

УДК 629.12:621.313.333.2

DOI 10.46960/2658-6754\_2021\_4\_59

## **ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГРЕБНЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

**Т.Э. Муртазин**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева  
Нижний Новгород, Россия  
e-mail: tm.murtazin@yandex.ru

**В.Г. Титов**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева  
Нижний Новгород, Россия  
e-mail: eos@nntu.ru

**О.А. Мотина**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева  
Нижний Новгород, Россия  
e-mail: eos@nntu.ru

В настоящее время подавляющее большинство регулируемых асинхронных электроприводов разрабатывается с системой векторного управления. Современное программное обеспечение имитационного моделирования позволяет на этапе проектирования оценивать качество переходных процессов токов, скорости и момента электродвигателя. Представлена структура векторного управления гребным асинхронным электродвигателем. Предложена математическая модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением и контуром активной мощности. Результаты моделирования подтверждают правильность настройки контуров регулирования и позволяют говорить о пригодности разработанной модели для инженерных расчетов.

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, векторное управление, имитационное математическое моделирование, система электродвижения судна, частотное регулирование.

**Для цитирования:** Муртазин Т.Э., Титов В.Г., Мотина О.А. Векторное управление гребным асинхронным электроприводом // Интеллектуальная электротехника. 2021. № 4. С. 59-67. DOI: 10.46960/2658-6754\_2021\_4\_59

## **VECTOR CONTROL OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE IN SHIP PROPULSION SYSTEM**

**T.E. Murtazin**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia  
e-mail: tm.murtazin@yandex.ru

**V.G. Titov**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia  
e-mail: eos@ntu.ru

**O.A. Motina**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia  
e-mail: eos@ntu.ru

**Abstract.** Currently, the vast majority of regulated asynchronous electric drives are being developed with a vector control system. Modern simulation software makes it possible to evaluate the quality of transient processes of currents, speed and torque of an electric motor at the design stage. The structure of vector control of the asynchronous electric drive in ship propulsion system is presented. A mathematical model of a frequency-controlled asynchronous electric drive with vector control and an active power circuit is proposed. The simulation results confirm the correctness of the adjustment of the control circuits and allow one to talk about the suitability of the developed model for engineering calculations.

**Keywords:** asynchronous electric drive, frequency control, ship electric propulsion system, simulation mathematical modeling, vector control.

**For citation:** T.E. Murtazin, V.G. Titov and O.A. Motina, “Vector control of asynchronous electric drive in ship propulsion system”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 59-67, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754\_2021\_4\_59

**I. Введение**

Современные системы электродвижения судов строятся на базе машин переменного тока с частотным регулированием. Применение гребных электроустановок позволяет проще и шире организовать автоматизацию и дистанционное управление, делает более удобным обслуживание и контроль, а также позволяет обеспечить подачу электроэнергии от главных генераторов на вспомогательные судовые электромеханизмы и другие потребители [1-6].

Здесь рассматривается имитационное математическое моделирование частотно-регулируемого гребного асинхронного электропривода с контролем активной мощности и с векторным управлением.

**II. Структура системы управления гребным электродвигателем**

Гребной электродвигатель передает вращение на движители, которые создают силу тяги, прикладываемую к корпусу судна, и приводят его в

движение. Момент нагрузки на валу двигателя имеет центробежный характер, то есть зависит от квадрата скорости вращения, а также от параметров воды, в которую погружен движитель. К таким параметрам относятся вязкость, температура, наличие ледяной кашицы (для ледоходных судов) и др. Поэтому нет особого смысла в регулировании только скорости вращения двигателя. Целесообразнее организовать в системе управления контур активной мощности на валу двигателя. Возможности векторного управления позволяют вычислять момент без применения сложных систем датчиков. Для этого необходимо знать лишь потокосцепление ротора, которое вычисляется в рамках управления, и значение проекции тока статора на ось  $q$ , которое определяется путем координатных преобразований сигналов с датчиков тока статора. Таким образом, при помощи датчиков тока и положения можно вычислить активную мощность на валу и сигнал обратной связи на регулятор мощности.

