

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



Дунич Евгений Алексеевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ  
ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИВОДА НА ОСНОВЕ  
ДВУХФАЗНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ  
С ДВУХСЕКЦИОННЫМИ ФАЗНЫМИ  
ОБМОТКАМИ**

Специальность 05.09.03  
«Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н., проф. РАН Кривилёв А.В.

Москва — 2022

Работа выполнена на кафедре «Системы приводов авиационно-космической техники» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

Научный руководитель:	Кривилёв Александр Владимирович д.т.н., профессор РАН, директор дирекции института № 7 «Робототехнические и интеллектуальные системы» МАИ
Официальные оппоненты:	Горячев Олег Владимирович д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Системы автоматического управления». Тульского Государственного Университета (ТулГУ)  Соловьев Владимир Алексеевич д.т.н., доцент, профессор кафедры «Электротехника и промышленная электроника» (ФН-7) МГТУ им. Н. Э. Баумана
Ведущая организация:	АО «Центральный научно-исследовательский институт автоматики и гидравлики» (АО «ЦНИ-ИАГ»)

Защита состоится 13 сентября 2022 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.07, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=166232](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=166232).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.07,  
кандидат технических наук, доцент

 Дежин Д. С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Предпосылкой к исследованию способов управления двухфазными вентильными двигателями (ДВД) стал идущий в настоящее время переход на новый технологический уклад, который характеризуется широким применением цифровых методов управления и связан с появлением новой элементной базы. Стало возможным применение трудно реализуемых или неизвестных ранее способов, а также их комбинирование непосредственно во время работы привода при изменении внешних воздействий. Как результат, во многих отраслях промышленности активно идёт переход на электропривод, преимущественно, с вентильными двигателями (ВД).

Современные робототехнические системы базируются на цифровом электроприводе, структура которого приведена на рис. 1,

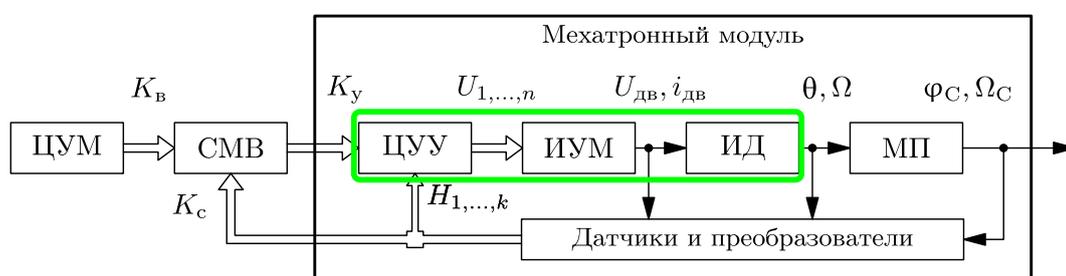


Рис. 1. Структура цифрового электропривода

где ЦУМ — цифровая управляющая машина; СМВ — специализированный микропроцессорный вычислитель; ЦУУ — цифровое устройство управления; ИУМ — импульсный усилитель мощности; ИД — исполнительный двигатель; МП — механическая передача;  $K_B$  — цифровой код командного сигнала;  $K_C$  — цифровой код сигнала обратной связи, который может содержать информацию о текущих значениях фазных напряжений и токов, угловых скоростей и углов поворота ротора двигателя и выходного вала и т. д.;  $H_{(1, \dots, k)}$  — сигналы о текущем положении ротора;  $K_U$  — код управления, вычисленный с учётом обеспечения необходимых показателей качества работы привода;  $U_{(1, \dots, n)}$  — управляющие булевы функции (УБФ);  $U_{дв}, i_{дв}$  — напряжения и токи на выводах двигателя, соответственно;  $\Omega(\Omega_C), \theta(\varphi_C)$  — скорости и углы поворота ротора двигателя и выходного вала.

В него не входит ЦУМ, вырабатывающая командный сигнал, а также СМВ, где решаются вопросы обеспечения заданных значений точности и устойчивости привода. В работе не рассматривается МП, а из датчиков и преобразователей рассматривается только датчик положения ротора. ЦУУ выполняет необходимую циклическую коммутацию ключевых элементов (КЭ) многостоечного ИУМ. Рассматриваемая часть выделена зелёным контуром.

В качестве ИД в электроприводе может быть задействован двухфазный ВД с двухсекционными фазными обмотками (ДО), позволяющий развивать больший пусковой момент в сравнении с классическим ТВД при аналогичных параметрах секций (активном сопротивлении и коэффициенте момента).

Появление ВД, развитие теории и конструктивных решений, а также алгоритмов управления связано с именами учёных, научных работников и инженеров, среди которых следует отметить отечественных: Н. П. Адволоткина, А. К. Аракеляна, А. А. Афанасьева, Г. И. Бабата, В. А. Балагурова, М. В. Баранова, Ю. М. Беленького, А. И. Бертинова, Д. А. Бута, Ф. И. Бутаева, О. Е. Бочкарёва, И. А. Вевюрко, О. Г. Вегнера, В. Е. Высоцкого, С. А. Гагарина, В. М. Гандшу, С. Г. Германа-Галкина, О. В. Горячева, В. Т. Гращенкова, С. В. Довгиленко, А. А. Дубенского, А. Г. Ефромеева, Д. А. Завалишина, Л. Я. Зиннера, А. Г. Ильину, Д. А. Ицкова, Ю. Н. Калачёва, М. М. Кацмана, А. А. Кириллова, В. В. Козлова, Ю. И. Конева, В. Г. Константинова, О. А. Коссова, В. В. Кротенко, В. Д. Косулина, В. С. Кулебакина, Н. И. Куликова, Н. И. Лебедева, В. К. Лозенко, Ш. И. Лутидзе, Е. В. Машукова, А. Г. Микерова, В. П. Миловзорова, А. С. Минина, М. М. Минкина, И. Е. Овчинникова, В. М. Острерова, Б. Н. Попова, Ю. Н. Розно, Д. В. Самохвалова, А. М. Селезнева, А. И. Скороспешкина, В. А. Соловьева, Д. В. Сухова, Б. Н. Тихменева, И. В. Трехонина, А. В. Улюшкина, О. И. Хасаева, В. В. Цоканова, Д. А. Шевцова, Д. М. Шишова, Е. Л. Эттингера, Я. И. Явдошака и зарубежных: Я. Гераса (J. F. Gieras, Польша-США), А. К. Дауда (A. K. Daud, Палестина), Р. Дума (Radu Duma, Румыния), Зыонг Д. Х., Б. Квона (B. Kwon, Ю. Корея), Т. Кенио (T. Kenjo, Япония), Р. Кришнана (R. Krishnan, США), Х. Лина (H. Lin, Китай), А. Некубина (A. Nekoubin, Иран), Ю-Д. Сона (Young-Dae Son, Ю. Корея), М. Турсини (M. Tursini, Италия), Р. А. Хабибабади (R. A. Habibabadi, Иран), Д. Хансельмана (D. Hanselman, США), Х. Хембаха (H. Hembach, Германия), Р. Цаубитцера (R. Zaubitzer, Германия), Чанг-Лян Ся (Chang-liang Xia, Китай), Чао-Мин Ванг (Chao-Min Wang, Тайвань), С-Ю. Юнга (Sung-Young Jung, Ю. Корея).

В настоящее время наиболее широко распространены трёхфазные вентильные двигатели (ТВД), находят применение двухфазные и однофазные. Ведутся разработки машин с числом фаз более трёх. Исследуются вопросы применения сверхпроводящих материалов.

В классическом представлении электропривода двухфазный двигатель рассматривается с неразделёнными фазными обмотками. Промышленностью освоен выпуск ДВД и ТВД с ДО серий ДМ, 2ДМ, ДБМ, 2ДБМ и др., применяемых в приводах вентиляторов и насосов систем жизнеобеспечения, антенн, манипуляторов роботов, медицинских приборов, рулей и гребных винтов подводных аппаратов, мотор-колёс.

Представления на уровне фаз недостаточно для их описания, так как невозможно полностью исследовать физические процессы, идущие в системе «ИУМ — ВД» при взаимодействии секций и определить влияние способов подключения секций на статические и динамические характеристики.

У ДВД с ДО существуют пять схем соединения секций: параллельная, последовательная, лучевые с общей и нейтральной точкой, замкнутая («квадрат»). Кроме того, секции могут оставаться несоединёнными. Со стойками ИУМ обмотка ДВД соединяется, как показано на рис. 2.

