

## BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTORS WITH PERMANENT MAGNETS FOR MARINE ELECTRIC DRIVE SYSTEMS: STATE AND PROSPECTS

**V. E. Vysotsky**

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

*The main trends in the development of designs, power semiconductor circuits and control systems of promising valve electromechanical converters — brushless DC motors with permanent magnets for marine electric drive and automation equipment, are discussed in the paper. A variant of their implementation in an adjustable electric drive is presented. The object of the study is a brushless direct current electromechanical system, including a synchronous machine with magnetolectric excitation, covered by positional feedback through a dependent controlled valve switch, and the subject is structures, the circuit of the power part, control systems, the algorithm of functioning and characteristics. The purpose of the research is to evaluate the operational features, properties and possibilities of introducing brushless direct current motors with permanent magnets as marine electric drive systems of low and medium power. The results of research and development are embodied in experimental industrial samples. A variant with microprocessor control has been developed for marine electric drive systems. The switch is assembled on transistor switches that provide high reliability and enhance the functionality of the control system. The minimum necessary system of logical variables, ensuring the implementation of rational laws of switching and speed control, has been formed. Operational characteristics at various leading angles of switching on the switch valves are presented. The presence of pole shoes at the poles introduces significant features in the patterns of their change. The main advantages and features of the proposed design and circuit solutions are formulated in the conclusions. It is indicated that valve motors with excitation from permanent magnets are the most promising solution in terms of integrating an electromechanical converter into an adjustable marine electric drive of a range of small and medium capacities. Engines of this type are structurally simple and reliable, have rigid natural mechanical characteristics, do not require energy for excitation, have a large overload capacity and high speed in transients. Their distinctive feature is the high specific moment.*

*Keywords: brushless DC motor, magnets, rotor “asterisk”, switchboard, positional control, microcontroller, algorithm, characteristics, regulation.*

**For citation:**

Vysotsky, Vitaly E. “Brushless direct current motors with permanent magnets for marine electric drive systems: state and prospects.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiralа S. O. Makarova* 15.3 (2023): 476–489. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-476-489.

**УДК 621.313.333.077.03**

## ВЕНТИЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ В СИСТЕМАХ СУДОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

**В. Е. Высоцкий**

Севастопольский государственный университет, Севастополь, Российская Федерация

*В статье рассматриваются основные тенденции развития конструкций, силовых полупроводниковых схем и систем управления перспективных вентильных электромеханических преобразователей — вентильных двигателей с постоянными магнитами для судового электропривода и средств автоматизации. Представлен вариант их реализации в регулируемом электроприводе. Объектом исследования является вентильная электро-механическая система, включающая синхронную машину с магнитоэлектрическим возбуждением, охваченную позиционной обратной связью через зависимый управляемый вентильный коммутатор, предметом — конструкции, схема силовой части, системы управления, алгоритм функционирования и характеристики. Целью исследований является оценка эксплуатационных особенностей, свойств и возможностей внедрения вентильных двигателей с постоянными магнитами в качестве судовых электроприводных систем малой и средней мощности. Результаты исследований и разработок воплощены в опытно-промышленных образцах.*

Для систем судового электропривода разработан вариант с микропроцессорным управлением. Коммутатор собран на транзисторных ключах, обеспечивающих высокую надежность и повышающих функциональные возможности системы управления. Сформирована минимально необходимая система логических переменных, обеспечивающая реализацию рациональных законов коммутации и регулирования частоты вращения. Представлены эксплуатационные характеристики при различных опережающих углах включения вентилей коммутатора. Наличие полюсных бабмаков на полюсах вносит существенные особенности в закономерности их изменения. В выводах сформулированы основные преимущества и особенности предложенных в работе конструктивных и схемных решений. Отмечается, что вентильные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов являются наиболее перспективными в плане интеграции электромеханического преобразователя в регулируемый судового электропривод диапазона малых и средних мощностей. Двигатели такого типа конструктивно просты и надежны, имеют жесткие естественные механические характеристики, не требуют затрат энергии на возбуждение, обладают большой перегрузочной способностью и высоким быстродействием в переходных процессах, их отличительной особенностью является высокий удельный момент.

Ключевые слова: вентильный двигатель, магниты, ротор «звездочка», коммутатор, позиционное управление, микроконтроллер, алгоритм, характеристики, регулирование.

**Для цитирования:**

Высоцкий В. Е. Вентильные двигатели с постоянными магнитами в системах судового электропривода: состояние и перспективы / В. Е. Высоцкий // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 476–489. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-476-489.

**Введение (Introduction)**

Вентильные двигатели с постоянными магнитами (ВДПМ) как органичное объединение бесколлекторного электромеханического и позиционно управляемого вентильного преобразователей развивались прежде всего для электропривода в машиностроении и систем промышленной автоматики, однако они оказались востребованными и в корабельном электрооборудовании. Проведение обобщенных экспертных оценок (табл. 1) корабельных электроприводов [1] позволило выявить преимущество вентильно-индукторных двигателей (ВИД) и ВДПМ по сравнению с двигателями постоянного тока (ДПТ) и асинхронными двигателями (АД), причем в отношении показателей качества электромеханического преобразования энергии: пульсаций частоты вращения и момента, они имеют преимущество.

Таблица 1

**Экспертная оценка качества электроприводов с различными типами двигателей**

Элементы электромеханической системы	ДПТ	АД	ВДПМ	ВИД
Конструкция двигателя	Низкая	Высокая	Низкая	Высокая
Управляемый вентильный преобразователь	Высокая	Низкая	Низкая	Средняя
Система управления	Высокая	Низкая	Средняя	Средняя
Динамика	Низкая	Средняя	Высокая	Высокая
Стоимость	Низкая	Средняя	Низкая	Высокая
Тепловое состояние ротора	Низкая	Низкая	Высокая	Высокая
Регулирование ослаблением поля	Низкая	Высокая	Низкая	Высокая
Пульсации частоты вращения и момента	Высокая	Средняя	Высокая	Низкая
Электромагнитная совместимость	Высокая	Низкая	Высокая	Средняя
Эксплуатационные качества	Низкая	Высокая	Средняя	Высокая
Надежность	Низкая	Средняя	Средняя	Высокая

Заниженные оценки ВДПМ обусловлены высокой стоимостью редкоземельных постоянных магнитов (РЗМ) и технологическими трудностями их изготовления. В отношении конструкции, связанной с наличием датчика положения ротора, следует отметить развитие в течение последних 10–15 лет ведущими производителями комплектных электроприводов с вентильными двигателями, так называемых *бездатчиковых систем*, когда идентификация положения ротора заменяется управлением по полю и обобщенному вектору напряжения [2], что позволяет существенно повысить надежность и отказоустойчивость таких управляемых вентильных электромеханических комплексов.

