

Периодический рецензируемый научно-технический журнал «Электроника и электрооборудование транспорта» является коллективным членом Академии электротехнических наук РФ.

Учредитель и издатель – Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод».

Журнал включен в перечень изданий, рекомендованных ВАК для апробации кандидатских и докторских диссертаций.

Свидетельство о регистрации СМИ
ПИ №ФС 77-29963
от 17 октября 2007 г.

Главный редактор:
А.Г. Бабак, к.т.н.

Редакционный совет:

М.П. Бадер, д.т.н., профессор
В.Я. Беспалов, д.т.н., профессор
А.С. Веденеев, д.ф.-м.н., доцент
Л.А. Герман, д.т.н., профессор
Ю.М. Иньков, д.т.н., профессор
В.В. Калугин, д.т.н., доцент
А.А. Ковалев, д.т.н.
К.Л. Ковалев, д.т.н., доцент
В.Н. Козловский, д.т.н., доцент
А.С. Космодамианский, д.т.н., профессор
А.И. Попов, д.т.н., профессор
В.Т. Пенкин, д.т.н., доцент
С.Т. Рембеза, д.ф.-м.н., профессор
В.И. Сарбаев, д.т.н., профессор
М.В. Шевлюгин, д.т.н., доцент
В.Е. Ютт, д.т.н., профессор

Выпускающий редактор:
Н.А. Климчук

Редакция:

140070, Московская область,
Люберецкий район, п. Томилино,
ул. Гаршина, д. 11.
Тел./факс: (495) 500-40-20
E-mail: npptez@mail.ru
Сайт: www.npptez.ru

Подписано в печать: 5.02.2019 г.

Отпечатано:

ГУП МО «Коломенская типография».
140400, г. Коломна,
ул. III Интернационала, д. 2а.
E-mail: bab40@yandex.ru

Формат 60x90/8,
бумага мелованная, объем 7 п.л.,
тираж 1000 экз., заказ

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Коняхин С.Ф., Коняхин В.С.

Автотрансформаторно-выпрямительные устройства
в системах электроснабжения летательных аппаратов.
Трехфазный уравнивательный трансформатор. Часть 2 2

Чернышева Ю.В., Горский А.Н., Середа А.Г.

Эффект Зоммерфельда и динамика вагонов. 8

Терешкин В.М.

Обобщенное представление фазного напряжения
многофазного преобразователя 11

Серебряков А.С., Герман Л.А., Осокин В.Л.

Исследование динамических режимов работы переключаемой
фильтрокомпенсирующей установки 15

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Власов А.И., Кобышев Д.В., Коротков И.В.

Учет постоянной времени нагрева при разработке электростартера
для запуска газотурбинных установок 20

Белоусов И.В., Гельвер Ф.А., Самосейко В.Ф.

Робастные алгоритмы управления реактивным электродвигателем
с анизотропной магнитной проводимостью ротора 24

ДИАГНОСТИКА И ИСПЫТАНИЯ

Баженов Ю.В., Каленов В.П.

Техническое обслуживание электронных систем
управления двигателем 30

Козловский В.Н., Новикова А.П., Пьянов М.А., Дебелов В.В.

Экспериментальные исследования электротехнического
производственного комплекса диагностики электрооборудования
автомобилей 34

Уваров И.А., Попов Ю.В.

Диагностика технического состояния рулевого привода
системы управления воздушного судна по параметрам
передаточной функции 40

ИНФОРМАЦИЯ

Перечень статей, опубликованных в журнале
«Электроника и электрооборудование транспорта» в 2018 году 44

Автотрансформаторно-выпрямительные устройства в системах электроснабжения летательных аппаратов. Трехфазный уравнивательный трансформатор. Часть 2

// Autotransformer-rectifier units in aircraft electric power supply systems. Three-phase interphase transformer. Part 2 //

Коняхин С.Ф., к.т.н.,
Коняхин В.С., к.т.н.,
АО «Аэроэлектромаш», Москва

Рассмотрена работа трехфазных уравнивательных трансформаторов в АТВУ с 18-пульсным выпрямлением. Определены габаритные мощности и выведены формулы расчета числа витков обмоток УТ для АТВУ с равномерной и неравномерной девятифазными системами напряжений.

