

05.09.03 ЭК  
С 181

На правах рукописи

Сандалов Виктор Михайлович

РЕЗЕРВИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ  
НА БАЗЕ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Специальность 05.09.03 –  
«Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ke

Челябинск 2001

Работа выполнена на кафедре «Электрооборудование и автоматизация производственных процессов» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук,  
профессор Воронин С.Г.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор, заслуженный деятель  
науки РФ Гафиятуллин Р.Х.;  
кандидат технических наук  
Ганжа С.А.

Ведущая организация – Государственный научно-производ-  
ственный ракетно-космический центр  
«ЦСКБ-ПРОГРЕСС» (г. Самара).

Защита состоится 31 мая 2001 г., в 10 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 Южно-Уральского государственного университета по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан 25 апреля 2001г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор

Ю.С. Усынин

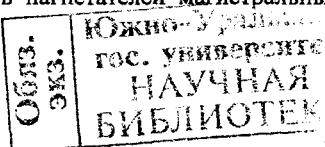
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы** Одной из приоритетных отраслей, определяющих развитие новейших технологий, является космическая техника. К приводам космических летательных аппаратов (КЛА) предъявляются жесткие требования по массоэнергетическим показателям и надежности. Экстремальные условия работы, сложность, а зачастую и невозможность ремонта и обслуживания, высокая цена ошибок объясняют, с одной стороны, повышенный интерес разработчиков КЛА к последним достижениям науки, с другой стороны – здоровый консерватизм при принятии решений.

Количество электродвигателей на борту современных КЛА достигает нескольких сотен. Электроприводы являются наиболее мощными потребителями энергии, и, соответственно, определяют построение и массу системы электропитания, доля которой в общей массе, например, низкоорбитальных космических аппаратов, достигает 20...40%. Требование повышения ресурса современных летательных аппаратов до уровня десятков тысяч часов подразумевает необходимость оптимизации привода по критериям надежности и живучести.

Наиболее конкурентоспособным исполнительным элементом электропривода является вентильный двигатель (ВД), в первую очередь, за счет высокой надежности, а также хороших массоэнергетических и регулировочных показателей. Дополнительное преимущество ВД – широкие возможности для резервирования, которое может выполняться как на уровне элементов, например, троирование ключей, отдельных фаз машины, электрической части, т.е. реализация на базе одного электромеханического преобразователя нескольких электрически независимых двигателей, так и привода в целом.

В настоящее время область применения ВД расширилась от микроприводов аудио- и видеотехники, гироскопов, систем автоматики и станкостроения до сверхмощных приводов нагнетателей магистральных газо- и



нефтепроводов, исполнительных приводов metallургической и горнодобывающей промышленности. Укрепились и позиции ВД в приводах летательных аппаратов и спецтехники.

Этому способствовали теоретические исследования и разработки российских ученых В.А. Балагурова, А.И. Бертинова, И.А. Вевюрко, С.Г. Воронина, А.А. Дубенского, Д.А. Завалишина, Ю.И. Конева, Н.И. Лебедева, В.А. Лифанова, В.К. Лозенко, В.П. Миловзорова, И.Е. Овчинникова, В.Н. Тарасова и др.

На сегодняшний день достаточно полно разработаны вопросы математического моделирования штатных и аварийных режимов работы двух- и трехфазных схем ВД, проектирования электромеханических преобразователей, анализа статических и динамических характеристик двигателей, синтеза систем электропривода с заданными массоэнергетическими показателями.

Однако выбор схемы ВД по критерию надежности в практических разработках используется крайне редко, поскольку теоретические работы в этой области, как правило, сводятся к анализу аварийных режимов и оценке надежности конкретных схем, способы повышения живучести носят характер частных технических решений, отсутствуют обоснованные критерии оценки работоспособности ВД в аварийных режимах, нет сопоставления влияния отказов отдельных элементов на функционирование двигателя при разном построении схем ВД. Следует отметить, что развитие элементной базы и развитие микропроцессорной техники расширяют функциональные возможности системы управления, но соответственно возрастает и количество вариантов схем. Задача проектирования существенно усложняется при учете возможностей резервирования: раздельного или общего, пассивного или активного, функционального и информационного.

Работа выполнялась в соответствии с планом научных исследований Минвуза по направлению 8 проблеме 30 «Разработка и исследование электрических машин, систем автоматики и специальных установок».