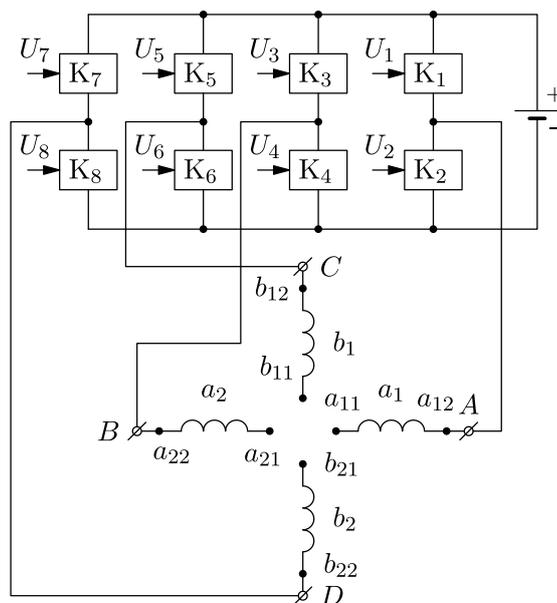


Рис. 2. Схема соединения секций с ИУМ

Во всех пяти случаях рассматривается четырёхстоечный ИУМ с двумя КЭ в стойке ( $K_i$  и  $K_{(i+1)}$ , где  $i = 2k + 1, k = \{0, 1, 2, 3\}$ ). На вход ИУМ подаётся восемь управляющих сигналов  $U_{(1, \dots, 8)}$ , сформированных ЦУУ в зависимости от применяемого метода импульсного управления (ИУ), текущего положения ротора и входного значения  $K_u$ .

Способы управления ВД с ДО разрабатывались Ю. М. Беленьким, Д. А. Ицковым, М. М. Кацманом, В. Д. Косулиным, А. Г. Микеровым, И. Е. Овчинниковым, А. В. Улюшкиным, И. В. Трехониным и др. Однако, для ДВД с ДО остаются не полностью исследованными вопросы влияния схемы соединения и способа управления на статические и динамические характеристики.

Таким образом, в настоящее время актуальной задачей является систематизация способов управления ВД и разработка методики определения динамических возможностей привода, позволяющей исследовать физические процессы, происходящие в системе «ИУМ — ВД» на уровне секций, учитывать их взаимное влияние и участие каждой из них в создании электромагнитного момента, сопоставлять способы управления и сравнивать их по полученным характеристикам двигателя.

### **Объект исследования**

Мехатронный модуль (ММ) с двухфазным вентильным двигателем, имеющим двухсекционные фазные обмотки.

### **Предмет исследования**

Физические процессы, протекающие в системе «ИУМ — ДВД с ДО», а также её статические и динамические характеристики при различных схемах соединения секций и вариантах задеирования фаз.

### **Цель работы**

Разработка методики определения динамических возможностей привода на основе двухфазного вентильного двигателя с двухсекционными фазными обмотками, которая позволит автоматизировать получение механических, динамических и энергетических характеристик мехатронного модуля с системой «ИУМ — ДВД с ДО» при произвольном соединении и задеировании секций.

### **Задачи работы**

1. Выполнить обзор существующих работ по разработке и исследованию способов управления двухфазным вентильным двигателем.
2. Разработать подход к исследованию физических процессов в системе «ИУМ — ДВД с ДО» и определению возможных способов формирования наборов базовых векторов магнитной индукции якоря.
3. Получить математическое описание наборов БВ ДВД с ДО и ТВД.
4. Провести сравнительный анализ способов формирования наборов БВ двухфазного ВД с ДО и ТВД.
5. Разработать математическое описание функций управления КЭ ИУМ.
6. Разработать компьютерную модель мехатронного модуля, позволяющую исследовать физические процессы, протекающие в системе «ИУМ — двухфазный ВД с ДО».
7. Разработать программный комплекс, автоматизирующий этапы расчёта, построение механических, динамических и энергетических характеристик системы «ИУМ — ВД».
8. Провести исследование процессов в системе «ИУМ — ДВД с ДО» на основе построенных эпюр цифровых сигналов, токов и напряжений как в секциях, так и на выводах двигателя относительно общего провода.
9. Построить механические характеристики, графики переходных процессов по скорости и к. п. д. ДВД с ДО и выполнить их анализ.
10. Реализовать цифровое устройство управления на ПЛИС и провести экспериментальные исследования работы ММ с целью подтверждения разработанных теоретических положений и достоверности математической модели.

Пункты 3 – 10 выполнить для всех возможных схем соединения секций и основных вариантов задействования фаз ДВД с ДО.

**Методы исследования** основаны на теории множеств, теории управления вентильными двигателями, основных положениях электротехники, векторной и булевой алгебры, стилях объектно-ориентированного, императивного и модульного программирования, компьютерном моделировании с применением численных расчётов.

### **Научная новизна**

1. Впервые разработан секционный подход к исследованию физических процессов в системе «ИУМ — ВД» и формированию наборов базовых векторов (БВ) магнитной индукции якоря, отличающийся от предложенных Н. П. Адволоткиным, М. В. Барановым, В. М. Гандшу, В. Т. Гращенковым, Ю. М. Беленьким, Д. А. Ицковым, А. А. Дубенским, М. М. Кацманом, В. Д. Косулиным, А. Г. Микеровым, А. С. Мининым, И. Е. Овчинниковым, И. В. Трехониным, А. В. Улюшкиным и др. тем, что позволяет получать и сравнивать между собой статические и динамические характеристики ВД при произвольном количестве фаз, различных схемах соединения секций и вариантах их задействования.
2. Получено математическое описание наборов БВ двухфазного вентильного двигателя с двухсекционными фазными обмотками и трёхфазного вентильного двигателя, которое отличается от приведённых в работах А. Г. Микерова, И. Е. Овчинникова, Р. А. Хабибабади (Иран), А. Некубина (Иран) и др. тем, что позволяет учитывать вклад каждой секции в создание электромагнитного момента, находить его относительную величину при соединении и задействовании секций произвольными способами, а также представлять наборы БВ в виде множеств.
3. Составленное математическое описание управляющих функций для четырёхстоечной и четырёхключевой схемы подключения ИУМ к ДВД с ДО при простых и комбинированных вариантах задействования фаз отличается от представленных в работах В. Т. Гращенкова, С. В. Довгиленко, А. А. Кириллова, А. С. Минина, Б. Н. Попова, А. В. Кривилёва, М. Виджаякумара (Индия), Хан-Чен Ву (Тайвань) и др. тем, что позволяет выполнять имитационное моделирование и реализацию цифровых устройств на языках описания цифровой аппаратуры для произвольных случаев соединения и задействования секций.
4. Для замкнутой схемы соединения секций, использованной Д. А. Ицковым, и лучевой, описанной М. М. Кацманом, выявлено, что при комбинированных способах формирования наборов БВ минимальная амплитуда пульсаций электромагнитного момента составляет 4 % в сравнении с 7 % у ТВД с односекционными фазными обмотками, однако при ис-

пользовании четырёхключевого ИУМ максимальный к. п. д. достигает в первом случае  $\approx 30\%$ , а во втором не превышает  $40\%$ .

5. Впервые определены связи между способами формирования наборов БВ и механическими, динамическими и энергетическими характеристиками ДВД с ДО.
6. Впервые получены нормализованные значения параметров модели двигателя постоянного тока, эквивалентного двухфазному ВД с ДО по динамическим свойствам, что позволяет учитывать зависимость величин  $C_e$ ,  $C_m$  и  $R_{\text{я}}$  от схемы соединения и способа задействования секций ДВД с ДО в целях использования его упрощённой модели в составе сложных электротехнических комплексов.

### **Теоретическая значимость**

1. Выполнено развитие теории управления двухфазными вентильными двигателями с двухсекционными фазными обмотками посредством рассмотрения всех физических процессов относительно секции, а не фазы, как делалось ранее.
2. Разработан математический аппарат описания наборов базовых векторов в виде множеств, что позволяет с единых позиций смотреть на формирование базовых векторов для многофазных машин с много секционными фазными обмотками.
3. Показано применение полиномов Жегалкина для описания управляющих булевых функций.