Ключевые слова: АТВУ, равномерная и неравномерная девятифазные системы напряжений, 18-пульсное выпрямление, уравнивательный трансформатор, габаритная мощность.

Настоящая статья является продолжением рассмотрения автотрансформаторных устройств (АТВУ) с девятифазным преобразованием, содержащих в своем составе трехфазные уравнивательные трансформаторы (УТ), начатого в работе [1], в которой на примере лучевой шестифазной схемы выпрямления подробно описан принцип действия УТ и его влияние на работу многоканальных выпрямителей.

АТВУ – один из важнейших агрегатов системы электроснабжения современного летательного аппарата (ЛА), поэтому исследование проводится с точки зрения именно бортовой электроэнергетики.

Трехфазный уравнивательный трансформатор

Представляет собой трехфазный магнитопровод с тремя одинаковыми, имеющими равное число витков и намотанными согласно, обмотками. Одни из одноименных концов обмоток соединены друг с другом и образуют общий вывод для подключения к нагрузке, к другим концам подключают выходы выпрямителей (рис. 1).

Принципы действия описанных в [1] двухфазного и трехфазного уравнивательных трансформаторов одинаковы, но

The operation of interphase transformer in ATRU with eighteen-pulse rectification is described. Main calculating formulas and KVA-ratings considered IPT for ATRUs with regular and irregular nine-phase voltages systems are determined.

Keywords: ATRU, regular and irregular nine-phase voltages systems, eighteen-pulse rectification, interphase transformer, KVA-ratings.

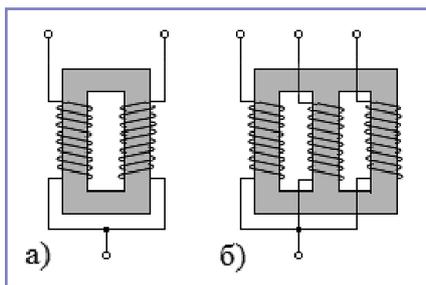


Рис. 1. Устройство двухфазного (а) и трехфазного (б) уравнивательных трансформаторов

работа последнего значительно менее очевидна, и по этой причине подробное рассмотрение работы УТ в 18-пульсных схемах выпрямления можно считать вполне уместным. При исследовании будем исходить из предположения, что свойства девятифазных систем напряжения, формируемых автотрансформаторными узлами, отношения чисел витков обмоток которых в точности соответствуют соотношениям, выведенным в работах [2, 3] без округления на уровне 2–3-го знака после запятой, не зависят от вида их топологических структур. Это дает возможность абстрагироваться от конкретных конфигураций АТ и при анализе заменить их набором гальванически связанных источников, образующих равномерную 40-градусную или неравномерную 20-градусную идеальную девятифазную систему напряжений.

Рассмотрим схему с идеальной однофазной системой напряжений, разделенным выпрямителем и одним трехфазным уравнивательным трансформатором (рис. 2). Девятифазная система

