

УДК 621.3.076

## Векторное управление асинхронным двигателем с оптронным датчиком — формирователем алгоритма

А. Н. Марикин, А. М. Евстафьев, В. Г. Жемчугов, А. Д. Онофрийчук, О. В. Хвостова

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Марикин А. Н., Евстафьев А. М., Жемчугов В. Г., Онофрийчук А. Д., Хвостова О. В. Векторное управление асинхронным двигателем с оптронным датчиком — формирователем алгоритма // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 3. — С. 667–675. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-667-675

### Аннотация

В статье рассмотрен принцип построения частотного управления асинхронным двигателем с шестиканальным датчиком — формирователем алгоритма. **Цель:** Широкий спектр преимуществ асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором совместно с частотным преобразователем привел к распространённому использованию такого электропривода во многих сферах. При этом характеристики систем автоматического управления частотным преобразователем сложны в технической реализации, а их стоимость значительно превышает стоимость асинхронного двигателя. Предлагаемый способ управления частотным преобразователем, основанный на прямом векторном управлении от оптронного датчика — формирователя алгоритма, позволяет получить широкий диапазон регулирования скоростей электродвигателя при оптимальном соотношении энергетических и механических свойств. Жесткая связь датчика с ротором двигателя задает постоянное скольжение и определяет алгоритм работы ключей инвертора с заданной частотой и положение вектора потокосцепления ротора относительно вектора потокосцепления обмотки статора во всем диапазоне регулирования. **Методы:** Проведены экспериментальные исследования на лабораторной установке, получены рабочие, механические и регулировочные характеристики. **Результаты:** Было установлено, что зависимость скорости двигателя от напряжения на входе инвертора носит линейный характер, рост момента вызывает снижение скорости двигателя, причем на холостом ходу при отсутствии нагрузки скорость двигателя существенно выше номинального значения. При нагрузке двигателя около 70% от номинального значения скорость, ток и момент соответствуют номинальным значениям, в то время как коэффициент полезного действия оказывается ниже на 15%, чем номинальное значение, за счет потерь в выпрямителе и инверторе и потерь от высших гармоник. **Практическая значимость:** Результаты исследований подтвердили работоспособность предлагаемого способа в широком диапазоне скоростей и нагрузок, имеют значение для оценки применимости способа управления в силовом электроприводе.

**Ключевые слова:** Асинхронный электропривод, система управления, шестиканальный оптронный датчик — формирователь алгоритма, электромеханические характеристики, экспериментальные исследования.

Известные преимущества асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в сочетании с частотным преобразователем обусловили его широкое применение для различных нагрузок и назначений, требующих широкого диапазона

регулирования скоростей при оптимальном соотношении энергетических и механических свойств, например, в тяговых электроприводах, а также для плавного пуска и остановки промышленных электроприводов (мощных ком-



Рис. 1. Способы частотного управления асинхронным двигателем

прессоров, насосов). Технические требования к системам автоматического управления, сложность технической реализации, стоимость и особенности содержания при эксплуатации определяются их назначением. К настоящему времени разработано и теоретически обосновано широкое разнообразие технических решений в этой области [1–5]. Основные из них показаны на рис. 1.

Предлагаемый способ прямого векторного управления основан на применении оптронного датчика — формирователя алгоритма, жестко соединенного с ротором двигателя. Причем, в отличие от энкодера [6], датчик одновременно выполняет функции задания скольжения, алгоритма работы ключей инвертора с заданной частотой и положения вектора потокосцепления ротора относительно вектора потокосцепления обмотки статора во всем диапазоне регулирования. Преобразование энергии такой системы с учетом обратной связи по ротору можно представить в виде следующей последовательности [7]:

$$U_d \rightarrow \text{АИН} \rightarrow U_1 \rightarrow I_1 \rightarrow I_1 w_1 \rightarrow \Phi \rightarrow E_2 \rightarrow I_2 \rightarrow I_2 w_2 \rightarrow M_{\text{ЭМ}} \rightarrow n_2(f_2) \rightarrow \text{ДФА} \rightarrow f_1,$$

где  $U_d$  — напряжения питания автономного инвертора;

АИН — автономный инвертор напряжения;