Цель работы – повышение надежности электроприводов на базе вентильных двигателей.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- формулировка требований к проектированию, выбор целевой функции, критерия оптимизации и варьируемых параметров;
- анализ принципов построения и разработка классификации схем ВД с точки зрения надежности;
- построение математических моделей для анализа неисправных состояний привода, сравнительная оценка работоспособности схем ВД при отказах отдельных элементов;
- разработка методики расчета надежности резервированных схем многофазных ВД.

Идея работы заключается в том, что разработка проводится в виде решения оптимизационной задачи нелинейного программирования, в которой в качестве исходных данных выступают показатели надежности функциональных блоков ВД, а в качестве целевой функции и основного ограничения используются зависимости показателей надежности и работоспособности схем от количества этих блоков и способа их взаимодействия между собой.

#### Научные положения, разработанные лично соискателем и новизна

1. Применение для анализа неисправных состояний ВД системно-информационного подхода и теории графов позволяет определить общие закономерности поведения схем при отказах отдельных элементов, уточнить принципы рационального резервирования.

2. Предложенная классификация схем и методика расчета моментных характеристик минимизируют математические модели и объем анализа неисправных режимов многофазных ВД.

3. Использование в качестве критерия оценки работоспособности уровня пульсаций момента позволяет выполнить сравнение влияния отказов однотипных элементов на живучесть различных схем ВД, уточнить область

применения схем различных классов, определить методы эффективного повышения живучести и пути рационального резервирования.

4. Методика проектирования резервированных электроприводов на базе ВД, предложенная в виде решения задачи нелинейного программирования, обеспечивает оптимизацию показателей надежности.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждаются корректным использованием известных методов теории систем, теории графов, метода индуктивного анализа аварийных состояний, методов интегрального и дифференциального исчислений, статистического анализа, нелинейного программирования. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена экспериментальными исследованиями, в том числе на базе предприятий «Прогресс» и ЦСКБ г. Самары с использованием методик предприятий.

### **Значение работы**

**Научное значение работы** заключается в развитии теории и методов анализа и синтеза резервированных многофазных схем ВД с учетом требований к построению приводов космических летательных аппаратов по живучести и надежности.

**Практическое значение работы** заключается в разработке методики оптимального проектирования резервированных многофазных схем ВД заданного уровня надежности; сопоставлении поведения в неисправных состояниях схем наиболее распространенных ВД; уточнении области их применения, выделении наиболее опасных отказов элементов.

### **Реализация результатов работы**

Выводы, положения, рекомендации в совокупности с техническими решениями использованы предприятиями ЦСКБ г. Самары, НИИПМ, г. Москва при создании опытных серий бесконтактных электроприводов. После проведения комплексных испытаний концепция построения приводов принята ЦСКБ за базовую в перспективных разработках. Технические решения

и рекомендации применены при разработке конструкторской документации на агрегаты изделий 17Ф12, 17Ф119 и серии нагружающих устройств предприятия ЦСКБ г. Самары, БАРУ-034, КИНДЗ9-001 (ИДВМ) предприятия НИИПМ г. Москвы. Эффективность методики и технических решений подтверждена соответствующими актами внедрения.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были доложены, рассмотрены и получили одобрение на заседаниях: I всесоюзной научно-технической конференции по электромеханотронике (Москва, 1987), всесоюзной научно-технической конференции «Вентильные электромеханические системы с постоянными магнитами» (Москва, 1989), научно-техническом семинаре «Контроль, техническая диагностика и прогнозирование в приборостроении» (Ленинград, 1989), региональной научно-технической конференции «Управляемые электромеханические системы» (Киров, 1990), научно-технической конференции «Электротехнические комплексы автономных объектов» (Москва, 1997), на научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (Златоуст, 1985, 1987, 1995, 1999, 2000, Челябинск, 1989, 1997), на научно-техническом семинаре предприятия ЦСКБ (г. Самара, 1988).

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 8 печатных работах, в том числе 6 статьях и докладах и 2 авторских свидетельствах СССР.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 198 страниц машинописного текста, 17 таблиц, 34 рисунка, список использованной литературы, включающий 163 наименования, 55 страниц приложений.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **Введении** обосновывается актуальность темы, сформулированы задачи исследования, выделена научная и практическая ценность работы.