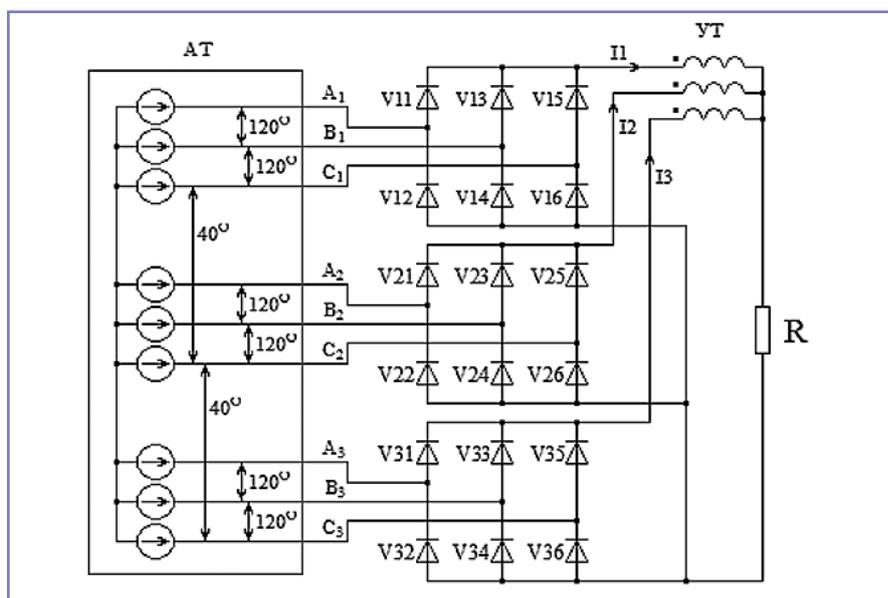


Рис. 2. АТВУ с однородной 40-градусной девятифазной системой напряжений, разделенным выпрямителем и одним трехфазным уравнивательным трансформатором

разбита на три трехфазные группы, последовательно сдвинутые относительно друг друга на угол 40° , напряжения каждой группы поступают на трехфазные мостовые выпрямители, анодные цепи которых соединены друг с другом непосредственно, а катодные – через обмотки УТ. Выходное напряжение подается на нагрузку R .

Несмотря на структурную простоту схемы, аналитическое описание протекающих в ней процессов – задача весьма нетривиальная, и при их описании и анализе будем пользоваться данными, полученными *a posteriori* – как продукт имитационного компьютерного моделирования (ИКМ) – мощного современного исследовательского инструмента, оптимально приспособленного для решения подобного рода задач.

Результаты моделирования показывают следующее.

Средние значения токов обмоток уравнительного трансформатора одинаковы и равны одной трети от тока нагрузки. На каждом цикле повторяемости процессов, равном периоду напряжения питания, схема последовательно через временные интервалы продолжительностью $\pi/9$ (или 20°) принимает 18 отличающихся друг от друга состояний, характеризующихся позициями открытых на этих интервалах диодов выпрямительных мостов. Диаграмма состояний схемы представлена в таблице 1.

На каждом интервале в проводящем состоянии находятся по три

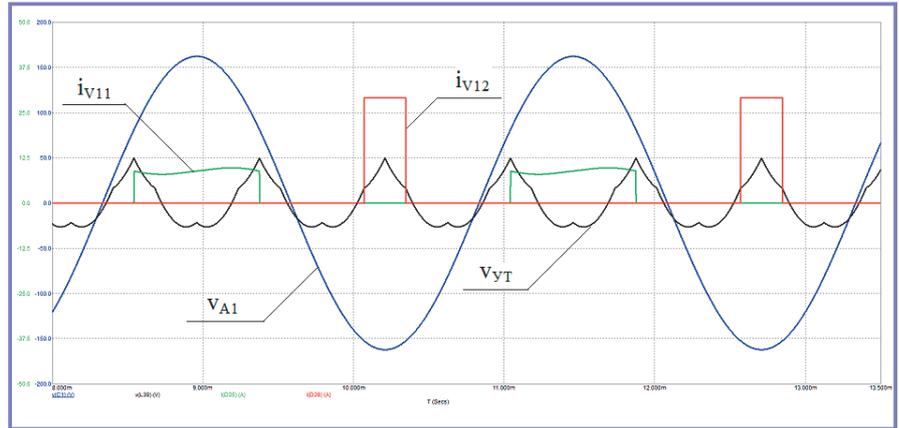


Рис. 3. Фазное напряжение v_{A1} , токи i_{V11} , i_{V12} диодов V11 и V12 и напряжение v_{UT} на обмотке уравнительного трансформатора в схеме на рис. 2

«верхних» диода выпрямительных мостов, через которые токи источников вытекают в нагрузку, и только один «нижний», через который они возвращаются. Например, на интервале 5 ($4\pi/9-5\pi/9$) токи, вытекающие из фаз A1, C2 и C3 через диоды, соответственно, V11, V25 и V35, через диод V34 втекают в фазу B3, а на интервале 6 ($5\pi/9-6\pi/9$) те же токи, вытекающие от тех же фаз через те же диоды, втекают уже через диод V14 в имеющую наименьший на данный момент потенциал фазу B1 и т.д. За один цикл угол проводимости диодов катодных групп («верхних») составляет $2\pi/3$ (120°), диодов анодных групп («нижних») – $2\pi/9$ (40°). Средние на интервалах проводимости значения токов «верхних» диодов втрое ниже токов «нижних» диодов (рис. 3).

