автоматического управления судовой энергетической установки // Вестн. Поволж. гос. технолог. ун-та. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2020. № 1 (45). С. 47–57.
2. Catastrophic failure of a capacitor and explosion in an 11kV harmonic filter on board the passenger cruise vessel RMS Queen Mary 2: Marine Accident Investigation Board Safety Bulletin 4/2010. Marine Accident Investigation Branch. 6 p.
3. Варжель С. В. Волоконные брегговские решетки. СПб.: Изд-во Ун-та ИТМО, 2015. 65 с.
4. Chernyi S. G., Bordug A. S., Kozachenko L. N., Erofeev P. A., Zhukov V. A. The reliability assessment of functioning of autonomous power system of drilling rigs //

Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020 (Moscow, Saint-Petersburg, January 27–30, 2020). Saint-Petersburg: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. P. 259–263.

5. Бордюг А. С. Применение технологии распределенного оптического контроля в судовых электроэнергетических системах // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2021. № 2. С. 75–81.

6. Сметюх Н. П., Черный С. Г., Ениватов В. В., Бордюг А. С. Скалярное многофакторное оценивание диагностических характеристик судовых энергетических систем // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной пром-сти. 2019. № 12 (557). С. 15–19.

### References

1. Dorovskoi V. A., Chernyi S. G., Bordiug A. S. Komparatornaia identifikatsiia chastotnykh kharakteristik sistem avtomaticheskogo upravleniia sudovoi energeticheskoi ustanovki [Comparator identification of frequency characteristics of automatic control systems of ship power plant]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*, 2020, no. 1 (45), pp. 47-57.
2. Catastrophic failure of a capacitor and explosion in an 11kV harmonic filter on board the passenger cruise vessel RMS Queen Mary 2: Marine Accident Investigation Board Safety Bulletin 4/2010. Marine Accident Investigation Branch. 6 p.
3. Varzhel' S. V. *Volonnyye breggovskie reshетки* [Bragg fiber gratings]. Saint-Petersburg, Izd-vo Un-ta ITMO, 2015. 65 p.
4. Chernyi S. G., Bordug A. S., Kozachenko L. N., Erofeev P. A., Zhukov V. A. The reliability assessment of functioning of autonomous power system of drilling rigs.

*Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020 (Moscow, Saint-Petersburg, January 27–30, 2020)*. Saint-Petersburg, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. Pp. 259-263.

5. Bordiug A. S. Primenenie tekhnologii raspredelennogo opticheskogo kontrolya v sudovykh elektroenergeticheskikh sistemakh [Application of distributed optical control technology in ship electric power systems]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2021, no. 2, pp. 75-81.

6. Smetiukh N. P., Chernyi S. G., Enivatov V. V., Bordiug A. S. Skaliarnoe mnogofaktornoe otsenivanie diagnosticheskikh kharakteristik sudovykh energeticheskikh sistem [Scalar multifactorial estimation of diagnostic characteristics of ship power systems]. *Avtomatizatsiia, telemekhanizatsiia i sviaz' v nefyanoi promyshlennosti*, 2019, no. 12 (557), pp. 15-19.

Статья поступила в редакцию 15.12.2021; одобрена после рецензирования 17.01.2022; принята к публикации 21.01.2022  
The article was submitted 15.12.2021; approved after reviewing 17.01.2022; accepted for publication 21.01.2022

### Информация об авторе / Information about the author

**Александр Сергеевич Бордюг** – кандидат технических наук; доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства; Керченский государственный морской технологический университет; 298309, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82; alexander.bordug@mail.ru

**Alexander S. Bordiug** – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Ship Power Supply and Automation; Kerch State Maritime Technological University; 298309, Kerch, Ordzhonikidze St., 82; alexander.bordug@mail.ru