В **первой главе** рассмотрены особенности построения долгоресурсных

электроприводов КЛА, приведены кинематические схемы отказоустойчивых приводов, рассмотрены возможности резервирования, описаны принцип действия и особенности схем ВД.

В приводах на базе коллекторных двигателей применялось общее резервирование, при этом задачи отключения отказавшего канала и подключения резерва решались с помощью механических дифференциалов и муфт.

В период 1984 – 2000 гг. при участии автора проводился ряд научно-исследовательских работ по рассматриваемой проблеме. В частности, по заказу ЦСКБ г. Самары был разработан и изготовлен моментный вентильный электропривод с электромагнитным суммированием моментов (рис. 1). В качестве исполнительного элемента использовался резервированный ВД А1, состоящий из двух трехфазных электрически независимых двигателей М1 и М2, работающих на один индуктор. Особенность разработки – расширение возможностей резервирования, в частности, активного или пассивного – на уровне отдельных элементов, фазных каналов или электрической части двигателя в целом, функционального и информационного – на уровне взаимодействия элементов схемы управления двигателем.

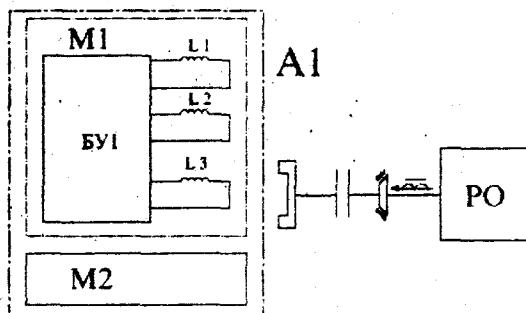


Рис. 1. Схема функциональная резервированного привода 17Ф12:  
БУ1 – блок управления, L1...L3 – фазные обмотки, РО – рабочий орган

Однако расширение возможностей резервирования усложняет и задачу выбора схемы двигателя, числа фаз и кратности резервирования, слабо освещенную в отечественной и зарубежной литературе.

Предложено для анализа неисправных состояний привода использовать системно-информационный подход, выделяя в составе различных схем однотипные блоки и определяя связи между ними в виде графа. Задача разработки сформулирована в виде задачи оптимального проектирования, в которой в качестве варьируемых параметров ВД принят вид схемы, число фаз двигателя, кратность резервирования двигателей, вероятности безотказной работы отдельных блоков схемы, в качестве целевой функции оптимизации – вероятность работоспособности привода или ресурс, а в качестве критерия работоспособности – относительный уровень пульсаций момента:

$$DM(X_i) = (M_i - M_n) / M_i < DM_3 = (M_i - M_c) / M_i$$

где  $M_i$  – средний момент исправного привода;  $M_n$  – момент неисправного привода;  $M_c$  – момент нагрузки,  $DM_3$  – относительный динамический момент или запас по моменту исправного привода.

Момент неисправного привода  $M_n$  определяется в зависимости от условий работы привода: для моментных приводов повторно-кратковременного режима – через минимум неисправного момента  $M_n = M_{n\min}(\Theta)$  ( $\Theta$  – угол поворота ротора) при нулевой частоте вращения, а для приводов длительного режима работы – по среднему значению в пределах электрического оброта  $M_n = M_{n\overline{sp}}(\Theta)$  при рабочей частоте вращения.

Во второй главе проведен анализ построения схем ВД с позиций теории графов и системно-информационного анализа, разработана методика оценки влияния отказов на показатели работоспособности и математические модели для наиболее распространенных схем.

Показано, что традиционная классификация ВД, связанная с построением и количеством отдельных блоков схем, не отражает особенностей взаи-

модействия блоков между собой и не позволяет выявить общие закономерности поведения различных схем в неисправных состояниях.

Если представить ВД в качестве системы передачи информации от датчика положения ротора (ДПР) к фазным обмоткам двигателя, выделив в качестве типовых функциональных узлов элемент ДПР, элемент логического устройства коммутации ЛУ, ключ VT силового инвертора и обмотку фазы LM, то формируются три основных класса ВД (рис. 2): а) с независимыми фазными каналами; б) с взаимосвязанными каналами; в) с памятью.

К первому классу относятся ВД с ДПР на базе индуктивных, гальваномагнитных и фотодатчиков, ЛУ которых представляет собой преобразователь сигнала ДПР фазы в сигнал управления ключами и не связано с ДПР других фаз, а фазы обмотки выполнены либо гальванически-развязанными, либо разомкнутая обмотка запитывается по нереверсивной схеме. Граф двигателя в этом случае соответствует последовательно-параллельной системе.