Анализ достижений в этой области электромеханики показал, что во ВНИПТИЭМ (г. Владимир) разработана и освоена серия вентильных двигателей  $V/D$  мощностью 0,5–20 кВт, изготавливаемых на базе синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ) со встроенными датчиками положения ротора, скорости и тормозом [3]. С начала 2000-х гг. во ВНИИР (г. Чебоксары) разработан и налажен промышленный выпуск новой серии вентильных двигателей 5ДВМ с возбуждением от постоянных магнитов с улучшенными весогабаритными и эксплуатационными характеристиками [4]. В ОАО «Электропривод» (г. Киров) освоены в производстве ВДПМ со встроенными датчиками положения ротора, тахометрическими датчиками и магнитоэлектрическими тормозами для исполнительных механизмов универсальных технологических роботов и другого прецизионного металлообрабатывающего оборудования. Многополюсная сборная магнитная система ВДПМ серии ДВМ выполнена на постоянных магнитах Nd-Fe-B, пределы максимальных частот вращения которых составляют: 2000–6000 об/мин для ДВМ72–1–1,6; 1000–3000 об/мин для ДВМ115–ДВМ142; 3000 об/мин — для ДВМ192, а диапазоны моментов, соответственно, 0–1,1 Н·м; 0–18 Н·м; 0,2–36 Н·м. При этом диапазон мощности составляет 0,69–11,3 кВт [5]. Работы по оптимизации динамических, энергетических и массогабаритных показателей продолжаются на ОАО «Лепсе» (г. Киров) [6].

Двигатели с индуктором на РЗМ имеют следующие преимущества: повышение удельных показателей активных частей более чем в 3–3,5 раза, двигателя в целом — более чем в 2 раза; существенное увеличение устойчивости против размагничивающего действия реакции якоря; увеличение быстродействия за счет уменьшения момента инерции ротора почти в 5–6 раз. Кроме того, по удельному моменту ВДПМ нет равных среди других двигателей. Максимальная сила, снимаемая с единицы поверхности рашетки статора, достигает 10 Н·м/см<sup>2</sup>. Увеличение удельных показателей ВДПМ возможно не только за счет повышения энергии ПМ, но и концентрации магнитного потока [7], [8].

Стоимость ПМ составляет более 30 % стоимости ВДПМ, поэтому вопросы их оптимального использования по массе и объему имеют решающее значение. Поиск рациональных конструктивных решений по роторам и возможностей их эффективного использования в ВДПМ малой и средней мощности продолжается до настоящего времени [9]–[12]. Указанные тенденции можно спроецировать также на системы судового электропривода и автоматики. Наиболее перспективными областями применения ВДПМ являются авторулевые комплексы и подруливающие устройства, антенные и навигационные системы, вспомогательные судовые электроприводы.

Целью исследований является оценка эксплуатационных особенностей, свойств, а также возможностей внедрения ВДПМ в судовых системах электропривода и автоматики малой и средней мощности.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Для ВДПМ данного исследования были разработаны и оптимизированы по массогабаритам два перспективных типогабарита конструкции ВДПМ. Один из них — ВДПМ с ротором типа «звездочка» без полюсных башмаков — ВДПМ-1 (рис. 1 и 2) — относится к первой группе магнитных систем.

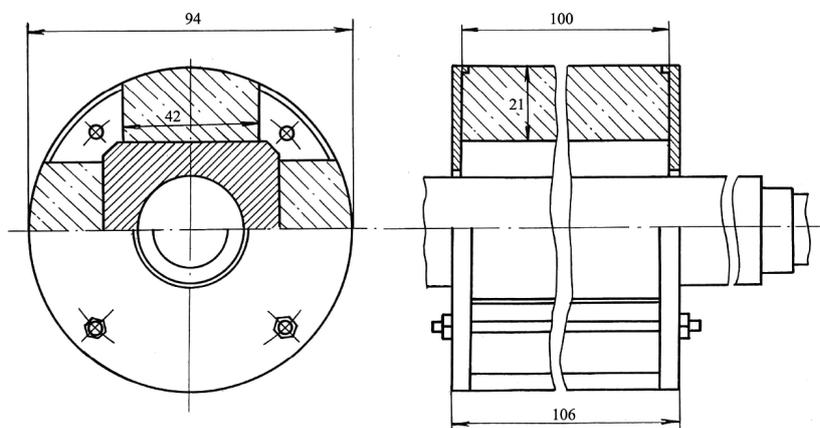


Рис. 1. Конструкция ротора ВД типа «звездочка» без полюсных башмаков

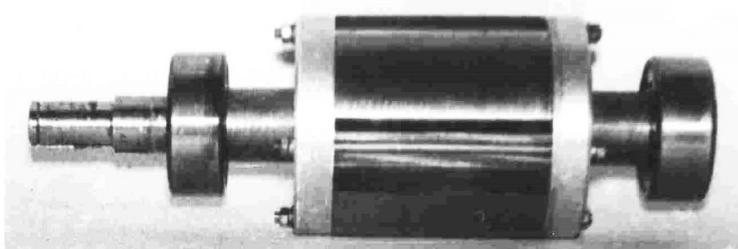


Рис. 2. Ротор опытного образца ВДПМ-1

Ротор другого типогабарита ВДПМ-2 относится ко второй группе магнитных систем — ротору типа «звездочка» с полюсными наконечниками (рис. 3 и 4).

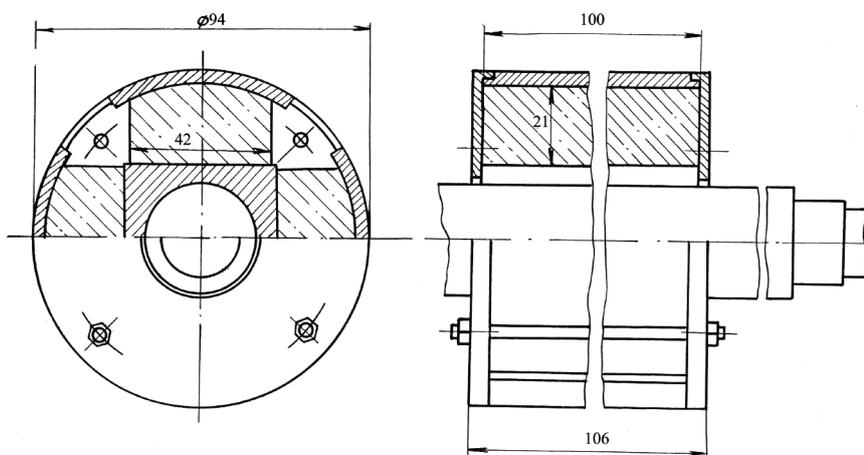


Рис. 3. Конструкция ротора ВД типа «звездочка» с полюсными башмаками

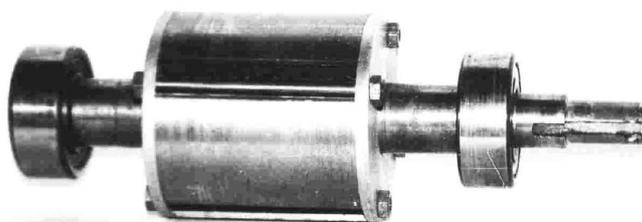


Рис. 4. Ротор опытного образца ВДПМ-2

В конструкции индуктора, как в первом, так и втором случае, использованы магниты ЮНДК35Т5БА. В перспективе предполагается использовать магниты из сплава Nd-Fe-B, что позволит улучшить удельные массогабаритные показатели. Причем конструктивные параметры роторов были выбраны таким образом, что первый и второй образцы имеют одинаковые габаритно-присоединительные размеры, высоты, объемы магнитов, а следовательно, равные по величине моменты инерции (табл. 2).