В качестве источника питания гребного электродвигателя чаще всего выступает синхронный генератор с дизельным первичным двигателем. От этого же генератора могут получать питание и другие электропотребители судна. Превышение потребляемой из генератора мощности свыше 105-110% от номинального уровня может привести к перегрузке агрегата, снижению срока эксплуатации из-за длительной работы на предельных режимах, большому расходу топлива. Поэтому необходимо ограничивать потребляемую гребным электродвигателем мощность до уровня 110% от номинала.

Во избежание бросков мощности в переходных режимах целесообразно применить задатчик интенсивности, который осуществляет плавное нарастание и снижение задающего сигнала с определенной интенсивностью.

В соответствии со сказанным ранее составлена структура системы векторного управления гребным асинхронным двигателем [7, 8] (рис. 1). Элементы данной структуры: ЗИ – задатчик интенсивности, Огр.  $S_{\text{потр}}$  – ограничитель потребляемой полной мощности,  $PP_{\text{мех}}$  – регулятор активной механической мощности, ВМ – вычислитель электромагнитного момента двигателя,  $VI_q$  – вычислитель тока  $I_q$ ,  $VI_d$  – вычислитель тока  $I_d$ ,  $V\psi_r$  – вычислитель потокосцепления ротора  $\psi_r$ ,  $V\theta$  – вычислитель угла вектора потока ротора,  $PT_q$  – регулятор тока  $I_q$ ,  $PT_d$  – регулятор тока  $I_d$ , БКПС – блок компенсации перекрестных связей, ПК1-ПК2 – преобразователи координат, ШИМ – широтно-импульсный модулятор.



2, 3). Модель разработана с допущением того, что вместо синхронного генератора с дизельным первичным двигателем используется идеальный источник трехфазного напряжения, мощность которого много больше мощности электропривода.

Блок «Inverter», построенный на базе *IGBT* транзисторов, получает питание от идеального источника трехфазного напряжения « $V_a, V_b, V_c$ » через выпрямитель «*Universal Bridge*». Затем через блок измерений «*Three-Phase V-I Measurement*» напряжение поступает на двигатель. С помощью элемента «*Bus selector*» и блок «*Scope*» будем наблюдать за сигналами двигателя. Блок «*Power calculation*» рассчитывает потребляемую системой мощность. Блок «*Torque simulation*» имитирует на валу двигателя центробежную нагрузку.

Блоки «*Clark*», «*D\_Park-Gorev*» и «*I\_Park-Gorev*» осуществляют координатные преобразования. Блоки «*Iq\* calculation*», «*Id\* calculation*», «*Flux calculation*» и «*Flux position*» производит вычисление задания на ток по осям  $q$  и  $d$ , амплитуду и угол поворота вектора потокосцепления ротора соответственно. Блоки «*Filter Id*» и «*Filter Iq*» предназначены для фильтрации сигналов обратных связей по току оси  $d$  и  $q$  соответственно от высокочастотных искажений. Блоки «*PI Id*» и «*PI Iq*» – ПИ-регуляторы тока  $I_d$  и тока  $I_q$  соответственно. Блок «*P P*» – П-регулятор активной мощности. Блок «*Compensation*» осуществляет компенсацию перекрестных связей. Блок «*M calculation*» вычисляет момент на валу электродвигателя. В блоке «*Pmech calculation*» вычисляется механическая мощность путем перемножения скорости вращения вала двигателя на электромагнитный момент. Блок «*Input power limiter*» ограничивает потребляемую системой мощность. Блок «*Intensity setter*» – задатчик интенсивности.