Второй класс формально получается из первого введением в граф дополнительных связей и соответствует схемам с классическим ДПР, к которым не может быть применен случай 1, в частности, схемы с неполной коммутацией, с реверсивным питанием разомкнутой и замкнутой обмоток, когда силовой инвертор выполнен на базе полумостов и т.д.

В последний объединены схемы с косвенным определением положения ротора, например, по ЭДС вращения секций, когда состояние схемы зависит не только от текущих сигналов, но и от предыдущего состояния, а расчетный график содержит обратные связи.

Предлагаемая классификация позволяет резко упростить анализ пульсаций момента для схем многофазных ВД. Действительно, полагая отказы стационарными, можно в графике ВД выделить дерево влияния любого единичного отказа (на рис. 2 выделены деревья отказа З ЛУ) и рассчитать неисправный момент по выражению (1).

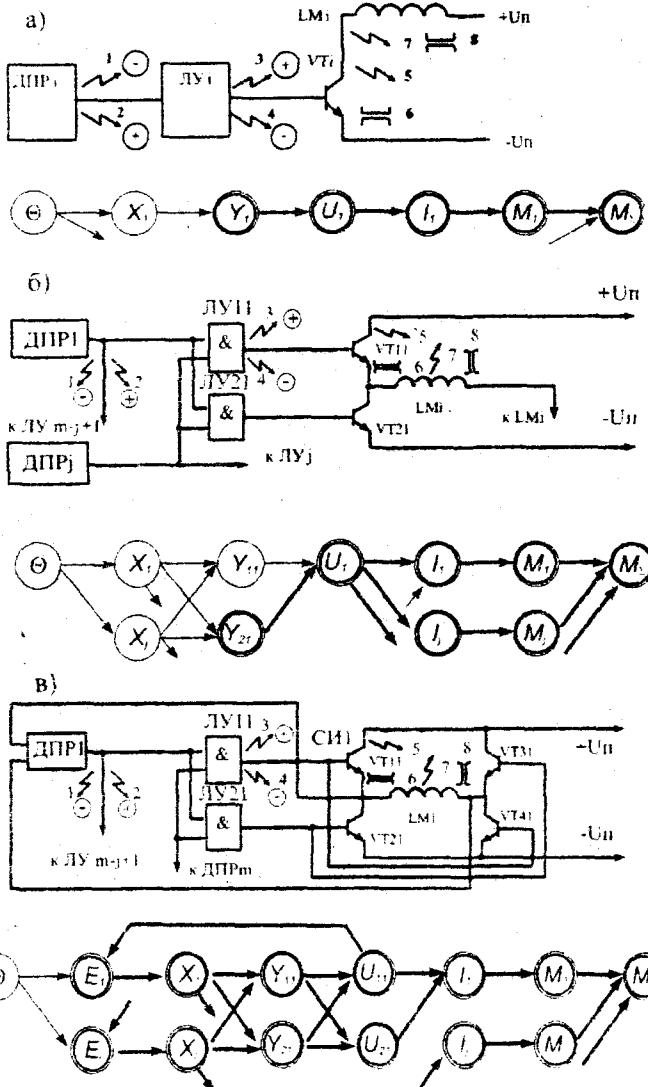


Рис. 2. Функциональные схемы и расчетные графы: ВД: а) с независимыми каналами; б) с взаимным влиянием; в) с памятью (коммутация по ЭДС вращения); 1...8 – отказы элементов

$$M_{n_2}(\Theta) = M_{n_2}(\Theta) - m_i(\Theta) + m_n(\Theta), \quad (1)$$

где  $\Theta$  – угол поворота ротора,  $M_{n_2}(\Theta)$  – полный момент исправного двигателя,  $m_i(\Theta)$  – исправный момент неисправных фаз,  $m_n(\Theta)$  – момент неисправных фаз при отказе.

Разработка математической модели расчета показателей работоспособности предложенным методом сводится к описанию отдельных дуг графа. При расчете угловых моментных характеристик целесообразно использовать относительные единицы, приняв за базовые значения рабочие фазное напряжение и поток, скорость идеального холостого хода, фазные момент и ток короткого замыкания. Расчет фазных токов в схемах с нереверсивным питанием и гальванически развязанными секциями удобно проводить непосредственным решением уравнений Кирхгоффа, в схемах с разомкнутой обмоткой – методом узловых потенциалов.