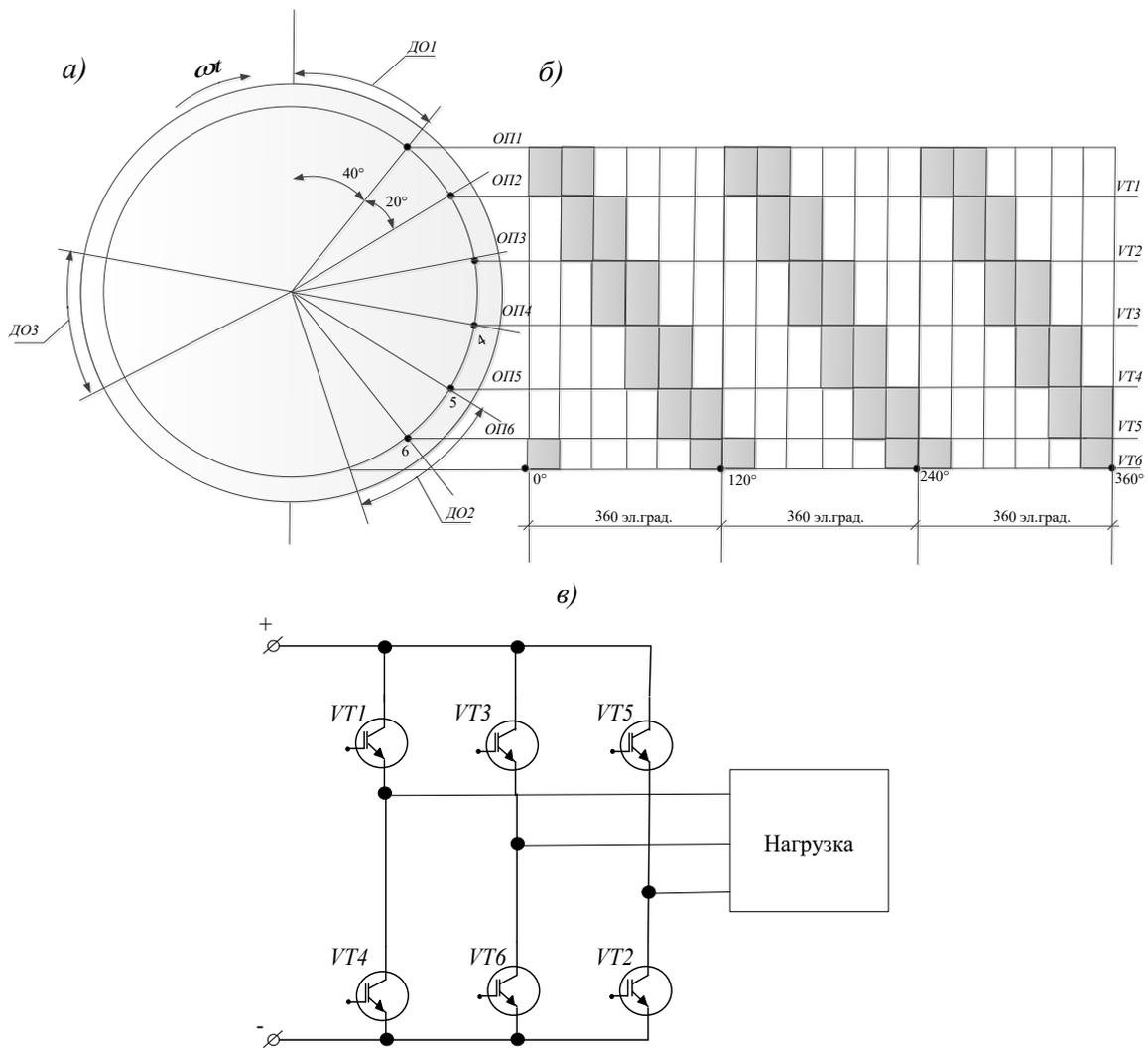
$U_1$  — фазное напряжения двигателя;

$I_1$  — фазный ток двигателя;

$I_1 w_1$  — намагничивающая сила в обмотке статора;

$\Phi$  — основной магнитный поток;

$E_2$  — ЭДС обмотки ротора;



**Рис. 2.** Формирование алгоритма:

*а* — конструкция оптронного датчика — формирователя алгоритма; *б* — диаграмма формирования алгоритма управления АИН; *в* — схема силовых цепей АИН

$I_2$  — ток ротора;

$M_{ЭМ}$  — электромагнитный момент двигателя;

$n_2$  — скорость вращения ротора;

$f_2$  — частота тока ротора;

ДФА — датчик — формирователь алгоритма;

$f_1$  — частота тока статора.