Таблица 2

Основные технические данные опытных образцов ВДПМ

Параметр	$P_{н}$ , кВт	Напряжение на входе УВК $U_a$ , В	Ток на входе УВК $I_a$ , А	$n$ , об/мин	$m$	$2p$	$\eta$ , о.е.	$r_{\Phi}$ , Ом	$L_q/L_d$	$\alpha_p$
ВДПМ-1	1,2	300	5,4	1500	3	4	0,74	0,92	1	0,59
ВДПМ-2	1,16	300	5,4	1500	3	4	0,72	0,92	2,15	0,75

Данный подход позволил провести испытание с одним статором и выявить влияние именно конструктивных особенностей и электромагнитных параметров на закономерности изменения характеристики ВДПМ-1 и ВДПМ-2 в установившихся и переходных режимах. Для систем судового электропривода специального назначения разработан ВДПМ с микропроцессорным управлением. Система управления обеспечивает создание системы периодических фазных напряжений  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$ , сдвинутых относительно друг друга на угол  $2\pi/3$ , пуск, регулирование частоты вращения, реверсирование и торможение двигателя, а также защиту в аварийных режимах.

Датчики положения ротора (ДПР) расположены на специальном кронштейне (траверсе), укрепленном на подшипниковом щите. В качестве ДПР использованы датчики Холла стандартного интегрального исполнения, широко применяемые в системах электронной автоматики и электрооборудования автомобилей. Магнитоуправляемая интегральная микросхема конструктивно и технологически выполнена таким образом, что включает основной элемент — датчик Холла (ДХ) и преобразовательную схему с усилителем  $У$ , пороговым элементом  $ST$ , выходным каскадом  $VT$  и стабилизатором напряжения  $CT$  (рис. 5). Путем изменения индукции магнитного поля от 0 до  $B_{max}$  с помощью магнитного экрана (сигнального диска) на выходе магнитоуправляемой интегральной микросхемы датчиков (ДПР1–ДПР3) обеспечивается дискретный управляющий сигнал, для усиления которого используются усилители сигналов датчиков, расположенные конструктивно в блоке системы управления вентильным коммутатором (УВК).

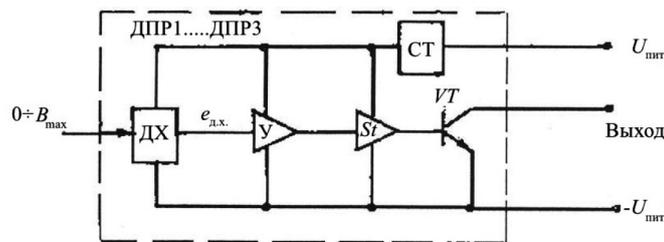


Рис. 5. Датчик положения ротора

Сигнальный сектор, находящийся на роторе и жестко связанный с валом электромеханического преобразователя ВДПМ, выполнен из магнитопроводящего материала (сталь 30ХГСА) и содержит число сигнальных элементов, равное числу пар полюсов, т. е. в данном случае равное двум ( $2p = 4$ ).

Для формирования импульсов управления длительность импульсов с ДПР1–ДПР3 должна составлять 180 эл. град., поэтому угловой размер сегмента составляет  $90^\circ$ . При нахождении сигнальных секторов (сегментов) в зазоре между магнитоуправляемой схемой и магнитом происходит периодическое шунтирование магнитного потока, и на выходе ДПР формируется сигнал об угловом положении ротора, при этом фронт сигнала практически не зависит от частоты вращения сегментов.

Усиленные сигналы с датчиков, подаваемые на входы порта микроконтроллера (три канала захвата-сравнения), используются для формирования сигналов позиционной коммутации (рис. 6). Для управления ВДПМ использован микроконтроллер  $MC8 \times C196MD$  (МК), функции которого программируются пользователем. Наличие встроенного многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) позволяет вводить в систему управления сигналы обратных связей с аналоговых датчиков тока (ДТ), напряжения (ДН) и в случае необходимости температуры. В качестве входной информации МК используются сигналы, подаваемые на четыре схемы захвата, одна из которых необходима для работы УИПТ с целью синхронизации с напряжением сети, а три других — для синхронизации с положением ротора. Встроенный АЦП используется для приема информации о требуемом угле опережения (запаздывания) включения вентилей УВК  $\beta_0$  и требуемом напряжении  $U_{пит}$  на входе коммутатора. Напряжение задания для создания задержки импульсов управления (регулирования угла) поступает на один из входов АЦП. Кроме того, задействованы два цифровых порта, один из них принимает информацию о направлении вращения, другой — информацию об останове ВДПМ.

Управляющие воздействия с МК через восемь каналов подаются на устройства управления — драйверы (УД) управляемого источника постоянного тока (УИПТ) и УВК. По двум каналам осуществляется управление УИПТ, по шести — управление ключами УВК. В частности, сигналы управления с порта управления МК подаются на вход УВК через УД. Блоки драйверов показаны на рис. 6. Драйверы представляют собой предвыходные каскады, собранные на таймерах КР106ВИ1, к которым подается двухполярное питание. Их входы электрически развязаны с блоками системы управления благодаря применению оптронной схемы на транзисторе, представляющем собой комбинацию светодиод-фототранзистор. Выход каждого таймера КР106ВИ1 соединен с двухтактным усилителем-повторителем.