Например, следующая система уравнений соответствует графу схемы с независимым построением каналов (рис. 2,а):

$$X_i = \text{SIGN}[\sin(\theta + \phi_i)]$$

$$Y_i = X_i$$

$$U_i = Y_i$$

$$I_i = U_i - E_i$$

$$E_i = w \cdot \sin(\theta + \phi_i)$$

$$m_i = I_i \cdot \sin(\theta + \phi_i),$$

где  $\phi_i$  – угол коммутации;  $\text{SIGN}(a) = 1$  при  $(a) > 0$ ,  $\text{SIGN}(a) = 0$  при  $(a) < 0$ ;  $E_i$  – ЭДС вращения коммутируемой секции;  $w$  – частота вращения.

Полный момент двигателя определяется суммированием моментов фаз. В случае отказа элемента соответствующая переменная первого фазного канала принимается постоянной, например, при выделенном отказе ЛУ  $Y1 = 1$ .

В третьей главе приведены результаты расчета пульсаций пускового  $DM_{pi}$  и среднего  $DM$  моментов для восьми вариантов наиболее распространенных

ненных схем ВД при вариации числа фаз от трех до девятнадцати. Принято, что распределение индукции в зазоре синусоидальное, коммутация фаз в исправном состоянии нейтральная, реакция якоря отсутствует. В схемах с независимым построением каналов управления рассматривались два варианта длительности подключения фаз –  $180^\circ$  и «усеченная», когда в реверсивных схемах в любой момент времени от источника питания отключена одна фаза при нечетном числе фаз и две – при четном. С учетом организации коммутации проведена оценка работоспособности одиннадцати вариантов исполнения схем ВД. Результаты могут быть представлены в виде угловых моментных характеристик в неисправных состояниях (рис. 3), таблиц или графиков зависимостей уровня пульсаций от числа фаз, однако при решении задач оптимизации надежности удобнее использовать аппроксимацию.

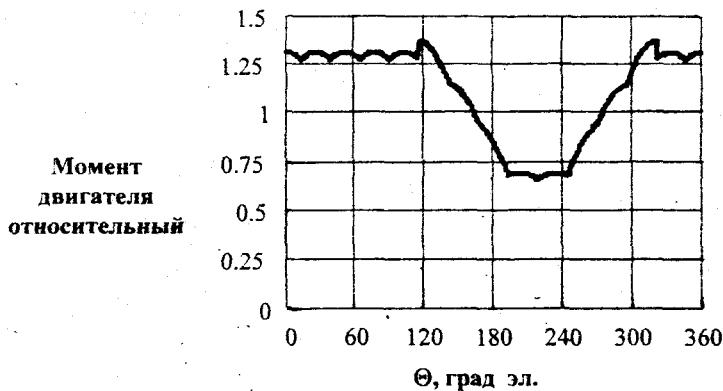


Рис. 3. Пусковая угловая моментная характеристика семифазного двигателя с разомкнутой обмоткой при коротком замыкании ключа

Наилучшую точность с оценкой по методу наименьших квадратов не ниже 0,9 дает аппроксимация вида:  $DM = A / m^B$ , где  $A, B$  – коэффициенты аппроксимации,  $m$  – число фаз двигателя.

Коэффициенты аппроксимации рассчитаны для одиннадцати вариантов исполнения ВД раздельно для пульсаций пускового и среднего момента при четном и нечетном числе фаз. В качестве примера в таблице и на рис. 5 приведено соотношение пульсаций пускового момента, рассчитанное по аппроксимирующим функциям при  $m = 7$  для схем рис. 2.

По результатам расчетов сформулированы инженерные рекомендации по повышению живучести схем разных классов, определены способы рационального резервирования и области применения схем. в частности, следует признать, что использование косвенного способа определения положения ротора в сочетании с «эстафетным» принципом управления резко повышает чувствительность схемы к отказам элементов.