### **Практическая значимость**

1. Созданная компьютерная модель ММ на основе ДВД с ДО, отличается от разработанных С. А. Гагариным, С. Г. Германом-Галкиным, А. В. Кривилёвым, А. Некубиным (Иран), Б. Н. Поповым, Р. А. Хабибабади (Иран) и др., тем, что позволяет учитывать различные схемы соединения и варианты задействования секций фазных обмоток для произвольного ДВД с ДО, выпускаемого или планируемого к выпуску промышленностью.
2. Составленный программный комплекс, отличается от предложенных А. В. Кривилёвым и С. А. Гагариным тем, что позволяет автоматизировать исследование физических процессов, которые протекают в системе «ИУМ — ДВД с ДО», и с помощью параллельных вычислений автоматизировать получение её статических и динамических характеристик.
3. Разработанный вариант параметрического описания цифрового устройства на языке SystemVerilog может быть востребован при реализации различных вариантов задействования фаз в информационном канале электропривода на основе ДВД с ДО.
4. Построенный лабораторный макет ММ на основе ДВД с ДО внедрён в учебный процесс и может быть использован в экспериментальных ис-

следованиях работы ММ при реализации энергоэффективных цифровых алгоритмов управления.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Секционный подход к исследованию процессов в системе «ИУМ — ДВД с ДО» и описанию способов формирования наборов БВ многофазных ВД.
2. Математическое описание наборов БВ ДВД с ДО.
3. Математическое описание УБФ ММ на основе ДВД с ДО.
4. Результаты сравнения способов формирования наборов БВ по кривым разгона, механическим характеристикам и к. п. д.
5. Результаты определения нормализованных значений параметров модели двигателя постоянного тока, эквивалентного двухфазному ВД с ДО по динамическим свойствам.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций подтверждается корректностью применения основных положений теории множеств, электротехники, векторной и булевой алгебры, методов численного решения систем дифференциально-алгебраических уравнений, современной системы компьютерной математики MATLAB, среды моделирования Simulink с пакетом расширения SimPowerSystems, а также строгостью выполнения экспериментальных исследований, проведённых в лаборатории кафедры 702 («Системы приводов авиационно-космической техники») МАИ.

### **Внедрение результатов**

1. В учебный процесс кафедры 702 МАИ. Разработанные лабораторные макеты используются при проведении лабораторных работ, курсового и дипломного проектирования.
2. В научно-исследовательские работы, проводимые АО МНПК «Авионика». Предложенные технические решения применяются при формировании технических заданий и методик проведения научно-исследовательских работ по созданию и отработке конструкций исполнительных механизмов шассийного электромеханического привода, а также рулевых приводов.

Имеются соответствующие акты о внедрении результатов работы.

### **Апробация результатов и публикации по теме работы**

По теме диссертационной работы имеется 14 публикаций, из которых: 2 статьи в журнале «Электричество», рекомендованном Высшей аттестационной комиссией (ВАК), 3 статьи, индексируемые в системе «Scopus», 9 трудов конференций.

## Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объём работы составляет 195 страниц, включая 47 рисунков и 20 таблиц. Список использованных источников содержит 178 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, проведён обзор существующих работ, сформулированы цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимости диссертационной работы, перечислены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации, публикациях по теме работы и внедрении её результатов, представлена её структура и краткое содержание глав.

**В главе 1** описывается предлагаемый секционный подход к исследованию физических процессов в системе «ИУМ — ВД», а также формированию наборов БВ с их последующей систематизацией и математическим описанием УБФ, который отличается от известных тем, что:

1. Фазные обмотки двигателя представляются в виде разделённых на секции независимо от схемы их соединения.
2. Секция принимается за элементарную расчётную единицу, вносящую свой вклад в создание электромагнитного момента.

Систематизация может быть расширена на случаи ВД с произвольным числом и угловым расположением фаз или секций фазных обмоток.

При реализации секционного подхода выполнены следующие действия:

- составлена система обозначений фаз, секций и их выводов, единая для всех схем соединения секций (см. рис. 2).

- расширен терминологический аппарат: уточнены известные понятия «фаза», «секция», «базовый вектор» (БВ) и введены новые: «секционный вектор» (СВ), «единичный секционный вектор», «фазный вектор» (ФВ), «вариант задействия фаз», «набор базовых векторов».

- определены варианты задействия двух секций одной фазы ( $P$ ) при создании ФВ и общее число ФВ, равное 9 (см. табл. 1).

- БВ объединены в наборы, зависящие от схемы соединения секций и их подключения к источнику питания (ИП).

У ДВД с ДО существует 16 вариантов задействия фаз и 12 множеств БВ, включая нулевой БВ. У ТВД с ДО 64 варианта с учётом нулевого БВ и 8 множеств БВ. Общее число вариантов для  $n$ -фазной машины составляет  $2^{2n}$ , из которых  $2^n$  приводят к нулевому БВ. Если учитывается, какая секция формирует СВ, то в случае  $n$ -фазной машины число способов формирования БВ равно  $3^{2n}$ , где 3 — число возможных направлений СВ («+», «-» и «0»).

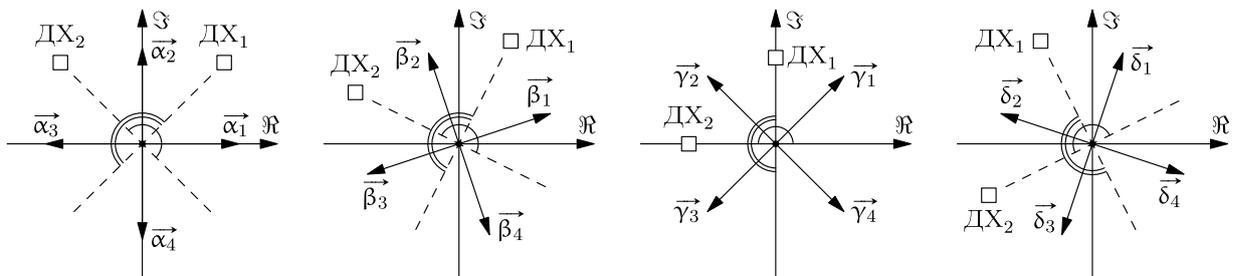
Таблица 1. Варианты задействования секций одной фазы в формировании ФВ

Обозначение	Название	Фазный вектор	Число ФВ
$P$	активная фаза	Равен сумме сонаправленных секционных векторов	2
$\bar{P}$	пассивная фаза	Равен нулю, так как секционные векторы равны нулю	1
$\bar{p}$	фаза с пассивной секцией	Соответствует не нулевому секционному вектору	4
$p^*$	фаза с противоположным включением секций	Представляет собой нуль, так как секционные векторы направлены в разные стороны	2

Описания наборов БВ ДВД с ДО представлены в таблице 2. Для последовательной схемы графические представления соответствуют лучевой схеме с общей точкой и отдельно не показаны. Модули БВ представлены в нормализованном виде, где единичное значение соответствует модулю СВ при полном напряжении питания и пусковом токе. При сравнении наборов БВ ДВД с ДО и ТВД определено, что максимальный пусковой момент двухфазного ВД в  $\sqrt{2}$  раз больше.

Логические переменные (ЛП) содержат информацию о текущем положении ротора двигателя ( $H_{i-1}$ ), желаемом направлении ( $DR$ ) и скорости вращения ( $SP$ ). При вращении вала четыре БВ чередуются на основе текущих значений сигналов  $H_1$  и  $H_2$  датчика положения ротора, сдвинутых по фазе на  $90^\circ$  и изменяющихся согласно коду Джонсона. Формирование этих сигналов реализуется двумя датчиками Холла (ДХ), расположенными под углом  $90$  эл. градусов.

Вариант 1 (рис. 3, а) соответствует элементам множеств  $\mathbb{A}$ ,  $\mathbb{D}$ ,  $\mathbb{H}$  и  $\mathbb{P}$ , вариант 2 (рис. 3, б) — элементам множеств  $\mathbb{F}$  и  $\mathbb{K}$ , вариант 3 (рис. 3, в) — элементам множеств  $\mathbb{B}$ ,  $\mathbb{E}$  и  $\mathbb{M}$  и, наконец, вариант 4 (рис. 3, г) — элементам множеств  $\mathbb{G}$  и  $\mathbb{L}$ . Одинарной дугой обозначен сектор, где переменная  $H_1$  равна единице, сектор единичного значения  $H_2$  отмечен двойной дугой.