Система управления формирует сигналы напряжения  $U_a$  и  $U_b$ . Для реализации данных векторов использован блок векторной ШИМ «*SVPWM Generator (2-Level)*», который на основе этих сигналов подает импульсы, частотой 10 кГц, на затворы транзисторов инвертора.

Система управления и регулирования построена по подчиненному принципу и имеет два внутренних параллельных контура тока и один внешний контур активной мощности. Если математическое выражение коэффициентов является практически невозможным для такой сложной системы, то возможно прибегнуть к методу подбора. Используя метод Циглера-Никольса [11] (вывод системы на границу устойчивости увеличением  $k_n$ ), определены коэффициенты регуляторов токов и мощности. Переходные процессы пуска под нагрузкой показаны на рис. 4.

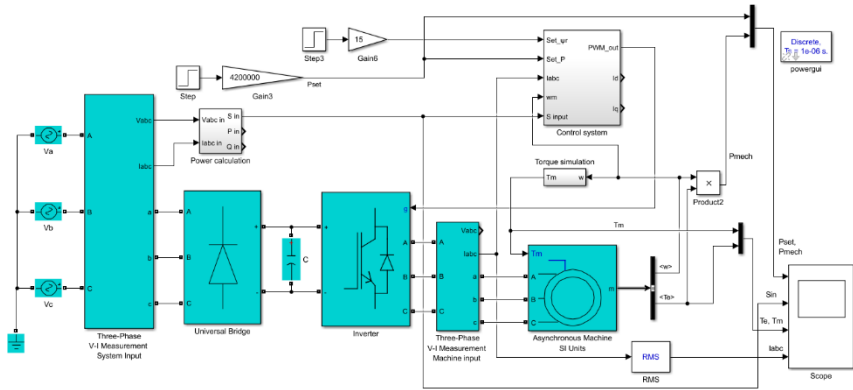


Рис. 2. Модель гребного асинхронного электропривода  
Fig. 2. Model of the rowing electric drive

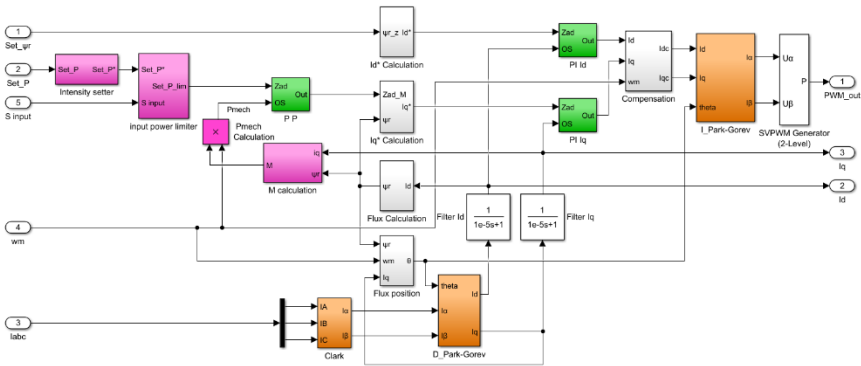


Рис. 3. Модель структуры векторного управления (блок «Control system»)  
Fig. 3. Model of the vector control structure (block “Control system”)

Обозначения на рис. 4:  $P_{\text{зад}}$  – задание на активную мощность;  $P_{\text{мех}}$  – механическая мощность на валу двигателя;  $S_{\text{потр}}$  – полная потребляемая электроприводом мощность;  $M$  – электромагнитный момент двигателя;  $M_c$  – момент нагрузки;  $I_A, I_B, I_C$  – токи двигателя в фазах  $A, B$  и  $C$ ;  $I_n$  – номинальный ток двигателя

Как видно из рис. 4, бросок момента двигателя не превышает ограничения в 900 000 Н·м. Активная мощность с заданной интенсивностью вышла на необходимое значение. Небольшая статическая ошибка при использовании П-регулятора мощности является допустимой. Потребляемая мощность не превышает ограничение в 6 600 000 ВА.