Датчик — формирователь алгоритма представляет собой две неподвижные пластины с оптронами ОП1 — ОП6 (на одной пластине установлен светодиод, на другой — фотодиод). Длительность сигнала обеспечивается дуговыми окнами

ДО1-ДО3. Диаграмма формирования 120-градусного алгоритма управления АИН для шестиполюсной машины изображена на рис. 2 [8–10].

Датчик установлен на валу АД и позволяет реализовать способ подчиненного частотного управления двигателем в широком диапазоне скоростей. Изометрия с разрезом представлена на рис. 3.

Значение скольжения обеспечивается геометрическими характеристиками расположения оптронов и коммутационных окон так, что  $f_2 < f_1$ , где  $f_2$  — частота тока ротора;  $f_1$  — частота тока статора.

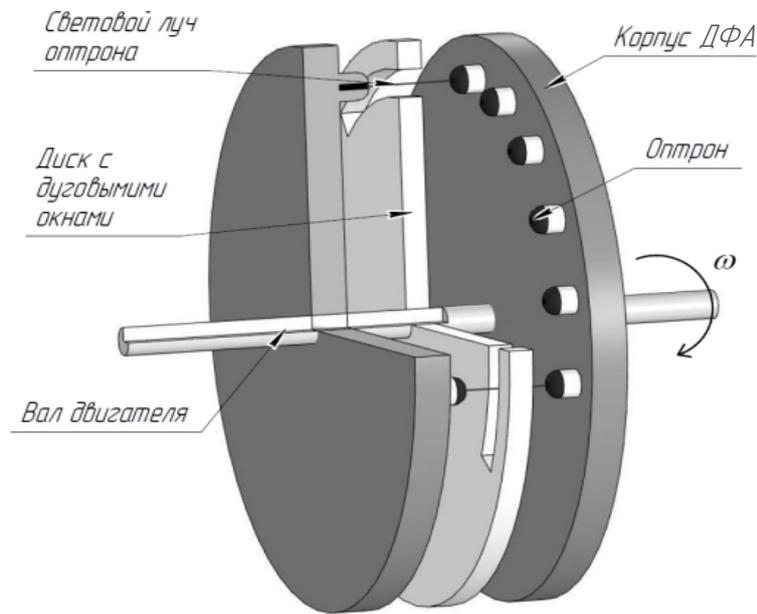


Рис. 3. Изометрия с разрезом оптронного датчика — формирователя алгоритма

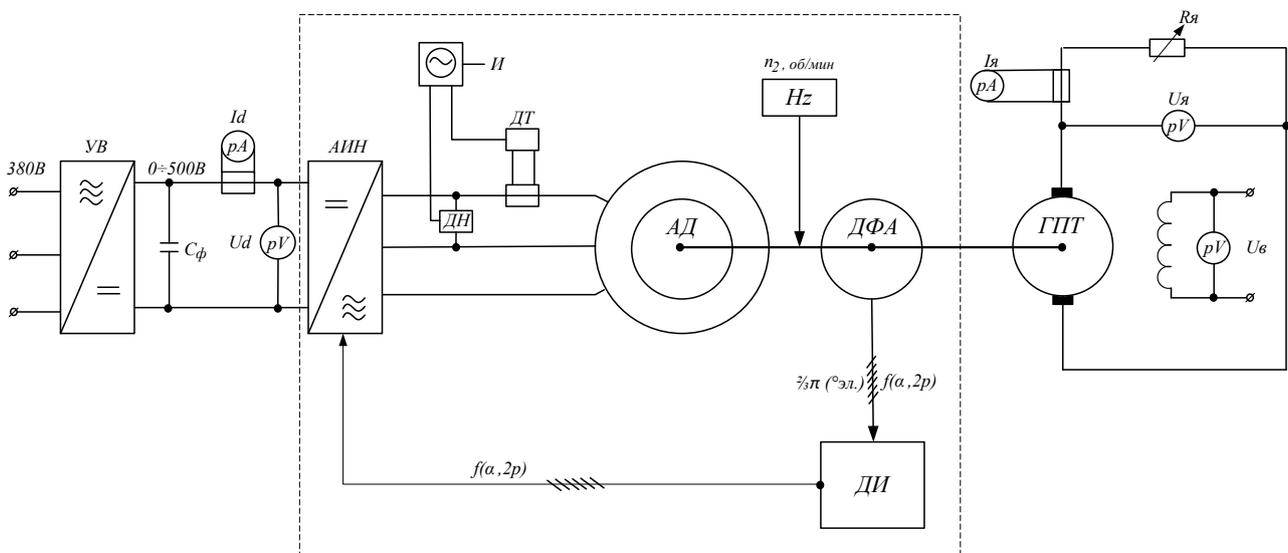


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