а) вариант 1

б) вариант 2

в) вариант 3

г) вариант 4

Рис. 3. Варианты размещения ДХ

Таким образом, угловой сдвиг  $i$ -го ДХ определяется по формуле

$$\Psi_i = \frac{1}{p} \left( \text{Arg}(\overline{\omega_1}) + \frac{2i-1}{2n} \right),$$

где  $i = \overline{1, 2}$  — номер ДХ,  $\omega_1$  — первый элемент рассматриваемого множества БВ,  $p$  — число пар полюсов постоянного магнита ротора,  $n$  — общее число ДХ.

Аналитическое описание цифровых сигналов ДХ имеет вид:

$$H_i = \cos(p\theta - \Psi_i) > 0,$$

где  $i = \overline{1, 2}$  — номер ДХ,  $\theta$  — текущее угловое положение ротора.

На базе табл. 2 определяются УБФ для формирования конкретного набора БВ с последующим формированием таблицы истинности, связывающей значения ЛП и УБФ, и определением аналитических выражений УБФ.

В табл. 3 для случая параллельного соединения секций и раздельного задействования фаз представлены ЛП и УБФ, позволяющие выполнять реверс двигателя, в скалярном и векторном виде. В правом столбце приведены аналитические выражения УБФ в форме полинома Жегалкина, обобщённый вид которого представлен ниже:

$$F(DR, H_2, H_1) = c_0 \oplus c_1 H_1 \oplus c_2 H_2 \oplus c_3 H_1 H_2 \oplus c_4 DR; \oplus \\ \oplus c_5 H_1 DR \oplus c_6 H_2 DR; \oplus c_7 H_1 H_2 DR,$$

где  $c_i \in \{0, 1\}$ .

Нулевое значение  $DR$  соответствует прямому направлению вращения вала двигателя на холостом ходу (ХХ), единичное — обратному.

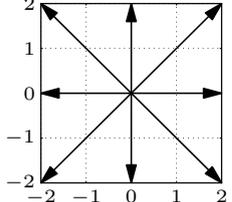
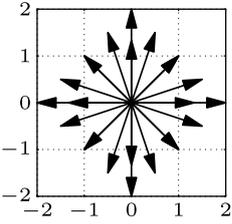
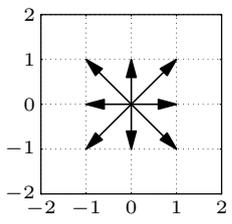
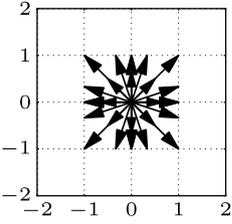
Наряду с простыми, в работе рассмотрены комбинированные способы формирования наборов БВ (сочетания приведённых в табл. 2). Наборы подобраны так, чтобы длины БВ не отличались более чем на 14 %, а угловой сдвиг между соседними векторами был одинаковым и не превышал 45°. В двухфазном ВД удаётся получить амплитуду пульсаций электромагнитного момента, равную 4 %, против 7 % у трёхфазного.

**В главе 2** представлены программные комплексы (ПК), предназначенные: 1) для исследования физических процессов в системе «ИУМ — ДВД с ДО», 2) построения её статических и энергетических характеристик. В их основе лежат прототипы, разработанные А. В. Кривилёвым для ДПТ и ТВД, которые адаптированы для ДВД с ДО.

Первый ПК (рис. 4) позволяет получать эпюры цифровых сигналов (ЛП, УБФ) и аналоговых: напряжений, токов и противо-ЭДС, как между выводами секций, так и на каждом выводе двигателя относительно общего провода.

Второй ПК (рис. 5) способен осуществлять расчёт методом параллельных вычислений на многоядерных процессорах или многопроцессор-

Таблица 2. Наборы базовых векторов ДВД

Вариант задей-ия фаз	Множество базовых векторов в комплексной плоскости	Графическое представление
несоединённые фазы с параллельными секциями		
$A\bar{B}$	$\mathbb{A} = \{\mathbf{a}   \mathbf{a} = 2e^{ik\pi/2}, k \in \mathbb{N}_0 \wedge k < 4\}$	
$AB$	$\mathbb{B} = \{\mathbf{b}   \mathbf{b} = 2\sqrt{2}e^{ik\pi/4}, k = 2m + 1 \wedge m \in \mathbb{N}_0 \wedge m < 4\}$	
«квадрат»		
$A\bar{B}$	$\mathbb{A} = \{\mathbf{a}   \mathbf{a} = 2e^{ik\pi/2}, k \in \mathbb{N}_0 \wedge k < 4\}$	
$A\bar{b}$	$\mathbb{F} = \{\mathbf{f}   \mathbf{f} = \sqrt{5/2}e^{i[\arctg(1/3)+k\pi/2]}, k \in \mathbb{N}_0 \wedge k < 4\}$ $\mathbb{G} = \{\mathbf{g}   \mathbf{g} = \sqrt{5/2}e^{i[\arctg(3)+k\pi/2]}, k \in \mathbb{N}_0 \wedge k < 4\}$	
$Ab^*$	$\mathbb{H} = \{\mathbf{h}   \mathbf{h} = 4/3e^{ik\pi/2}, k \in \mathbb{N}_0 \wedge k < 4\}$	
$\bar{a}\bar{b}$	$\mathbb{E} = \{\mathbf{e}   \mathbf{e} = \sqrt{2}e^{ik\pi/4}, k = 2m + 1 \wedge m \in \mathbb{N}_0 \wedge m < 4\}$	
лучевая с общей точкой		
$\bar{A}\bar{b}$	$\mathbb{D} = \{\mathbf{d}   \mathbf{d} = e^{ik\pi/2}, k \in \mathbb{N}_0 \wedge k < 4\}$	
$\bar{a}\bar{b}$	$\mathbb{E} = \{\mathbf{e}   \mathbf{e} = \sqrt{2}e^{ik\pi/4}, k = 2m + 1 \wedge m \in \mathbb{N}_0 \wedge m < 4\}$	
$\bar{a}\bar{b}^*$	$\mathbb{D} = \{\mathbf{d}   \mathbf{d} = e^{ik\pi/2}, k \in \mathbb{N}_0 \wedge k < 4\}$	
лучевая с нейтральной точкой		
$A\bar{b}$	$\mathbb{K} = \{\mathbf{k}   \mathbf{k} = \sqrt{10}/3e^{i[\arctg(1/3)+k\pi/2]}, k \in \mathbb{N}_0 \wedge k < 4\}$ $\mathbb{L} = \{\mathbf{l}   \mathbf{l} = \sqrt{10}/3e^{i[\arctg(3)+k\pi/2]}, k \in \mathbb{N}_0 \wedge k < 4\}$	
$Ab^*$	$\mathbb{D} = \{\mathbf{d}   \mathbf{d} = e^{ik\pi/2}, k \in \mathbb{N}_0 \wedge k < 4\}$	
$\bar{a}\bar{b}$	$\mathbb{M} = \{\mathbf{m}   \mathbf{m} = 1/\sqrt{2}e^{ik\pi/4}, k = 2m + 1 \wedge m \in \mathbb{N}_0 \wedge m < 4\}$	
$\bar{a}\bar{b}^*$	$\mathbb{P} = \{\mathbf{p}   \mathbf{p} = 2/3e^{ik\pi/2}, k \in \mathbb{N}_0 \wedge k < 4\}$	

ных вычислительных системах. Для обоих ПК используется единая иерархическая модель, структура которой отличается от прототипа тем, что позволяет индивидуально учитывать параметры секций, а их СВ направлены вдоль координатных осей. Также, как у прототипа, учитывается изменение