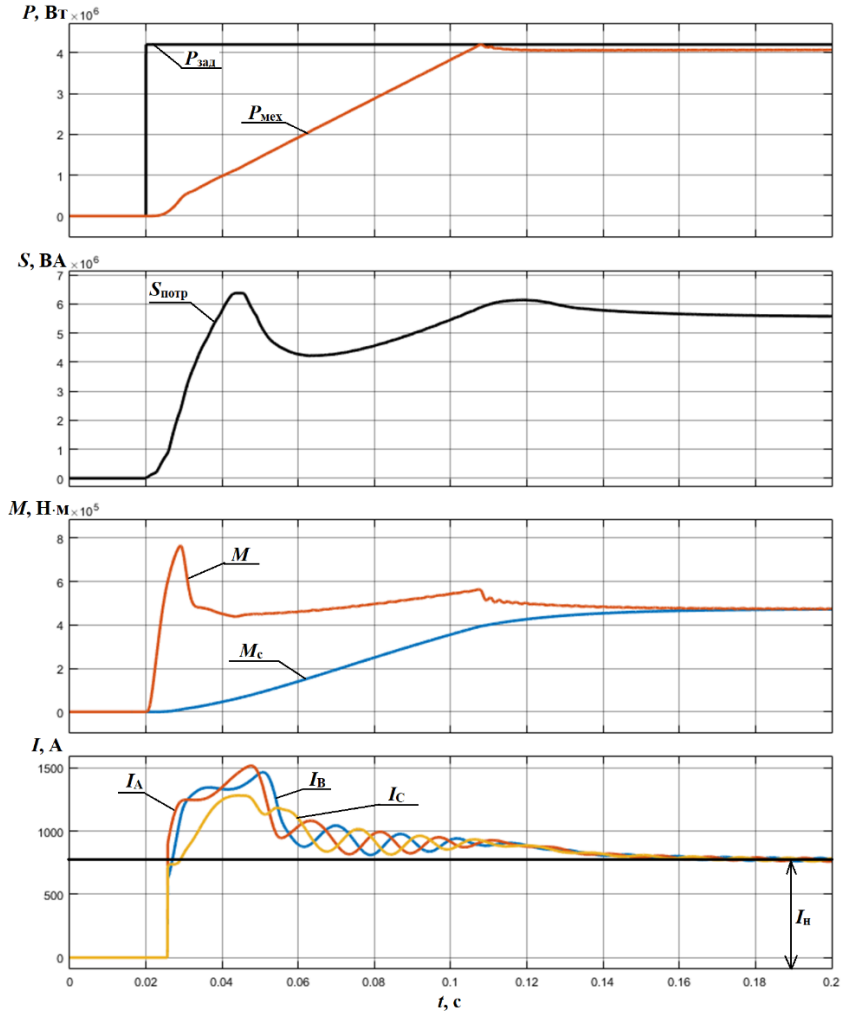


Рис. 4. Переходные процессы при пуске гребного асинхронного двигателя  
 Fig. 4. Transients when starting a rowing asynchronous motor

#### IV. Заключение

Анализ результатов моделирования показал, что предложенный вариант системы векторного управления частотно-регулируемым гребным асинхронным электроприводом работоспособен: контура регулирования обрабатывают задающее воздействие с необходимым быстродействием и

точностью, величины параметров системы не превышают заданных ограничений. В дальнейшем планируется изучить влияние работы системы на реальную судовую энергосеть и модернизировать математическую модель.