Исследование механических и регулировочных свойств привода выполнено на экспериментальном образце в лаборатории университета. Схема экспериментальной установки показана на рис. 4.

Питание автономного инвертора (АИН) осуществляется от трехфазного управляемого выпрямителя (УВ). Нагрузка асинхронного двигателя (АД) обеспечивается генератором постоянного тока с независимым возбуждением (ГПТ)

и может варьироваться изменением сопротивления в обмотке якоря ( $R_{я}$ ). Управление автономным инвертором осуществляется через драйвер импульсов (ДИ) с помощью шестиканального датчика — формирователя алгоритма (ДФА).

Общий вид установки изображен на рис. 5. Тип двигателя АИР 56 А4, номинальное напряжение  $U_{н} = 220$  В (трехфазное, 50 Гц),  $P_2 = 0,12$  кВт,  $n_2 = 1350$  об/мин,  $I_{н} = 0,76$  А — номинальный ток статора, КПД = 63%,  $\cos \varphi = 0,66$ .

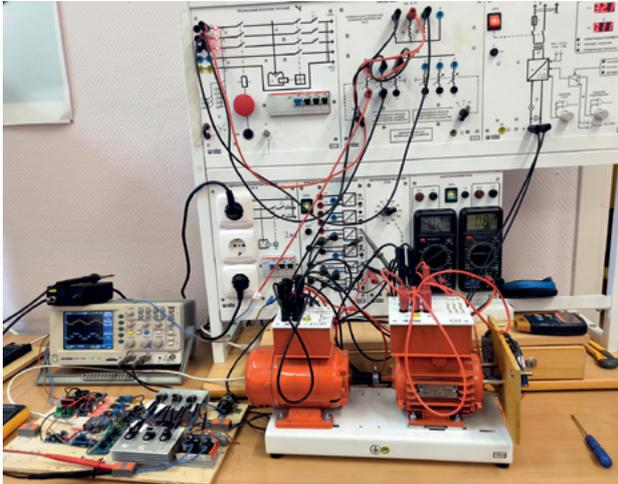


Рис. 5. Общий вид экспериментальной установки

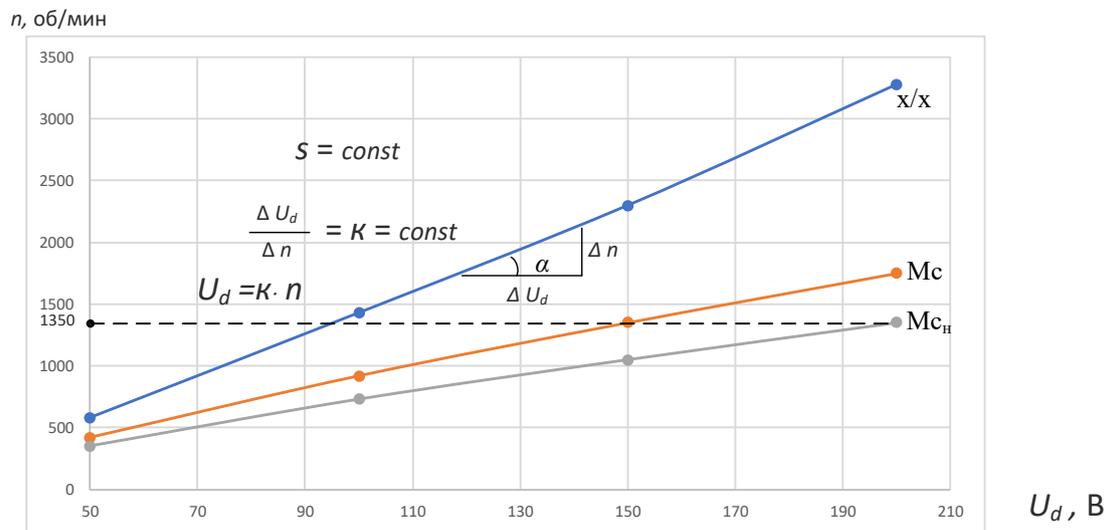
В результате экспериментальных исследований установлено:

1. Регулировочная характеристика (рис. 6, а) зависимости скорости двигателя от напряжения на входе инвертора  $n = f(U_d)$  носит линейный

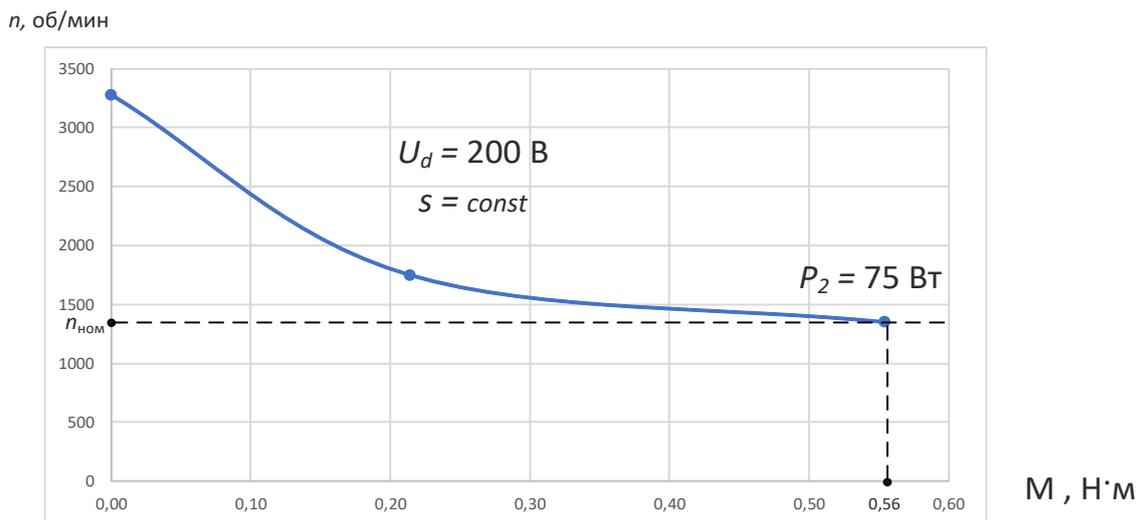
характер, причем отношения  $\frac{U_d}{n_1(f_1)} = k = \text{const}$ ,

где  $k$  — угловой коэффициент, зависящий от нагрузки двигателя. Чем больше нагрузка, тем меньше  $k$ .

2. Анализ механической характеристики  $n = f(M)$ , приведенный на рис. 6, б, показывает,