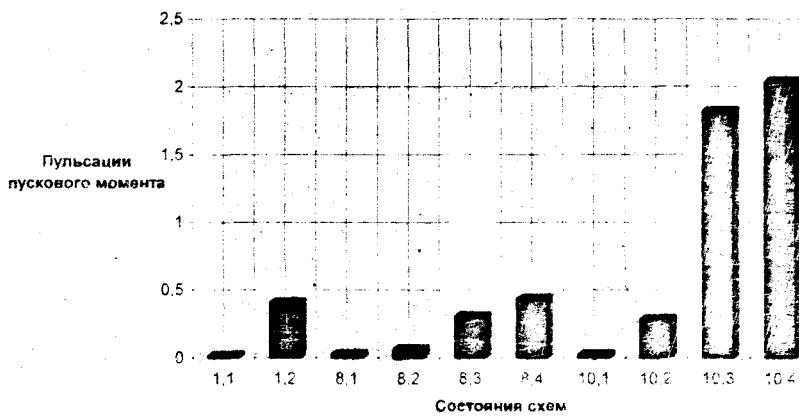
В четвертой главе приведены методика оптимального проектирования резервированного привода на базе ВД и пример оптимизации схемы на базе двенадцатисекционного электромеханического преобразователя при вариации числа фаз и кратности резервирования. Методика включает следующие этапы: 1) выбор необходимого запаса по моменту привода с учетом требования поддержания работоспособности при единичном отказе любого элемента по рассчитанным аппроксимирующим функциям; 2) выбор элементной базы, разработка принципиальных схем функциональных блоков и расчет вероятностей возникновения отказов блоков и двигателей; 3) разделение неисправных состояний схемы на работоспособные и неработоспособные с учетом уровня пульсаций момента; 4) расчет вероятностей неисправных работоспособных состояний привода, определение вероятности работоспособности и ресурса привода, выбор оптимального варианта; 5) при необходимости – принятие решений по резервированию с повторением расчета.

Расчет работоспособности резервированного привода в случае отказов нескольких элементов в разных каналах производился при наихудшем сочетании единичных отказов двигателей, когда пульсации суммируются.

Таблица

## Соотношение пульсаций пускового момента

Название схемы	Состо яние	Отказы	Пульсации $DMn(7)$
Нереверсивная (рисунок 2, а)	1.1	Исправное	0.02
	1.2	Все отказы	0.41
С разомкнутой обмоткой (рисунок 2, б)	8.1	Исправное	0.03
	8.2	Короткое замыкание фазы	0.07
	8.3	ЛУ "-", обрыв ключа, обрыв фазы	0.31
	8.4	ЛУ "+", короткое замыкание ключа, отказ ДПР	0.44
Реверсивная с коммутацией по ЭДС вращения (рисунок 2, в)	10.1	Исправное	0.03
	10.2	Обрыв ключа	0.29
	10.3	Отказ ДПР, ЛУ "-", отказ фазы	1.82
	10.4	ЛУ "+", короткое замыкание ключа	2.04

Рис. 5. Соотношение пульсаций момента при  $m = 7$ 

0301424

Расчет вероятности работоспособности привода  $P_{\text{н}} = 1 - Q_{\text{н}}$  производится по вероятностям работоспособного  $P_{\text{и}}$  и неработоспособного состояний  $Q_{\text{д}j}$  отдельного двигателя, например, вероятность неработоспособности привода:

$$Q_{\text{н}} = \sum_{j=1}^t C_N^{k(j)} \cdot (Q_{\text{д}j})^{k(j)} \cdot (P_{\text{д}})^{N-k(j)},$$

где  $N$  – кратность резервирования;  $j = 1 \dots t$  – вид неисправности двигателей, приводящих к потере работоспособности привода;  $k(j)$  – число двигателей в неисправном состоянии  $j$ ;  $C_N^{k(j)}$  – число сочетаний из  $N$  по  $k(j)$ .

Результаты расчетов показывают, что схемы с взаимосвязанными каналами за счет увеличения числа неисправных работоспособных состояний имеют более высокие показатели надежности. Так, оптимальный расчетный вариант с дублированием шестифазных двигателей, разомкнутой обмоткой и «усеченной» коммутацией имеет наработку на отказ 11080 ч., а двенадцатифазный нерезервированный при той же схеме и одинаковом числе элементов – 136 ч.