© Муртазин Т.Э., 2021

© Титов В.Г., 2021

© Мотина О.А., 2021

Поступила в редакцию 08.10.2021

Received 08.10.2021

### Библиографический список

- [1] Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. – 265 с.
- [2] Дарьенков А.Б., Титов В.Г., Мирясов Г.М., Охотников М.Н., Умяров Д.В. Гребные электрические установки. Н. Новгород: НГТУ, 2015. – 206 с.
- [3] Тихомиров В.А., Титов В.Г., Хватов С.В. Технические и экономические аспекты применения регулируемых приводов постоянного и переменного тока // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. № 4 (83). С. 190-204.
- [4] Михеев Е.А. Частотное регулирование электропривода // Символ науки: Международный научный журнал. 2016. № 11-3. С. 124-126.
- [5] Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 300 с.
- [6] Гельвер Ф.А., Белоусов И.В., Самосейко В.Ф. Гребные электрические установки судов большой мощности // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2019. № 30. С. 7-27.
- [7] Борисевич А.В., Омельченко Н.В. Реализация векторного управления асинхронным электродвигателем на микроконтроллере STM32F4 // Электронный научно-практический журнал «Современные научные исследования и инновации». 2014. № 4. Ч. 1. [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2014/04/33144> (дата обращения: 03.09.2021).
- [8] Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика). М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 72 с.
- [9] Дьяконов, В.П. MATLAB. Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
- [10] Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2008. – 784 с.
- [11] Вадутов О.С., Настройка типовых регуляторов по методу Циглера–Николяса. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 10 с.

### References

- [1] G.G. Sokolovsky, *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem [Variable frequency AC drives]*. Moscow: Academy, 2006 (in Russian).
- [2] A.B. Daryenkov, V.G. Titov, G.M. Miryasov, M.N. Okhotnikov and D.V. Umiarov, *Grebnye elektricheskiye ustanovki [Electric propulsion systems]*. N. Novgorod, NNSTU, 2015 (in Russian).



- [3] V.A. Tikhomirov, V.G. Titov and S.V. Hvatov, "Technical and economic aspects of the using controlled drive constant and alternating current", *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 4 (83). pp. 190-204, 2010.
- [4] E.A. Mikheev, "Chastotnoe regulirovanie elektropriroda [Electric drive variable frequency control]", *Symbol of Science: International Scientific Journal*, № 11-3, pp. 124-126, 2016 (in Russian).
- [5] V.M. Terekhov and O.I. Osipov, *Sistemy upravleniya elektropriwodov [Electric drive control systems]*. Moscow: Akademiya, 2005 (in Russian).
- [6] F.A. Gelver, I.V. Belousov and V.F. Samoseiko, "Electrical propulsion plant of ships, heavy-duty", *PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems*, no. 30, pp. 7-27, 2019 (in Russian).
- [7] A.V. Borisevich and N.V. Omelchenko, "Implementation of a field oriented control of induction motor using STM32F4", *Electronic scientific & practical journal «Modern scientific researches and innovations»*, no. 4, p. 1, 2014. [Online]. Available at: <https://web.snauka.ru/en/issues/2014/04/33144>.
- [8] Yu.N. Kalachev, *Vektornoye regulirovanie (zametki praktika) [Vector control (practitioner's notes)]*. Moscow: Publishing house MPEI, 2013 (in Russian).
- [9] V.P. Diakonov. *MATLAB. Polniy samouchitel [MATLAB. Complete tutorial]*. Moscow: DMK Press, 2012 (in Russian).
- [10] V.P. Diakonov. *Simulink 5/6/7: Samouchitel [Simulink 5/6/7: Tutorial]*. Moscow: DMK Press, 2008 (in Russian).
- [11] O.S. Vadutov, *Nastroyka tipovykh regulatorov po metodu Tsiglera-Nikol'sa [Setting up standard regulators using the Ziegler-Nichols method]*. Tomsk: TPU, 2014 (in Russian).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Муртазин Тимур Эмильевич**, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Титов Владимир Георгиевич**, доктор технических наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Мотина Ольга Адольфовна**, заведующий лабораторией Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

**Timur E. Murtazin**, postgraduate student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Vladimir G. Titov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Ol'ga A. Motina**, head of the laboratory of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.