Поскольку все обмотки уравнительного трансформатора сведены в одну точку, а все анодные цепи выпрямительных мостов объединены, в любой момент времени на любом интервале к нагрузке прикладываются равные друг другу напряжения трех параллельных ветвей, образованные обмотками УТ и максимальными на данном интервале линейными напряжениями многофазной системы источников электроэнергии. Например, на интервале 2 ($\pi/9-2\pi/9$) такими напряжениями являются $V_{A1B3'}$, $V_{A2B3'}$, $V_{A3B3'}$ на интервале 3 ($2\pi/9-3\pi/9$) – $V_{A1B3'}$, $V_{A2B3'}$, $V_{C3B3'}$, а на интервале 4 ($3\pi/9-4\pi/9$) – $V_{A1B2'}$, $V_{A2B2'}$, V_{C3B2} в соответствии с векторной диаграммой на рис. 4а. Каждая тройка имеет два «больших» напряжения и одно «маленькое». «Большие» линейные напряжения образованы фазными напряжениями, расходящимися на угол 160° [4] (в нашем примере это V_{A2B3} и $V_{A3B3'}$, V_{A1B3} и $V_{A2B3'}$ и V_{A1B2} и V_{C3B2}), «маленькие» – на угол 120° (V_{A3B3} , V_{C3B3} и $V_{A2B2'}$). Очевидно, что доля и знак «добавки», вносимой обмотками УТ в напряжения формируемых выпрямительных ветвей для их уравнивания, будет разной – в ветвь с минимальным на данный момент линейным напряжением вклад будет максимальным. Отсюда и несимметрия по форме и времени полуволн напряжения на обмотках уравнительного трансформатора (рис. 3). Как и в рассмотренном выше примере двухфазной системы, частота напряжения на обмотках трехфазного УТ втрое выше частоты питающего напряжения.

Рассмотренное устройство не имеет технического смысла, поскольку при реконфигурации АТВУ с однородной девятифазной системой напряжений с введением одного трехфазного УТ

Таблица 1. Диаграмма состояний выпрямителей АТВУ с равномерной девятифазной системой напряжений и одним трехфазным уравнительным трансформатором

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
V11	A1↑																		
V12	A1↓																		
V13	B1↑																		
V14	B1↓																		
V15	C1↑																		
V16	C1↓																		
V21	A2↑																		
V22	A2↓																		
V23	B2↑																		
V24	B2↓																		
V25	C2↑																		
V26	C2↓																		
V31	A3↑																		
V32	A3↓																		
V33	B3↑																		
V34	B3↓																		
V35	C3↑																		
V36	C3↓																		

Примечание. Символ ↑ означает, что ток вытекает из соответствующей фазы, символ ↓ – втекает

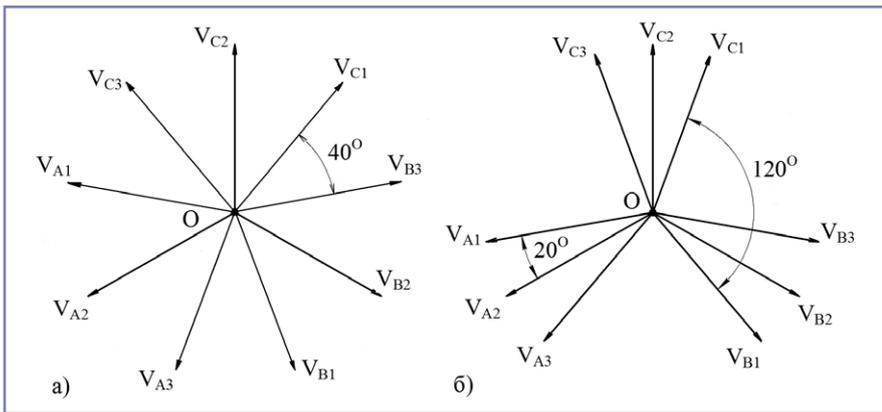


Рис. 4. Девятифазные системы напряжений: равномерная 40-градусная (а) и неравномерная 20-градусная (б)