а



б

Рис. 6. Характеристики привода: а — регулировочная, б — механическая

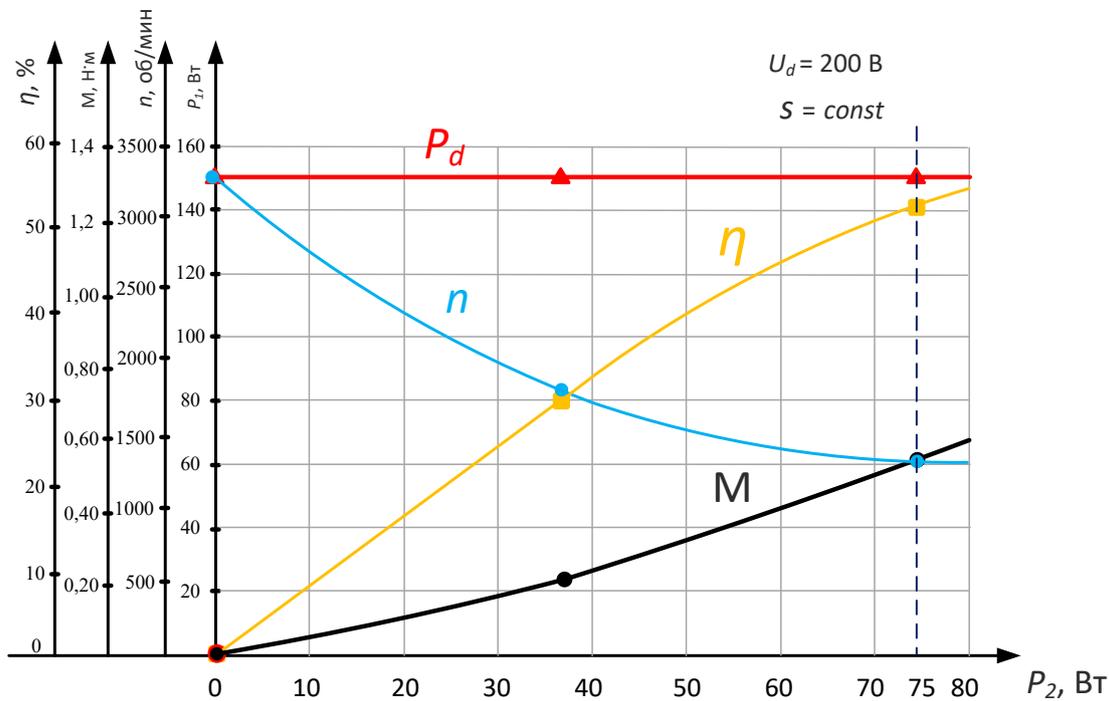


Рис. 7. Рабочие характеристики привода

что с ростом момента скорость двигателя уменьшается, причем на холостом ходу при отсутствии нагрузки скорость двигателя существенно выше номинального значения.

3. На рис. 7 представлены рабочие характеристики зависимостей  $\eta$  (КПД),  $n, M, I_d$  в функции от мощности на валу двигателя  $P_2$ . Из характеристик следует, что при нагрузке двигателя около 70% от номинального значения скорость, ток и момент соответствуют номинальным значениям, в то время как коэффициент полезного действия оказывается ниже на 15%, чем номинальное значение, за счет потерь в выпрямителе и инверторе и потерь от высших гармоник.

4. Таким образом, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в сочетании с датчиком — формирователем алгоритма и автономным инвертором позволяет реализовать способ прямого частотного векторного управления, обладающего регулировочными свойствами бесколлекторного двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением и короткозамкнутым ротором.

В настоящее время в лабораториях университета проводятся работы по дальнейшему изучению свойств электропривода на более мощных машинах с применением имитационного моделирования для последующего сравнения результатов, а также по разработке рекомендаций по управлению данным способом.

#### Список источников

1. Феоктистов В. П. Регулируемый электропривод с полной управляемостью дополнительно экономит электроэнергию / В. П. Феоктистов, Ю. Ю. Цыкунов // Тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию Московского государственного университета путей сообщения. — М.: МИИТ, 1996. — С. 74–75.
2. Backvalov Y. A. Mathematical modelling of electromechanical processes in electric locomotive / Y. A. Backvalov, P. Kolpachyan et al. // Book of abstracts 16th IMACS World Congress on Scientific Computation and Applied Mathematics and Simulation. — Lausanne: IMACS, 2000. — P. 331.