Таблица 3. Таблица истинности одного набора значений УБФ

$i$	$DR$	$H_2H_1$	$\mathbb{A}$	$\mathbf{U}$	$U_8$	$U_7$	$U_6$	$U_5$	$U_4$	$U_3$	$U_2$	$U_1$	Математическое описание УБФ
0	0	$h_0$	$\vec{a}_1$	06 <sub>h</sub>	0	0	0	0	0	1	1	0	$U_1 = U_4 = t \oplus DR;$ $U_2 = U_3 = t \oplus v;$ $U_5 = U_8 = t \oplus H_2;$ $U_6 = U_7 = t \oplus H_1,$ где $t = DRH_1 \oplus DRH_2 \oplus H_1H_2;$ $v = DR \oplus H_2 \oplus H_1 \oplus 1$
1	0	$h_1$	$\vec{a}_2$	60 <sub>h</sub>	0	1	1	0	0	0	0	0	
2	0	$h_2$	$\vec{a}_4$	90 <sub>h</sub>	1	0	0	1	0	0	0	0	
3	0	$h_3$	$\vec{a}_3$	09 <sub>h</sub>	0	0	0	0	1	0	0	1	
4	1	$h_0$	$\vec{a}_3$	09 <sub>h</sub>	0	0	0	0	1	0	0	1	
5	1	$h_1$	$\vec{a}_4$	90 <sub>h</sub>	1	0	0	1	0	0	0	0	
6	1	$h_2$	$\vec{a}_2$	60 <sub>h</sub>	0	1	1	0	0	0	0	0	
7	1	$h_3$	$\vec{a}_1$	06 <sub>h</sub>	0	0	0	0	0	1	1	0	

контуров протекания тока, тем самым, ММ рассматривается как система с переменной структурой. Расчёт 1000 точек предельной характеристики для одного способа формирования наборов БВ ДВД с ДО, при модельном времени 0,2 с., требует приблизительно 40 ГиБ оперативной памяти и занимает около 20 минут. При построении семейств из 10 линий со 100 точками в каждой и поочерёдном методе ИУ требуется до 256 ГиБ, а время расчёта составляет около 20 часов.

Схема модели верхнего уровня показана на рис. 6, где используются обозначения: Ts — период дискретизации модели; U8 — U1 — сигналы управления ключами усилителя мощности; Angle — текущее угловое положение ротора; Н(1..2) — сигналы ДХ; TL — момент нагрузки; А — D — выводы двигателя; GND — общий провод.

В состав модели входят следующие подсистемы: синхронная машина (SM), ЦУУ (Control System), источник питания (Supply), импульсный усилитель мощности (Bridge), блок ДХ (Hall), блок задания статического момента нагрузки (Load), блок дискретизации (powergui).

В главе 3 представлены результаты исследования физических процессов, имеющих место в системе «ИУМ — ДВД с ДО», а также результаты исследования влияния схемы соединения секций и варианта задействования фаз на переходные процессы (ПП) по скорости, механические и энергетические характеристики системы «ИУМ — ДВД с ДО».

На рис. 7 в качестве примера показаны эпюры сигналов при отдельном способе формирования наборов БВ в случае несоединённых секций (а) и лучевого соединения с общей точкой (б).

Обозначения: Н1, Н2 — сигналы ДХ, U1 — U8 — сигналы КЭ, Ua1 — Ub2 (красные линии) — напряжения между выводами секций, Ia1 — Ib2 (синие линии) — токи секций, Ea1 — Eb2 (чёрные пунктирные линии) — противо-ЭДС секций. I<sub>рwr</sub>, M<sub>dv</sub> — ток, потребляемый от ИП, и электромагнитный момент. В обоих случаях на одном межкоммутационном интервале (МКИ) задействована одна секция, однако, вид эпюр и импульсные режимы секций (последовательность секционных напряжений на их полупериоде) совершенно различны. Во втором случае образуются контуры



Рис. 4. Структура ПК для исследования физических процессов

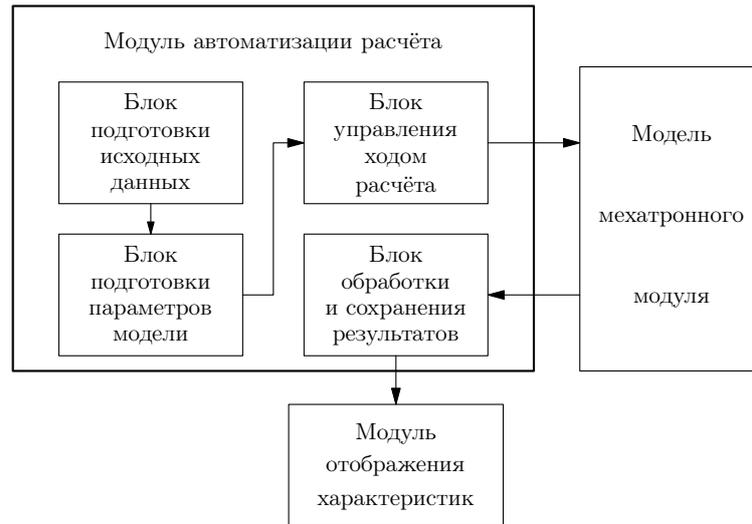


Рис. 5. Структура ПК для построения статических характеристик

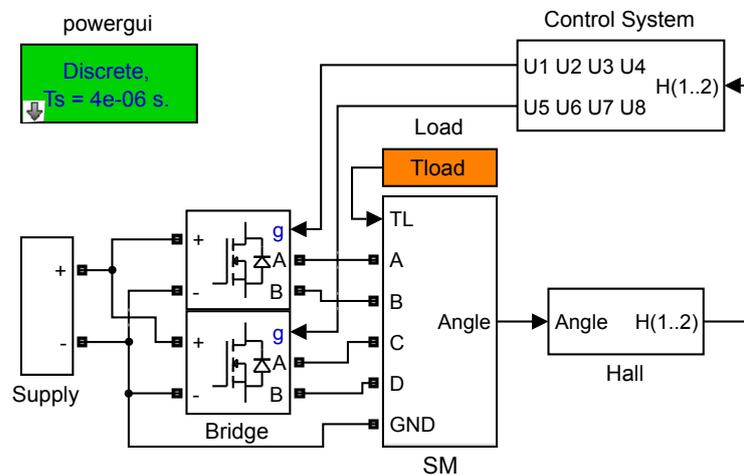


Рис. 6. Модель верхнего уровня

протекания токов, вызываемых противо-ЭДС, что приводит к снижению скорости  $\omega$  и к. п. д.

На рис. 8 показаны графики КПД по скорости  $\omega$ , на рис. 9 — механические характеристики, на рис. 10 — графики к. п. д. двухфазного ВД (тонкие линии) и трёхфазного (утолщённые линии), а также пример ограничений гипотетического технического задания (синий пунктир).

Способы формирования наборов БВ ДВД идентифицируются по номерам линий. Первая цифра указывает на схему соединения секций, вто-

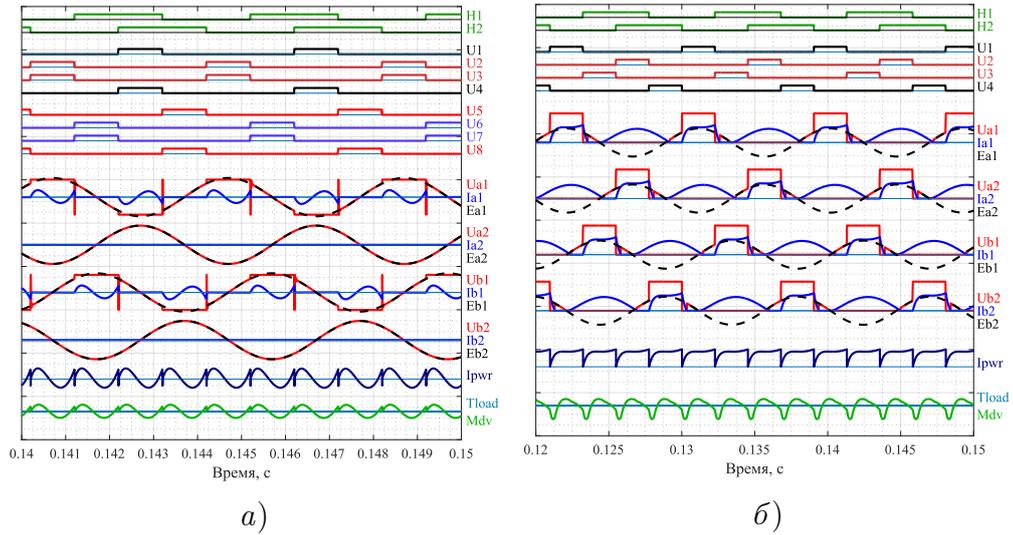


Рис. 7. Способ  $\overline{A\bar{b}}$  при несоединённых секциях (а) и лучевой схеме с общей точкой (б)