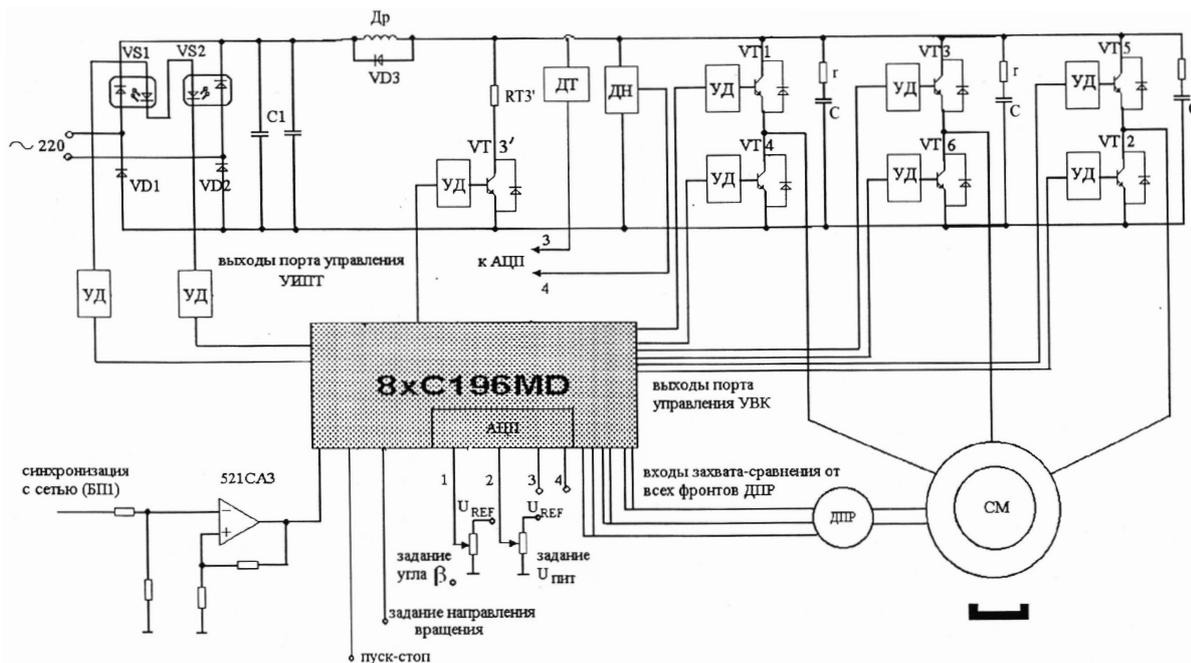


Рис. 6. Схема формирования сигналов позиционной коммутации

Коммутатор собран на транзисторных ключах, обеспечивающих высокую надежность и повышающих функциональные возможности системы управления ВДПМ. УВК или инвертор представляет собой трехфазную мостовую схему (см. рис. 6), собранную на шести интегральных транзисторных модулях  $VT1-VT6$  типа МТКД-40-7. Применяемые модули, выполненные по дарлингтоновским схемам со встроенным диодом обратного моста, имеют большой коэффициент усиления ( $K_y \leq 50$ ). Это позволяет упростить схему предварительного усиления. Для надежного включения таких транзисторов базовый ток, который должен составлять порядка 0,7–1,0 А, поступает через один из транзисторов окончного каскада драйвера. В режиме «отсечки» на базы  $VT1-VT6$  подается отрицательный потенциал –5 В для надежного их запираения через другой транзистор каскада (см. рис. 6).

Однофазный полууправляемый мостовой выпрямитель (УИПТ) собран на силовых диодах  $VD1, VD2$  и оптронных тиристорах  $VS1$  и  $VS2$ , управляемых через драйверы УД от МК в соответствии с сигналом синхронизации от сети (блока питания БП1) — через каскад 521СА3. При включении двигателя напряжение на выходе УИПТ плавно увеличивается, обеспечивая при этом необходимый пусковой ток и момент для разгона двигателя. В аварийных режимах и при КЗ в двигателе или УВК сигнал с датчика тока (ДТ) включает через драйвер ключ  $VT3'$ , шунтируя питание УВК, благодаря чему ток КЗ не допускает опасных для транзисторов величин. Для ограничения скорости нарастания тока применен воздушный дроссель Др., зашунтированный диодом  $VD3$ . Одновременно с включением  $VT3'$  снимаются управляющие сигналы с  $VS1, VS2$  и напряжение на выходе УИПТ уменьшается до нуля за время, соответствующее постоянной времени разряда конденсатора  $C1$ .

## Результаты (Results)

Сформирована минимально необходимая система логических переменных, обеспечивающая реализацию рациональных законов коммутации, использованы основные соотношения, лежащие в основе микропроцессорного управления ВДПМ при регулировании частоты вращения за счет изменения напряжения на входе УИПТ. Минимально необходимое число логических переменных, которое может обеспечить управление ВДПМ, равно пяти: две переменные для управления направлением вращения и синхронизации с сетью и три переменные для формирования сигналов, сдвинутых между собой на угол  $2\pi/3$ .

Направление вращения двигателя определяется полярностью напряжения, прикладываемого к обмотке якоря (ОЯ), и зависит от знака кода управления. Среднее значение частоты вращения двигателя при питании от УИПТ определяется временным интервалом, в течение которого на одном полупериоде напряжения сети либо прикладывается напряжение к ОЯ, либо осуществляется динамическое торможение.

При использовании датчиков Холла для оценки положения ротора двигателя сигналы с датчиков положения ротора вводятся в микроконтроллер на входы модулей захвата процессоров событий (порт 2). Обработка двигателем каждого целого шага идентифицируется процессором событий (ЕРА). Прерывание, возникающее на каждом захвате фронта сигнала с датчика, используется для оценки времени между двумя соседними переключениями.

В качестве главных входных сигналов для оперативного управления ВДПМ используются: ток на входе УВК, напряжение звена постоянного тока, сигналы, управляющие углом опережения (запаздывания) включения вентилей УВК  $\beta_0$  и напряжением на входе УВК. Все эти сигналы принимаются через модуль аналого-цифрового преобразователя АЦП (каналы 1–4 на рис. 6).

Идентификация начального состояния датчиков положения и ключей УВК, осуществляемая путем чтения кодов состояния ДПР, кода направления вращения, определяется из таблицы состояния ключей [13], а затем выдается на схемы в виде кода состояния. Программное обеспечение состоит из основной программы (рис. 7), подпрограммы обработки прерываний от захвата фронта сигнала синхронизации с сетью (рис. 8, а), подпрограммы обработки прерываний от таймера  $T1$  (рис. 8, б) подпрограммы обработки прерываний от захвата фронтов датчиков положения ротора (рис. 8, в), подпрограммы обработки прерываний от таймера  $T2$  (рис. 8, г).

Основная программа предназначена для инициализации встроенных в микроконтроллер внешних устройств, таких как АЦП, цифровых портов, схем захвата фронтов сигнала, таймеров, а также для настройки всех прерываний. Большой цикл завершается проверкой необходимости останова ВДПМ. Если такой останов необходим, то осуществляется запрет всех прерываний и перевод всех выходов, управляющих силовым вентильным блоком (УИПТ и УВК), в неактивное состояние. Соответствующие ключи при этом закрываются.

Подпрограммы обработки прерываний по своему функциональному назначению разделены на два блока. Первый блок подпрограмм используется для управления УИПТ, второй — для управления УВК. Синхронизация с сетью осуществляется подпрограммой обработки прерываний, вызываемой фронтом сигнала от сформированных сетевых импульсов, выполняющей следующие функции:

- загрузка в таймер  $T1$  кода длительности, пропорционального необходимой задержке для обеспечения заданного напряжения в звене постоянного тока ( $U_{\text{пнт}}$ );
- запуск таймера  $T1$ , который при своем переполнении будет вызывать соответствующее прерывание;
- перенастройка схемы захвата на захват противоположного фронта;
- установка номера активного ключа;
- разрешение на выход из этой подпрограммы, прерывание от таймера.