3. Анучин А. С. Система векторного управления асинхронным электроприводом / А. С. Анучин // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: материалы Седьмой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов: в 3 т. — М.: Издательство МЭИ, 2001. — Т. 2. — С. 111.
4. Колпахчян П. Г. Математическая модель электро-механических процессов асинхронного тягового двигателя при питании от инвертора напряжения / П. Г. Колпахчян, А. Г. Никитенко, В. И. Рыжков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 1999. — № 3. — С. 29–32.
5. Хабаров А. И. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод с системой управления переменной структуры: дис. ... канд. наук / А. И. Хабаров. — Екатеринбург, 2020. — 159 с.
6. Забровский В. Д. Разработка концепции и опытного образца оптического энкодера на эффекте муара / В. Д. Забровский, А. Г. Дивин, Д. А. Любимова, В. И. Коновалов и др. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. — 2023. — Т. 29. — № 3. — С. 383–389.
7. Важнов А. И. Электрические машины / А. И. Важнов. — Л.: Энергия, 1968. — 768 с.
8. Марикин А. Н. Устройство для определения углового положения ротора вентильного двигателя: а. с. 1427567 СССР, МКИ Н 03 М 1/26 / А. Н. Марикин, А. Т. Бурков, И. В. Архипова. — 1988. — 5 с.
9. Марикин А. Н. Анализ основных узлов электрооборудования системы частотного регулирования компрессорной станции метрополитена / А. Н. Марикин // Применение полупроводниковой преобразовательной техники в устройствах электрических железных дорог: межвузовский сборник научных трудов. — Л.: ЛИИЖТ, 1985. — С. 25–28.
10. Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи: учебник для вузов железнодорожного транспорта / А. Т. Бурков. — М.: Транспорт, 2001. — 464 с.

Дата поступления: 10.07.2025

Решение о публикации: 18.08.2025

**Контактная информация:**

МАРИКИН Александр Николаевич — д-р техн. наук, проф.; marikin\_s@mail.ru

ЕВСТАФЬЕВ Андрей Михайлович — д-р техн. наук, проф.; evstam@mail.ru

ЖЕМЧУГОВ Валерий Григорьевич — канд. техн. наук, доц.; zhem@mail.ru

ОНОФРИЙЧУК Андрей Дмитриевич — аспирант; 11isov11@gmail.ru

ХВОСТОВА Олеся Владимировна — ст. преподаватель; hvostol@mail.ru

## Vector Control of Asynchronous Motors with an Optronic Sensor Algorithm Generator

A. N. Marikin, A. M. Evstafyev, V. G. Zhemchugov, A. D. Onofriychuk, O. V. Khvostova

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Marikin A. N., Evstafyev A. M., Zhemchugov V. G., Onofriychuk A. D., Khvostova O. V. Vector Control of Asynchronous Motors with an Optronic Sensor Algorithm Generator // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 3, pp. 667–675. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-3-667-675

### Summary

The article discusses the principle of constructing frequency control of an asynchronous motor with a six-channel sensor algorithm generator. **Purpose:** The broad spectrum of benefits offered by an asynchronous electric motor equipped with a closed-loop rotor in conjunction with a frequency converter has resulted in the extensive utilisation of such an electric drive in numerous domains. Concurrently, the technical implementation of automatic frequency converter control systems is challenging, and their financial expense greatly exceeds that of an asynchronous motor. The proposed method for controlling a frequency converter, based on direct vector control from an optronic sensor algorithm generator, allows for a wide range of motor speed control with an optimal ratio of energy and mechanical properties. The sensor's rigid connection to the motor rotor establishes a constant slip, thereby dictating the inverter key's operational algorithm, the frequency at which it operates, and the position of the rotor clutch-flow vector relative to the clutch-flow vector of the stator winding across the entire control range. **Methods:** A series of experimental studies have been conducted on a laboratory installation, and operational, mechanical, and control characteristics have been obtained. **Results:** The investigation has revealed a linear relationship between the motor speed and the voltage input to the inverter, whereby an increase in torque resulted in a decrease in motor speed. Additionally, in the absence of load and at idle, the motor speed has been found to exceed the nominal value by a significant margin. At a motor load of approximately 70% of the rated value, the speed, current and torque correspond to the rated values. However, the efficiency is 15% lower than the rated value, due to losses in the rectifier and inverter, and higher harmonics. **Practical significance:** The research has confirmed the operability of the proposed method over a wide range of speeds and loads, and it will be important for evaluating the applicability of the control method in a power electric drive.

**Keywords:** Asynchronous electric drive, control system, six-channel sensor algorithm generator, electromechanical characteristics, experimental research.