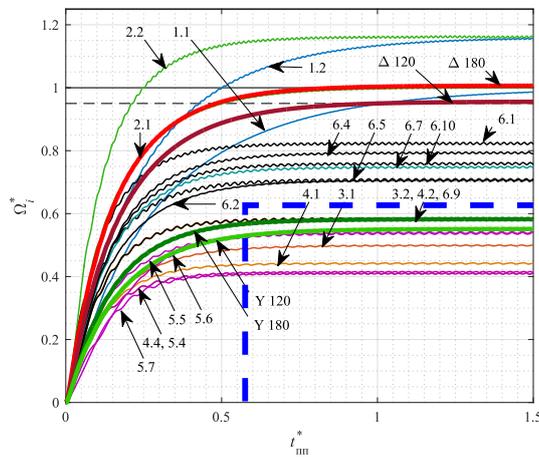


Рис. 8. Кривые переходного процесса по скорости

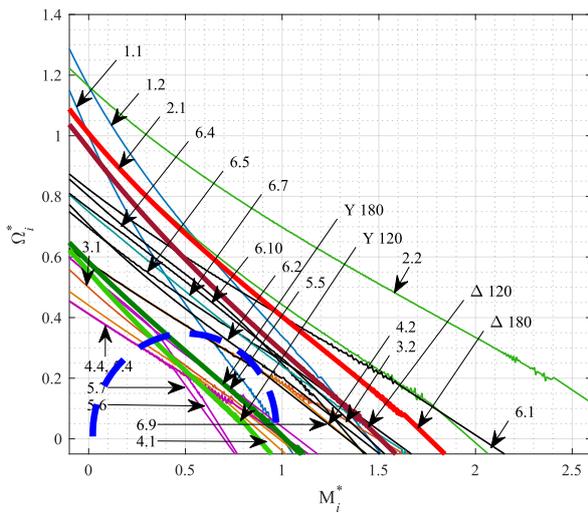


Рис. 9. Механические характеристики

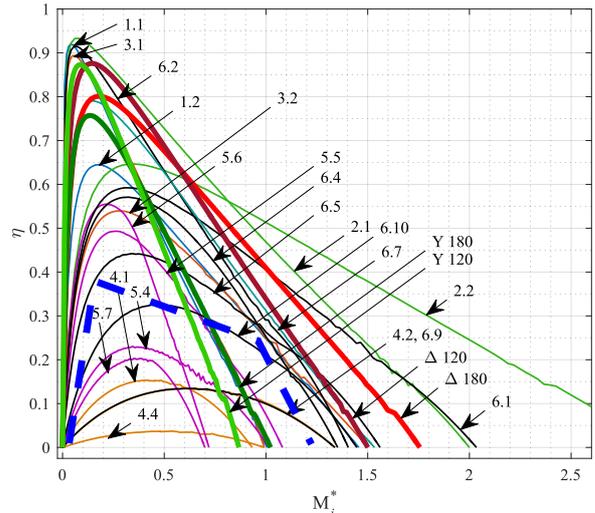


Рис. 10. Графики к. п. д.

рая — на вариант их задействования. Все величины представлены в нормализованном виде относительно случая несоединённых секций и отдельного задействования фаз (линия 1.1, табл. 4). В качестве исходных ис-

Таблица 4. Базовые значения параметров ДВД

$\Omega_{XX}, [c^{-1}]$	$M_{П}, [H \cdot m]$	$P_{мех}^{max}, [Вт]$	$t_{ПП}, [c]$	$C_m, [H \cdot m/A]$	$C_e, [B \cdot c/рад]$
393,2233	0,1458	12,74	0,0189	0,075	0,0687

пользуются параметры серийно выпускаемого двигателя ДБМ50-0,04.3-2 встраиваемого исполнения.

В табл. 5 показаны значения выходных параметров работы двухфазного двигателя: времени ПП по скорости, скорости ХХ и пускового момента, максимальных значений механической мощности и к. п. д. а также коэффициентов момента и противо-ЭДС эквивалентного ДПТ, а в табл. 6 — аналогичные параметры трёхфазного.

Полученные кривые могут быть условно разделены на три группы по скорости холостого хода. В первую входят большие значения: (от 0,96 до 1,16), которые достигаются при параллельных и несоединённых секциях (линии 1.1, 1.2, 2.1 и 2.2), а также в случае схемы «треугольник» ТВД.

Вторая группа имеет место при схеме «квадрат» (от 0,58 до 0,82; линии 6.1 – 6.9), лучевой схеме с общей точкой, последовательном соединении (линии 3.2 и 4.2), а также при схеме «звезда» в трёхфазном ВД.

В третью группу входят значения от 0,41 до 0,58, наблюдаемые при лучевых схемах с общей и нейтральной точкой. Однако, при больших значениях скорости холостого хода время переходного процесса также велико. В первой группе его величина составляет от 0,39 до 1; во второй от 0,34 до 0,46 и от 0,35 до 0,48 в третьей.

Характеристики для схемы «треугольник» при больших моментах попадают во вторую группу, при малых приближаются к первой, при схеме «звезда» соответствуют третьей, что можно объяснить лучевым характером этой схемы. В области  $[(M_{Пi}^* < 1,2) \wedge (\Omega_{XXi}^* < 0,6)]$  ниже всех располагаются линии 4.4 и 5.4, соответствующие способу  $ab^*$  при лучевой схеме с общей и нейтральной точкой. В области  $(M_{Пi}^* < 0,45)$  ниже всех лежат линии 4.4 и 5.4, соответствующие способу  $ab^*$  при лучевой схеме с общей и нейтральной точкой.

Наибольшие значения к. п. д. ( $0,65 < \eta_{max} < 0,93$ ) выявились также в первой группе, при параллельном и последовательном (линия 3.1) соединении секций, а также при схеме «квадрат» и способе  $AB$  (линия 6.2).

Вторая группа ( $0,13 < \eta < 0,91$ ) также занимает промежуточное положение, за исключением способов 4.2 и 6.9, которые отличаются существенно меньшим значением  $\eta_{max} = 0,13$  (практически совпадают, т. к. оба соответствуют варианту  $\bar{a}\bar{b}$ ).

В третьей группе при последовательной и обеих лучевых схемах, к. п. д. достигает в лучшем случае значений не более 0,64. При способе 4.1, (на МКИ задействована только одна секция), а также способах 4.4, 5.4, 5.7, использу-

Таблица 5. Параметры ДВД в нормализованных единицах

Номер линии	Вариант задеи-ия фаз	Мно-жество БВ	$\Omega_{\text{XX}i}^*$	$M_{\text{П}i}^*$	$P_{\text{мех}i}^*$	$\eta_{\text{max}i}^*$	$t_{\text{пп}i}^*$	$C_{mi}^*$	$C_{ei}^*$	$C_{ei}^{\text{corr}}$
несоединённые секции										
1.1	$\bar{a}\bar{B}$	D	1	1	1	0,92	1	1	1	1
1.2	$\bar{a}\bar{b}$	E	1,16	$\sqrt{2}$	1,74	0,64	0,79	$1/\sqrt{2}$	0,86	1,22
несоединённые фазы с параллельными секциями										
2.1	$A\bar{B}$	A	1	2	1,99	0,93	0,5	1	1	1
2.2	$AB$	B	1,16	$2\sqrt{2}$	3,46	0,65	0,39	$1/\sqrt{2}$	0,86	1,22
несоединённые фазы с последовательными секциями										
3.1	$A\bar{B}$	D	0,5	1	0,55	0,89	0,44	2	2	1
3.2	$AB$	E	0,58	$\sqrt{2}$	0,95	0,54	0,34	$\sqrt{2}$	1,72	1,21
лучевая с общей точкой										
4.1	$\bar{A}\bar{b}$	D	0,44	1	0,51	0,15	0,35	1	2,26	2,26
4.2	$\bar{a}\bar{b}$	E	0,58	$\sqrt{2}$	0,95	0,13	0,33	$1/\sqrt{2}$	1,72	2,43
4.4	$\bar{a}b^*$	D	0,41	1	0,49	0,04	0,36	0,33	2,43	7,28
лучевая с нейтральной точкой										
5.4	$Ab^*$	D	0,41	1	0,48	0,23	0,36	1,33	2,43	1,82
5.5	$A\bar{b}$	K, L	0,54	$\sqrt{10}/3$	0,64	0,49	0,42	1,58	1,86	1,78
5.6	$\bar{a}\bar{b}$	M	0,54	$1/\sqrt{2}$	0,55	0,55	0,48	$\sqrt{2}$	1,85	1,31
5.7	$\bar{a}b^*$	P	0,41	$2/3$	0,46	0,2	0,38	1	2,43	2,43
замкнутая («квадрат»)										
6.1	$A\bar{B}$	A	0,82	2	1,83	0,59	0,35	1	1,21	1,21
6.2	$AB$	E	0,7	$\sqrt{2}$	1,05	0,91	0,47	$\sqrt{2}$	$\sqrt{2}$	1
6.4	$Ab^*$	H	0,79	$4/3$	1,38	0,57	0,43	1	1,26	1,26
6.5	$A\bar{b}$	F, G	0,71	$\sqrt{5/2}$	1,22	0,44	0,38	1,05	$\sqrt{2}$	1,34
6.7	6.4 и 6.9	S	0,75	1,37	1,22	0,79	0,42	1,03	1,33	1,3
6.9	$\bar{a}\bar{b}$	E	0,58	$\sqrt{2}$	0,95	0,13	0,33	$1/\sqrt{2}$	1,72	2,43
6.10	6.2 и 6.4	S	0,76	1,37	1,32	0,33	0,4	0,86	1,32	1,53