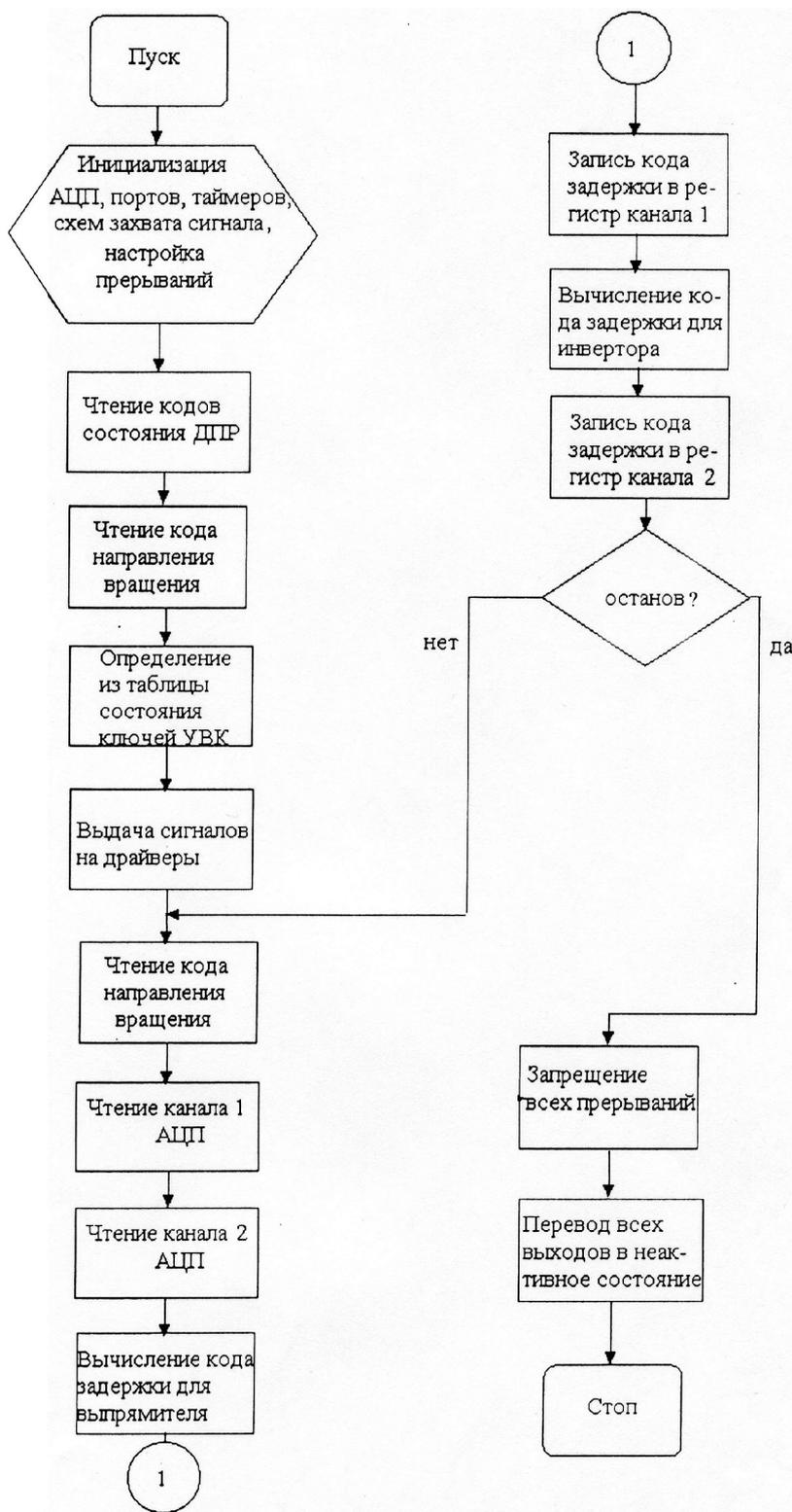


Рис. 7. Алгоритм управления микроконтроллером

Вторая подпрограмма из этого блока, вызываемая переполнением таймера  $T1$ , служит для выдачи управляющего сигнала на требуемый ключ УИПТ и по выходу запрещает прерывание от таймера  $T1$ . Таким образом, первый блок программ обеспечивает выдачу импульса на ключи УИПТ в соответствии с требуемым напряжением на выходе. Второй блок подпрограмм служит для управления УВК.

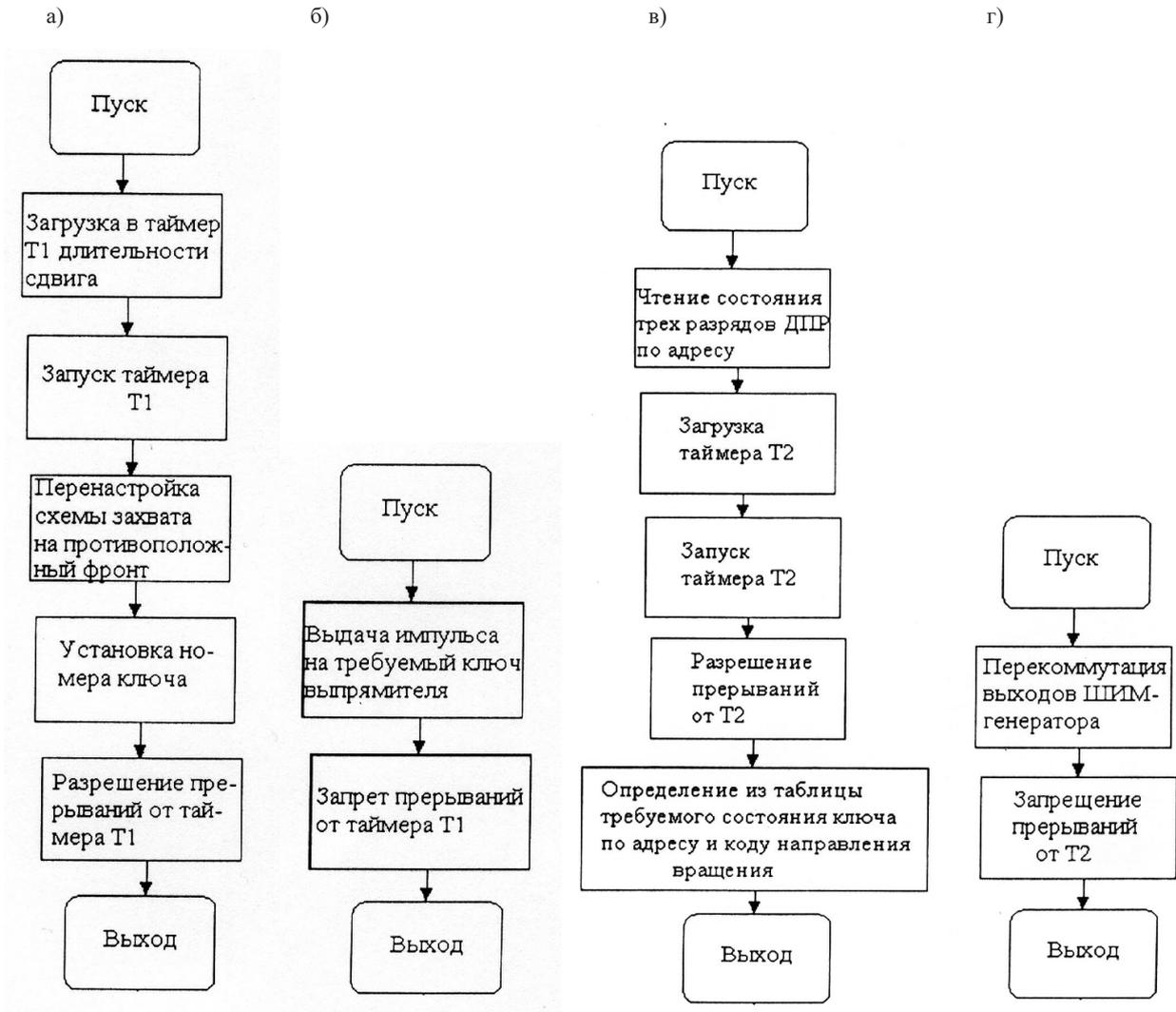


Рис. 8. Алгоритмы работы подпрограмм, вызываемых фронтом от сети для УИПТ (а) и переключением таймера  $T1$  (б), прерывания захвата обоих фронтов ДПР (в) и обработки прерываний от таймера  $T2$  (г)

Внешние временные события определяются сигналами ДПР (три временных последовательности импульсов длительностью 180 эл. град., сдвинутых друг относительно друга на 120 эл. град.). Каждый фронт-спад захватывается схемами захвата  $EPA$  (процессорами событий), при этом вызываются подпрограммы обработки прерываний от указанных фронтов.