### References

1. Feoktistov V. P., Tsykunov Yu. Yu. Reguliruemyy elektroprivod s polnoy upravlyaemost'yu dopolnitel'no ekonomit elektroenergiyu [Controllable electric drive with full controllability additionally saves electricity]. *Tezisy dokladov IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Abstracts of reports of the IV International Scientific and Technical Conference dedicated to

the 100th anniversary of the Moscow State Transport University]. Moscow: MIIT Publ., 1996, pp. 74–75. (In Russian)

2. Backvalov Y. A., Kolpachyan P. et al. Mathematical modelling of electromechanical processes in electric locomotive. Book of abstracts 16th IMACS World Congress on Scientific Computation and Applied Mathematics and Simulation. Lausanne: IMACS, 2000, p. 331.

3. Anuchin A. S. Sistema vektornogo upravleniya asinkhronnym elektroprivodom [Vector control system for

asynchronous electric drive]. *Radioelektronika, Elektrotehnika i Energetika: materialy Sed'moy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov* [Radioelectronics, Electrical Engineering and Power Engineering: Proceedings of the Seventh International Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates]. Moscow: MEI Publ., 2001, vol. 2, p. 111. (In Russian)

4. Kolpakhchyan P. G., Nikitenko A. G., Ryzhkov V. I. Matematicheskaya model' elektromekhanicheskikh protsessov asinkhronnogo tyagovogo dvigatelya pri pitanii ot invertora napryazheniya [Mathematical model of electromechanical processes of an asynchronous traction motor when powered by a voltage inverter]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Electromechanics]. 1999, Iss. 3, pp. 29–32. (In Russian)

5. Khabarov A. I. *Asinkhronnyy chastotno-reguliruemyy elektroprivod s sistemoy upravleniya peremennoy struktury: dis. ... kand. nauk* [Asynchronous frequency-controlled electric drive with a variable structure control system: PhD thesis]. Ekaterinburg, 2020, 159 p. (In Russian)

6. Zabrovskiy V. D., Divin A. G., Lyubimova D. A., Konovalov V. I. et al. Razrabotka kontseptsii i opytnogo obraztsa opticheskogo enkodera na effekte muara [Development of the concept and prototype of an optical encoder based on the moire effect]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tambov State Technical University]. 2023, vol. 29, Iss. 3, pp. 383–389. (In Russian)

7. Vazhnov A. I. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Leningrad: Energiya Publ., 1968, 768 p. (In Russian)

8. Marikin A. N., Burkov A. T., Arkhipova I. V. *Ustroystvo dlya opredeleniya uglovogo polozheniya rotora*

*ventil'nogo dvigatelya: a. s. 1427567 SSSR, MKI N 03 M 1/26* [Device for determining the angular position of the rotor of a commutator motor: a.s. 1427567 USSR, MKI N 03 M 1/26]. 1988, 5 p. (In Russian)

9. Marikin A. N. Analiz osnovnykh uzlov elektrooborudovaniya sistemy chastotnogo regulirovaniya kompressornoy stantsii metropolitena [Analysis of the main components of electrical equipment of the frequency control system of the metro compressor station]. *Primenenie poluprovodnikovoy preobrazovatel'noy tekhniki v ustroystvakh elektricheskikh zheleznykh dorog* [Application of semiconductor conversion technology in electric railway devices: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov Interuniversity collection of scientific papers]. Leningrad: LIITZhT Publ., 1985, pp. 25–28. (In Russian)

10. Burkov A. T. *Elektronnaya tekhnika i preobrazovateli: uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta* [Electronic engineering and converters: textbook for railway transport universities]. Moscow: Transport Publ., 2001, 464 p. (In Russian)

Received: July 10, 2025

Accepted: August 18, 2025

#### Author's information:

Alexandr N. MARIKIN — PhD in Engineering, Professor; marikin\_s@mail.ru

Andrey M. EVSTAFYEV — PhD in Engineering, Professor; evstam@mail.ru

Valeriy G. ZHEMCHUGOV — PhD in Engineering, Associate Professor; zhem@mail.ru

Andrey D. ONOFRYICHUK — Postgraduate Student; 11lisov11@gmail.ru

Olesya V. HVOSTOVA — Senior Lecturer; hvostol@mail.ru