ющих встречное включение секций, получаются в лучшем случае значения не более 0,23. Из последних наихудшие ( $\eta_{\text{max}} = 0,04$ ) результаты показывает способ 4.4, что можно объяснить встречным подключением секций.

Таблица 6. Параметры ТВД в нормализованных единицах

Обозначение линии	Вариант задеи-ия фаз	Мно-жество БВ	$\Omega_{XX i}^*$	$M_{\Pi i}^*$	$P_{\text{мех } i}^*$	$\eta_{\text{max } i}^*$	$t_{\text{пп } i}^*$	$C_{m i}^*$	$C_{e i}^*$	$C_{e i}^{\text{corr}}$
«треугольник»										
$\Delta 180$	$ABC\bar{C}$	$\mathcal{B}$	1,01	$\sqrt{3}$	1,99	0,8	0,5	$\sqrt{3}/2$	0,99	1,15
$\Delta 120$	$ABC$	$\mathcal{E}$	0,96	1,5	1,58	0,88	0,57	1	1,05	1,05
«звезда»										
$Y 180$	$ABC$	$\mathcal{A}$	0,58	1	0,7	0,76	0,46	1,5	1,72	1,14
$Y 120$	$ABC\bar{C}$	$\mathcal{H}$	0,55	$\sqrt{3}/2$	0,56	0,87	0,52	$\sqrt{3}$	1,81	1,05

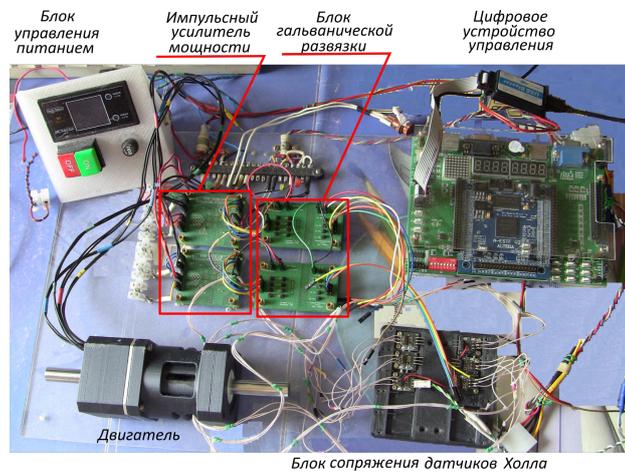


Рис. 11. Внешний вид лабораторного макета

Для ТВД более высокий к. п. д. наблюдается при малых моментах ( $M_{\Pi i}^* \ll 0,5$ ) для 180-градусной и при больших для 120-градусной коммутации фаз в случае схемы «треугольник» и при  $M_{\Pi i}^* < 0,45$  в случае схемы «звезда». Линии к. п. д., при схеме «звезда», в целом, лежат ниже, чем при схеме «треугольник».

Следовательно, наибольшие значения энергоэффективности достигаются при параллельном соединении секций ДВД, а также при схемах «треугольник» и «звезда» ТВД, промежуточные — при схеме «квадрат» ДВД, а лучевые схемы ДВД с ДО имеют одни из самых низких показателей.

**В главе 4** приведено описание лабораторного макета ММ (рис. 11) и результаты экспериментального исследования его работы. ЦУУ реализовано в ПЛИС на языке System Verilog. Программа позволяет с помощью параметра выбирать модуль, содержащий математическое описание желаемого способа формирования наборов БВ.

Основные компоненты макета: двигатель, ЦУУ и ИУМ; вспомогательные: блок сопряжения ДХ, блок гальванической развязки, блок управле-

ния питанием. Разработанная конструкция корпуса двигателя в целях регулирования чувствительности и угла коммутации ДХ позволяет менять расстояние от ДХ до ротора и угол их поворота вокруг оси вала.

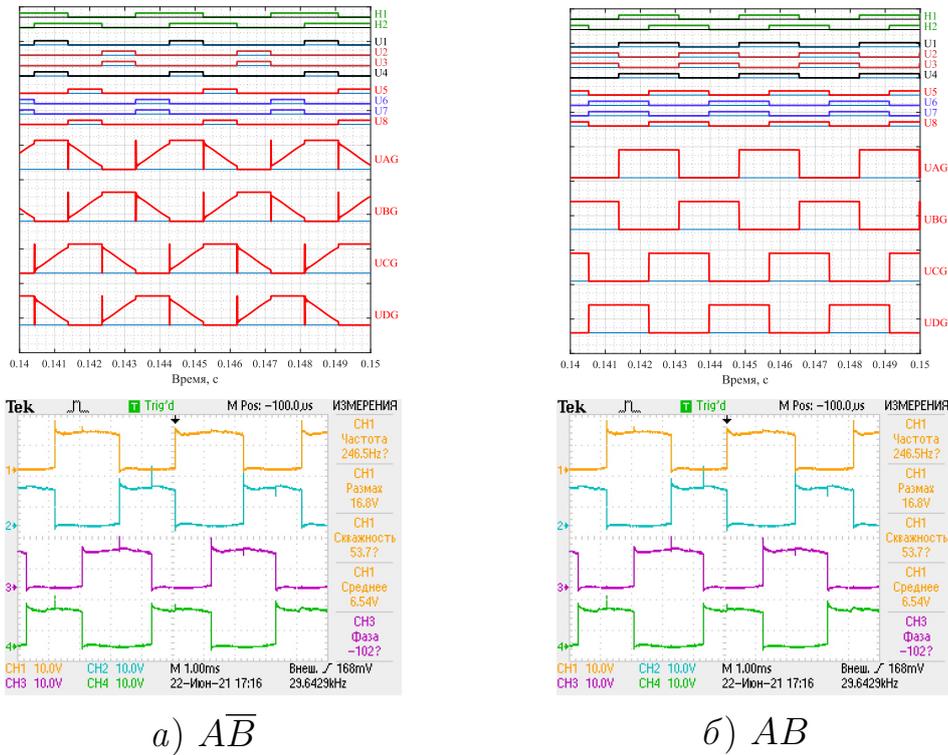


Рис. 12. Результаты моделирования и экспериментальных исследований

На рис. 12 показаны временные диаграммы цифровых сигналов и эпюры напряжений на выводах двигателя относительно общего провода (UAG – UDG) при параллельном соединении секций. Эпюры, полученные экспериментально (показаны внизу), качественно совпадают с вычисленными во время моделирования (вверху), что свидетельствует об адекватности модели ММ, достоверности получаемых на её основе результатов.

**В заключении** приведена блок-схема алгоритма предлагаемой методики предлагаемой методики определения динамических возможностей привода (рис. 13), сформулированы основные результаты работы и даны рекомендации разработчикам приводов. В целях обеспечения полного охвата способов формирования наборов БВ и нахождения места каждого из них в единой системе, необходимо построить и обойти дерево вариантов, главными ветвями которого являются схемы соединения секций, побочными — способы задействования фаз, затем отобрать либо один способ, либо их множество для смены во время работы привода.

**В приложении А** приведены тексты m-файлов на языке Matlab программного комплекса для исследования физических процессов.