Для правильного включения ключей УВК, на основании ранее прочитанного состояния ДПР с использованием таблиц, осуществляется определение требуемого состояния ключей на данном такте работы УВК. Каждому направлению вращения соответствует своя таблица. После того как таймер отсчитает требуемое время задержки, соответствующее углу опережения (запаздывания) включения вентилей УВК  $\beta_0$ , вызывается подпрограмма обработки прерываний от  $T2$ , осуществляющая непосредственную выдачу на драйверы сигналов для включения-отключения ключей УВК. Перед окончанием работы подпрограммой осуществляется запрещение прерываний от  $T2$  и возврат в основную программу.

При превышении тока инвертора (УВК) некоторого заданного значения осуществляется аппаратный вызов прерывания от АЦП (именно АЦП осуществляет измерение тока), и процессор переходит на программу обработки прерывания, задачей которой является определение степени сложности аварийной ситуации. В зависимости от этого либо осуществляется аварийное отключение инвертора, либо уменьшается напряжение УИПТ для снижения тока.

Для обеспечения защиты используется режим АЦП, при котором осуществляется прерывание при превышении сигналом заранее заданного уровня, равного 2,5 В, соответствующего току, при котором необходимо отключение ВДПМ, причем сигналы задания, пропорциональные углу  $\beta_0$  и частоте вращения (или  $U_{\text{пит}}$ ), должны сохраняться как в обычном режиме. Для этого в момент времени  $t_b$ , когда нужно читать эти сигналы, в подпрограмму следует добавлять команды перенастройки АЦП в штатный режим, а после преобразования добавлять команды, возвращающие АЦП в режим превышения сигнала. Таким образом, АЦП постоянно находится в режиме превышения сигнала, кроме моментов времени, когда необходимо чтение информации об угле опережения (запаздывания)  $\beta_0$  или уровне напряжения питания  $U_{\text{пит}}$ .

### Обсуждение (Discussion)

Для ВДПМ-1 величина индуктивного сопротивления не зависит от угла поворота — в любом положении ротора выполняется соотношение  $L_q/L_d = 1$ . Для образца ВДПМ-2 значение поперечной индуктивности  $L_q = 13 \cdot 10^{-3}$  Гн, тогда как значение продольной индуктивности гораздо меньше —  $L_d = 6 \cdot 10^{-3}$  Гн. Очевидно, что в последнем случае значительная часть поперечного потока замыкается через воздушный зазор и полюсные башмаки. Закон изменения индуктивности якорной обмотки близок к трапецеидальному, но при этом она изменяется с двойной частотой относительно угла поворота ротора. На рис. 9 приведены характеристики для ВДПМ — 1, на рис. 10 — для ВДПМ-2 при опережающих углах включения вентилях  $\beta_0 = -10$  эл. град. Наличие полюсных башмаков вносит некоторые особенности в закономерности изменения рабочих характеристик, приводя к возрастанию индуктивного сопротивления рассеяния  $X_s$  и появлению дополнительного потока рассеяния  $\Phi_s$ .

Изменение индуктивности якорной обмотки на интервале повторяемости влечет за собой ухудшение гармонического состава тока и, как следствие, увеличение потерь в машине. Все это приводит к некоторому снижению КПД и полезной мощности  $P_2$  на валу у образца ВДПМ-2. В то же время увеличение  $X_s$  ведет к снижению тока КЗ. В этом случае полюсные наконечники выполняют функцию демпфера потока КЗ, предохраняя магниты от размагничивания. Вследствие появления дополнительных потоков рассеяния и пульсаций тока двигателя за счет изменения индуктивности якорной обмотки момент, развиваемый образцом ВДПМ-2, оказывается несколько меньше, чем у ВДПМ-1 (рис. 9).

Пунктирными линиями показаны характеристики, рассчитанные с использованием аппроксимации закона распределения индукции в воздушном зазоре. Электромагнитный момент ВДПМ определен по выражению для трех гармонических составляющих пространственного распределения магнитного поля.

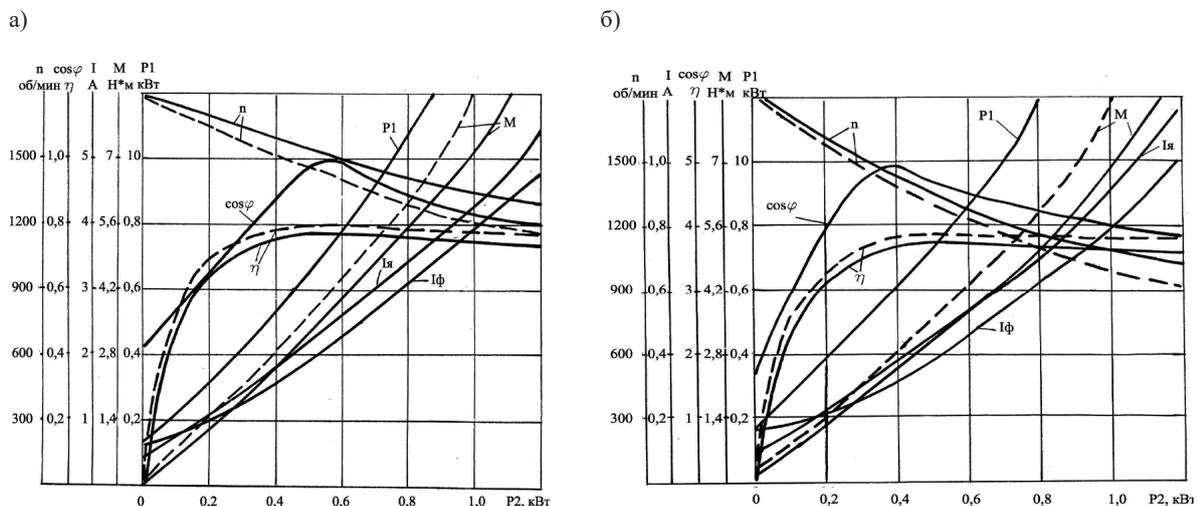


Рис. 9. Рабочие характеристики опытных образцов ВДПМ-1 (а) и ВДПМ-2 (б) при  $\beta_0 = -10$  эл. град.