В пятой главе приведены результаты экспериментальных исследований и примеры практической реализации приводов на базе ВД с учетом надежности. Так, в процессе выполнения НИР «Разработка и исследование вентильных электроприводов» по заказу предприятия НИИПМ г. Москвы была разработана и выпущена опытная партия вентильных двигателей с коммутацией по ЭДС вращения привода насоса системы гидростабилизации, по заказам ЦСКБ г. Самары – опытная партия резервированных ВД с ДПР на базе датчиков Холла приводов крышек специаппаратуры, солнечных батарей, которая, после проведения ресурсных испытаний, была рекомендована в качестве базовой в перспективных разработках ЦСКБ для приводов КЛА. По заказам предприятия «Прогресс», г. Самары изготовлена серия нагружающих устройств для испытаний бортовых приводов, в том числе с микропроцессорным управлением.

## **Заключение**

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научно-технической задачи синтеза резервированных электроприводов на базе многофазных вентильных двигателей с учетом требований живучести и надежности, в процессе решения которой:

1. Показано, что использование для анализа неисправных состояний схем ВД системно-информационного подхода и теории графов позволяет определить общие закономерности поведения схем в неисправных состояниях, оценить влияние отказов отдельных элементов на показатели работоспособности и надежности, резко сократить объем расчетов.
2. Предложена классификация схем и минимизирована методика расчета моментных характеристик многофазных машин в аварийных режимах. Разработаны математические модели наиболее распространенных схем ВД.
3. Обосновано использование в качестве критерия оценки работоспособности относительного уровня пульсаций момента, выполнено сравнение влияния единичных отказов на живучесть различных схем вентильных двигателей, уточнена область их применения, определены пути рационального резервирования.
4. Предложена методика оптимального проектирования резервированных электроприводов с учетом надежности в виде решения задачи нелинейного программирования, определены критерии оптимизации, ограничения и объем вариации параметров схем.
5. Выделены функциональные блоки, определяющие показатели надежности наиболее распространенных схем, сформулированы требования к построению схем функциональных блоков.
6. Показано, что функциональное резервирование в схемах с взаимосвязанными каналами обеспечивает значительное повышение живучести.
7. Внедрение результатов работы подтверждает эффективность предложенных методик расчета и проектирования резервированных электроприводов на базе многофазных вентильных двигателей.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. А.С. 1280687(СССР), МКИ Н 02 К 29/06, Н 02 Р 6/00. Вентильный электродвигатель / А.Н. Корабельников, В.М. Сандалов, А.Н. Солодников, А.П. Мезенцев, Г.Л. Калашников. – Б.И. – 1986 – N 48.
2. А.С.1387121(СССР), МКИ Н 02 К 29/00, Н 02 Р 6/00. Вентильный электропривод / А.Н. Корабельников, С.Г. Воронин, А.Ю. Мурzin, В.М. Сандалов. – Б.И. – 1988 – N 13.
3. Андрианова Р.А., Воронин С.Г., Сандалов В.М. Вероятности безотказной работы многосекционных вентильных двигателей // Вентильные электромеханические системы с постоянными магнитами: Тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции. – М., 1989.
4. Воронин С.Г., Корабельников А.Н., Мурzin А.Ю., Сандалов В.М. Особенности управления коммутацией по ЭДС вращения вентильных двигателей // I Всесоюзная научно-техническая конференция по электромехатронике: Тезисы докладов. – Л., 1987.
5. Сандалов В.М., Ермашова Ю.С., Крадинова Е.Ю. Живучесть вентильных двигателей // Тематический сборник научных трудов ЗФ ЮУрГУ. – Челябинск: ЧГТУ, 1997.
6. Сандалов В.М., Воронин С.Г. Анализ последствий отказов элементов в схемах вентильных двигателей // Управляемые электромеханические системы: Тезисы докладов к региональной научно-технической конференции. – Киров, 1990.
7. Сандалов В.М. Последствия отказов элементов в схемах вентильных двигателей // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: Сб. науч. тр. – Челябинск, ЧГТУ, 1995.

8. Сандалов В.М. Сравнительная оценка надежности схем вентильных двигателей // Электротехнические комплексы автономных объектов: Тезисы докладов научно-технической конференции. – М.: МЭИ, 1997.

Сандалов  
Виктор Михайлович

**Сандалов Виктор Михайлович**  
**РЕЗЕРВИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ**  
**НА БАЗЕ ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.09.03 –  
«Электротехнические комплексы и системы»  
**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного  
университета.

---

ИД № 00200 от 28.09.99. Подписано в печать 17.04.2001. Формат 60\*84 1/16.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1. Тираж 70 экз. Заказ 116/183.  
УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.