**В приложении Б** размещены листинги m-файлов на языке Matlab программного комплекса для построения статических характеристик.



Рис. 13. Блок-схема алгоритма предлагаемой методики

**В приложении В** показаны рассмотренные в работе варианты модели электрической части синхронной машины при возможных схемах соединения секций двухфазного ВД с двухсекционными обмотками.

**В приложении Г** представлены тексты m-файлов с описанием логики работы ЦУУ.

**В приложении Д** приведены исходные коды описания ЦУУ на языке SystemVerilog.

**В приложение Е** включены акты о внедрении результатов работы в учебный процесс кафедры 702 МАИ и на предприятие АО МНПК «Авионика».

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана научно-обоснованная методика определения динамических возможностей привода на базе ДВД с ДО, основанная на секционном подходе к формированию наборов базовых векторов магнитной индукции якоря и автоматизированном построении механических и энергетических характеристик системы «ИУМ — ДВД с ДО» посредством двух программных комплексов, которая позволяет для произвольного коли-

- чества фаз и секций фазных обмоток определять соответствие характеристик техническому заданию.
2. Предложен новый подход, который позволяет исследовать физические процессы и описывать способы формирования наборов БВ на уровне секций фазных обмоток, расширяемый на любое их количество. Показано его применение на примере двухфазного ВД с двухсекционными обмотками.
  3. Созданы математические описания способов формирования наборов БВ ДВД с ДО и ТВД, размещения датчиков Холла и их выходных сигналов, а также управляющих функций ЦУУ, позволяющие исследовать функционирование системы «ИУМ — ВД» в различных режимах работы, которые определяются схемой соединения секций и вариантом их задействования.
  4. Разработана компьютерная модель ММ, содержащего ДВД с ДО, и основанные на ней программные комплексы, для исследования физических процессов в системе «ИУМ — ДВД с ДО» и построения её механических, динамических и энергетических характеристик.
  5. Выявлены взаимосвязи между способами задействования секций обмоток, наборами БВ, статическими и динамическими характеристиками.
  6. Выработаны рекомендации разработчикам приводов: установлено, что большие значения  $\Omega_{\text{ХХ}}$  (от 0,96 до 1,16 в нормализованных единицах) достигаются при параллельных и несоединённых секциях ДВД, а также при схеме «треугольник» ТВД, наименьшие (от 0,41 до 0,56) — при лучевых схемах, промежуточные — при схеме «квадрат» ДВД и «звезда» ТВД. При несоединённых и параллельных секциях время ПП также имеет большие значения (0,5 – 1). Его малые значения достигаются при схеме «квадрат» (0,33), промежуточные (0,35 – 0,63) — при последовательной и лучевых схемах, а также в случае ТВД. Максимальный к. п. д. ДВД ( $\eta \approx 0,9$ ) достигается в случае параллельных, последовательных и несоединённых секций, минимальный ( $\eta \approx 0,75$ ) — при лучевой схеме с общей точкой. У ТВД максимальный к. п. д. ( $\eta \approx 0,87$ ) имеет место при 120-градусной коммутации фаз в случае обеих схем «треугольник» и «звезда», минимальный — ( $\eta \approx 0,75$ ) при схеме «звезда» и 180-градусной коммутации.
  7. Выполнено экспериментальное исследование работы мехатронного модуля, результаты которого подтвердили адекватность его математической модели и достоверность теоретических положений.
  8. Предложенная методика определения динамических возможностей привода и секционный подход могут быть востребованы при выборе схемы соединения секций и варианта задействования фаз или создании алгоритма их переключения непосредственно во время работы привода с целью обеспечения требуемых статических и динамических характеристик.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Кривилев, А. В. Математическое описание функций управления двухфазным вентильным двигателем с двухсекционной фазной обмоткой / А. В. Кривилев, Е. А. Дунич // *Электричество*. – 2021. – № 11. – С. 45-55. – DOI 10.24160/0013-5380-2021-11-45-55.
2. Кривилев, А. В. Формирование и аналитическое описание базовых векторов двухфазного вентильного двигателя с двухсекционной фазной обмоткой / А. В. Кривилев, Е. А. Дунич // *Электричество*. – 2021. – № 10. – С. 31-39. – DOI 10.24160/0013-5380-2021-10-31-39.

### В журналах, индексируемых в системе «Scopus»:

1. Krivilev, A. V. Time response analysis for two-phase PMSM with two-sectional phase windings / A. V. Krivilev, E. A. Dunich // *Journal of Physics: Conference Series* : 11, Moscow, 10–11 dec 2020. – 2021. – P. 012026. – DOI 10.1088/1742-6596/1958/1/012026.
2. Krivilev, A. Techniques of Armature Magnetic Induction Vectors Forming for Two-Phase Four-Sectional Brushless Direct Current Motor / A. Krivilev, E. Dunich, S. Penkin // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2020. – Vol. 1115 AISC. – P. 639-647. – DOI 10.1007/978-3-030-37916-2\_61.
3. Krivilev, A. V. Sectional approach to researching of two-phase BLDC motor / A. V. Krivilev, E. A. Dunich, S. S. Penkin // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Workshop «Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019»*, Krasnoyarsk, 04–06 apr 2019 / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. – P. 62093. – DOI 10.1088/1757-899X/537/6/062093.

### Доклады на конференциях

1. Кривилев, А. В. Математическое описание множеств векторов магнитной индукции якоря двухфазного вентильного двигателя с двухсекционными фазными обмотками / А. В. Кривилев, Е. А. Дунич // *Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов : Сборник докладов XI Международной юбилейной научно-технической конференции, Москва, 10–11 декабря 2020 года*. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Эдитус», 2021. – С. 178-182.
2. Дунич, Е. А. Сравнение кривых разгона двухфазного вентильного двигателя с двухсекционными фазными обмотками / Е. А. Дунич // *Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов : Сборник докладов XI Международной юбилейной научно-технической конференции, Москва, 10–11 декабря 2020 года*. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью «Эдитус», 2021. – С. 183-188.
3. Дунич, Е. А. Программный комплекс для исследования способов управления двухфазным вентильным двигателем на уровне секций фазной обмотки / Е. А. Дунич, А. В. Кривилев // *19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» : Тезисы 19-ой Международной конференции, Москва, 23–27 ноября 2020 года*. – Москва : Изд-во «Перо», 2020. – С. 424-425.

4. Дунич, Е. А. Систематизация способов управления двухфазного вентильного двигателя с четырёхсекционной обмоткой / Е. А. Дунич, А. В. Кривилев, С. С. Пенкин // 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика - 2019» : Тезисы, Москва, 18–22 ноября 2019 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2019. – С. 161-162.
5. Дунич, Е. А. Цифровое устройство управления двухфазным вентильным двигателем / Е. А. Дунич, С. С. Пенкин // XXVIII Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» : сборник трудов, Алушта, 14–20 сентября 2019 года. – Алушта: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» 2019. – С. 94-95.
6. Дунич, Е. А. Методика расчёта статических характеристик двухфазного вентильного двигателя / Е. А. Дунич, А. В. Кривилев, С. С. Пенкин // Авиация и космонавтика - 2018 : Тезисы 17-ой Международной конференции, Москва, 19–23 ноября 2018 года. – Москва: Типография «Люксор», 2018. – С. 382-383.
7. Кривилёв А. В. Секционный подход к получению статических характеристик двухфазного вентильного двигателя / Е. А. Дунич, А. В. Кривилев, С. С. Пенкин // Вопросы инновационного развития аэрокосмического комплекса России : Материалы Первой Общероссийской научно-практической конференции, М.: Издательство «Доброе слово», 2018. – С. 132-137.
8. Дунич Е. А. Автоматизированный подход к получению энергетических характеристик двухфазного вентильного двигателя при управлении с помощью ШИМ-сигнала / Е. А. Дунич, С. С. Пенкин // XXVII Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» : сборник трудов, Алушта, 14–20 сентября 2018 года. – Алушта: Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2018. С. 119-120.
9. Кривилев, А. В. Исследование режимов работы двухфазного вентильного двигателя в течение периода широтно-импульсного сигнала / А. В. Кривилев, Е. А. Дунич, С. С. Пенкин // Авиация и космонавтика - 2017 : тезисы, Москва, 20–24 ноября 2017 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Москва: Типография «Люксор», 2017. – С. 323-324.