Следует отметить, что выполненное ранее сравнение образцов по  $P_2$  и  $M$  справедливо лишь в том случае, если ротор намагничен в статоре машины либо магниты стабилизированы до одинакового состояния, что может осуществляться различными по величине токами КЗ. В другом состоянии образец ВДПМ-2 (рис. 10) развивает несколько большую полезную мощность на валу и момент  $M$ .

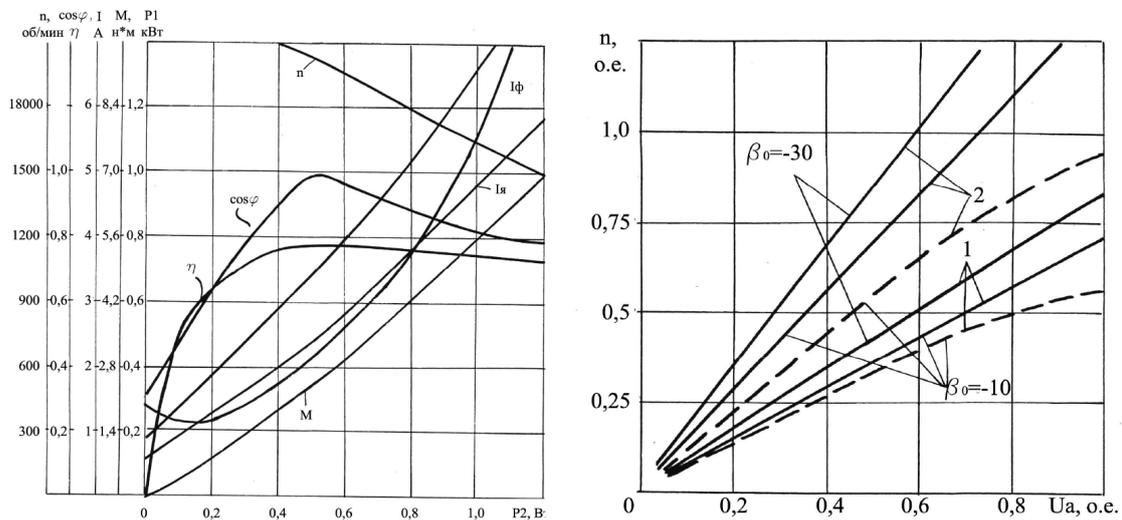


Рис. 10. Рабочие характеристики опытного образца ВДПМ-2 при  $\beta_0 = -20$  эл. град и регулировочные характеристики ВДПМ при прямоугольной ШИМ фазных напряжений УВК для различных углов управления: — — при холостом ходе; - - - - — при нагрузке

При стабилизации индукторов воздухом прямая возврата на диаграмме постоянного магнита у двигателей без полюсных наконечников находится несколько ниже, чем у ротора с полюсными башмаками. Кроме того, характеристика  $n = f(P2)$  у образца ВДПМ-2 более нелинейная, чем у образца ВДПМ-1 (см. рис. 9 и 10). Некоторое изменение крутизны этих характеристик объясняется тем, что при высоких частотах вращения индуктивное сопротивление, пропорциональное частоте, соизмеримо с активным сопротивлением обмотки якоря машины. При снижении частоты вращения доля индуктивного сопротивления снижается и при законе изменения тока якоря, близком к линейному, изменяется крутизна характеристик  $n = f(P)$ .

Поперечный поток реакции якоря в случае ротора типа «звездочка» без полюсных башмаков практически не изменяет основного потока, тогда как у образца ВДПМ-2 происходит значительное искажение потока, что ведет к насыщению полюсного башмака под набегающим краем полюса и, как следствие, к некоторому снижению суммарного потока в зазоре машины. Это вызывает к дополнительное искажение характеристики  $n = f(P2)$  образца ВДПМ-2 (см. рис. 10).

График  $\cos \varphi = f(P2)$  сначала возрастает, достигая максимальной величины, затем снижается вследствие изменения положения вектора напряжения относительно вектора тока. При совпадении этих векторов ВДПМ работает с наименьшим реактивным током. Однако наибольшего значения эта характеристика у образца ВДПМ-2 достигает при меньшем значении полезной мощности на валу машины, чем у образца ВДПМ-1 (см. рис. 9). Это объясняется меньшим искажением главного потока поперечной составляющей реакции якоря в случае ротора баз полюсных башмаков и, следовательно, ЭДС у ВДПМ-1 смещается на меньший угол при той же полезной мощности  $P2$ .

Дальнейшее увеличение угла  $\beta_0$  в сторону опережения (см. рис. 10) сдвигает максимум кривой  $\cos \varphi = f(P2)$  в сторону большей величины полезной мощности, так как вектор тока в этом случае сдвинут на больший угол относительно вектора напряжения. Зависимость  $I_\phi = f(P2)$  при больших опережающих углах  $\beta_0$  приобретает резко нелинейный характер, особенно при малых значениях полезной мощности, поскольку в этом диапазоне ВДПМ работает при наибольшей опережающей

щей коммутации и имеет худший гармонический состав тока. На рис. 10 приведены зависимости  $n = f(U_a)$  при широтно-импульсной модуляции напряжения для полностью намагниченного ротора без стабилизации магнитов (кривые 1) и при стабилизации магнитов ротора воздухом (кривые 2). Как показывает анализ кривых у обоих образцов, частота вращения при холостом ходе практически линейно возрастает с увеличением напряжения на обмотке якоря. Однако при нагрузке, которая поддерживалась постоянной во всем диапазоне изменения напряжения, зависимость  $n = f(U_a)$  у образцов ВДПМ носит нелинейный характер, поскольку с ростом частоты вращения растет индуктивное сопротивление.

### Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для систем судового электропривода и автоматики, наряду с находящимися в эксплуатации двигателями постоянного тока с управляемыми силовыми преобразователями и асинхронными двигателями с частотным управлением, характерна тенденция к применению перспективных ВДПМ.
2. Представленные разработки и схемы ВДПМ, подтвержденные экспериментом, могут в дальнейшем получить развитие в системах судового электрооборудования несмотря на то, что их внедрение сдерживается пока значительной стоимостью высокоэнергетических постоянных магнитов, недостаточно эффективными мерами защиты их от размагничивания, а также наличием в позиционной системе управления УВК элементов датчиков положения, механически связанных с ротором.
3. В связи с развитием технологии производства новых магнитных материалов, обладающих достоинствами высококоэрцитивных постоянных магнитов и мер по стабилизации их магнитного состояния, а также внедрением микропроцессорных позиционных систем, в том числе бездатчикового управления, появляются новые возможности использования ВДПМ в системах управления движением, навигационном оборудовании и вспомогательном судовом электроприводе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров Б. В. Развитие систем электропривода подводных лодок / Б. В. Никифоров // Судостроение. — 1999. — № 5 (726). — С. 23–25.
2. Богданов А. Н. Современные и перспективные алгоритмы управления гребными синхронными электродвигателями / А. Н. Богданов, А. И. Ивановский, П. В. Адамович // Вестник Крыловского государственного научного центра. — 2017. — № 4 (382). — С. 103–112. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-4-382-103-112.
3. Геча В. Я. К вопросу о предельной энергоэффективности асинхронных машин и двигателей с постоянными магнитами / В. Я. Геча [и др.] // МКЭЭЭ-2018: тр. XVII Междунар. конф. «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». 24–28 сентября 2018 г. — М.: Изд-во «Знак», 2018. — С. 158–161.
4. Жуков В. П. Высокомоментные вентильные электродвигатели серии 5 ДВМ / В. П. Жуков, В. А. Нестерин // Электротехника. — 2000. — № 6. — С. 19–21.
5. Волокитина Е. В. Новая серия отечественных вентильных электродвигателей для универсальных технологических роботов / Е. В. Волокитина [и др.] // Электротехника. — 2011. — № 7. — С. 13–16.
6. Ишутин В. В. Применение методов оптимизации при проектировании вентильных электродвигателей с постоянными магнитами для специальных электроприводов на ОАО «Лепсе» / В. В. Ишутин // Электротехника. — 2014. — № 4. — С. 46–50. DOI: 10.3103/S1068371214040075.
7. Бабицкий Д. Ю. Выбор магнитных систем роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами с повышенными удельными характеристиками / Д. Ю. Бабицкий [и др.] // МКЭЭЭ-2020: тр. XVII Междунар. конф. «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». 27 сентября — 1 октября 2022 г. — М.: Изд-во «Знак», 2022. — С. 90–94.
8. Кан С. В. Исследование влияния ширины и попарного сдвига постоянных магнитов на момент вентильного двигателя / С. В. Кан, С. А. Пахомин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2021. — Т. 64. — № 4–5. — С. 20–23. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-4-5-20-23.

9. SINAMICS medium voltage drives — the optimal drive for every application // Siemens official website [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.industry.siemens.com/drives/global/en/converter/mv-drives/Pages/medium-voltage-converters.aspx> (дата обращения: 01.03.2023).
10. ABB Permanent magnet motors [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://new.abb.com/motors-generators/iec-low-voltage-motors/process-performance-motors/permanent-magnet-motors> (дата обращения: 01.03.2023).
11. Wang G. Position sensorless permanent magnet synchronous machine drives — A review / G. Wang, M. Valla, J. Solsona // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — 2019. — Vol. 67. — Is. 7. — Pp. 5830–5842. DOI: 10.1109/TIE.2019.2955409.
12. Lee J. Pulse Width Modulation Methods for Minimizing Commutation Torque Ripples in Low Inductance Brushless DC Motor Drives / J. Lee, G. C. Lim, J. I. Ha // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — 2022. — Vol. 70. — Is. 5. — Pp. 4537–4547. DOI: 10.1109/TIE.2022.3189104.
13. *Высоцкий В. Е.* Математическое моделирование и оптимальное проектирование вентиляльных электрических машин / В. Е. Высоцкий, Ю. В. Зубков, П. В. Тулупов. — М.: Энергоатомиздат, 2007. — 340 с.

## REFERENCES

1. Nikiforov, B. V. “Evolution of electric propulsion systems for submarine.” *Shipbuilding* 5(726) (1999): 23–25.
2. Bogdanov, Andrey N., Aleksandr I. Ivanovsky, and Pavel V. Adamovich. “Modern and advanced control algorithms for synchronous propulsion motors.” *Transactions of the Krylov state research centre* 4(382) (2017): 103–112. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-4-382-103-112.
3. Gecha, V. Ya., A. S. Kobelev, S. A. Kudryashov, L. N. Makarov, and S. V. Skitovich. “K voprosu o predel’noi energoeffektivnosti asinkhronnykh mashin i dvi-gatelei s postoyannymi magnitami.” *Trudy XVII Mezhdunarodnoi konferentsii «Elektromekhanika, Elektrotekhnologii, Elektrotekhnicheskie Materialy i Komponenty»*. Izdatel’stvo «Znak», 2018. 136–139.
4. Zhukov, V. P., and V. A. Nesterin. “Vysokomomentnye ventil’nye elektrodvigateli serii 5DVM.” *Elektrotekhnika* 6 (2000): 19–21.
5. Volokitina, E. V., N. A. Danilov, V. A. Nesterin, and Yu. G. Opalev. “Novaya seriya otechestvennykh ventil’nykh elektrodvigateli dlya universal’nykh tekhnologicheskikh robotov.” *Elektrotekhnika* 7 (2011): 13–16.
6. Ishutinov, V. V. “Application of optimization techniques in the design of brushless DC electric motors with permanent magnets for special electric drives.” *Russian Electrical Engineering* 85.4 (2014): 228–231. DOI: 10.3103/S1068371214040075.
7. Babitskii, D. Yu., G. O. Geinrikh, A. G. Pristup, and A. F. Shevchenko. “Vybor magnitnykh sistem rotorov sinkhronnykh dvigatelei s postoyannymi magnitami s povyshennymi udel’nyimi kharakteristikami.” *MKEEE-2020: Trudy XVII Mezhdunar. konf. «Elektrome-khanika, elektrotekhnologii, elektrotekhnicheskie materialy i komponenty»*. M.: Znak, 2022. 90–94.
8. Kan, Sergey V., and Sergey A. Pakhomin. “Study of the influence of the width and the pair shift of permanent magnets on the torque of an electric motor.” *Russian Electromechanics* 64.4–5 (2021): 20–23. DOI: 10.17213/0136-3360-2021-4-5-20-23.
9. SINAMICS medium voltage drives — the optimal drive for every application. Web. 1 March 2023 <<https://www.industry.siemens.com/drives/global/en/converter/mv-drives/Pages/medium-voltage-converters.aspx>>.
10. ABB Permanent magnet motors. Web. 1 March 2023 <<https://new.abb.com/motors-generators/iec-low-voltage-motors/process-performance-motors/permanent-magnet-motors>>.
11. Wang, Gaolin, Maria Valla, and Jorge Solsona. “Position sensorless permanent magnet synchronous machine drives — A review.” *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 67.7 (2019): 5830–5842. DOI: 10.1109/TIE.2019.2955409.
12. Lee, Juwon, Gyu Cheol Lim, and Jung-Ik Ha. “Pulse Width Modulation Methods for Minimizing Commutation Torque Ripples in Low Inductance Brushless DC Motor Drives.” *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 70.5 (2022): 4537–4547. DOI: 10.1109/TIE.2022.3189104.
13. *Vysotskii, V. E., Yu. V. Zubkov, and P. V. Tulupov.* *Matematicheskoe modelirovanie i optimal’noe proektirovanie ven-til’nykh elektricheskikh mashin*. M.: Energoatomizdat, 2007.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Высоцкий Виталий Евгеньевич** —  
доктор технических наук, профессор  
Севастопольский государственный университет  
299053, Российская Федерация, Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
e-mail: [VEVysotsky@sevsu.ru](mailto:VEVysotsky@sevsu.ru)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Vysotsky, Vitaly E.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Sevastopol State University  
33 Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053,  
Russian Federation  
e-mail: [VEVysotsky@sevsu.ru](mailto:VEVysotsky@sevsu.ru)

*Статья поступила в редакцию 22 марта 2023 г.  
Received: March 22, 2023.*