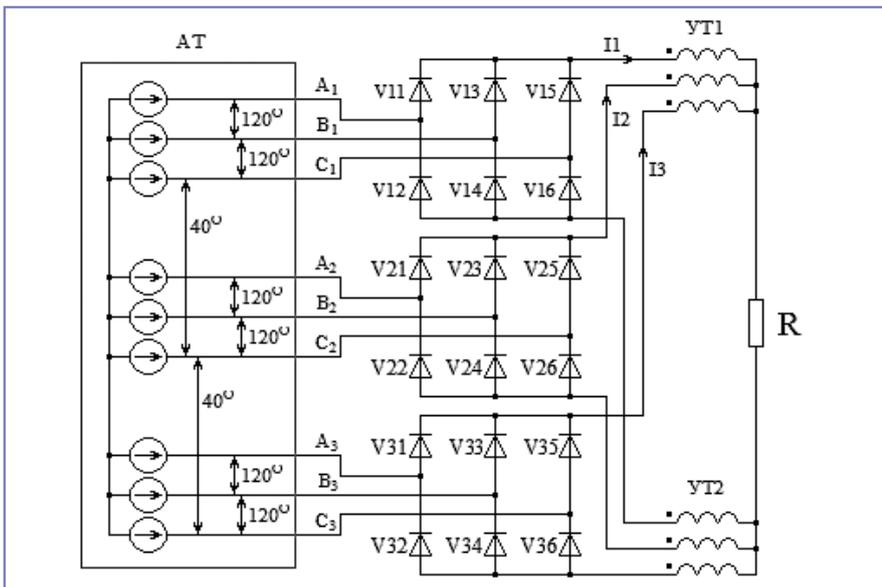


Рис. 5. АТБУ с однородной девятифазной системой напряжений, разделенным выпрямителем и двумя трехфазными уравнительными трансформаторами

Таблица 2. Диаграмма состояний выпрямителей АТБУ с равномерной девятифазной системой напряжений и двумя трехфазными уравнительными трансформаторами

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
V11	A1↑																		
V12	A1↓																		
V13	B1↑																		
V14	B1↓																		
V15	C1↑																		
V16	C1↓																		
V21	A2↑																		
V22	A2↓																		
V23	B2↑																		
V24	B2↓																		
V25	C2↑																		
V26	C2↓																		
V31	A3↑																		
V32	A3↓																		
V33	B3↑																		
V34	B3↓																		
V35	C3↑																		
V36	C3↓																		

Примечание. Символ ↑ означает, что ток вытекает из соответствующей фазы, символ ↓ — втекает

нарушаются симметрия и равномерность его работы без достижения какого-либо ощутимого положительного результата. Но, тем не менее, на примере этой схемы оказалось очень удобным показать не вполне очевидную на первый взгляд работу трехфазного уравнительного трансформатора в многопульсных выпрямителях и его влияние на протекающие в них процессы.

Введение второго уравнительного трансформатора в анодные цепи выпрямителей (рис. 5) существенным образом изменяет картину. Диаграмма состояний схемы представлена в таблице 2. В отличие от предыдущего случая, здесь на каждом интервале в каждом мосте всегда открыты по три «верхних» и по три «нижних» диода. Второй уравнительный трансформатор, в соответствии с заложенным в нем равенством витков обмоток, алгоритмом эффективно изменяет конфигурации выпрямительных ветвей, напряжения которых теперь состоят из трех составляющих (соответствующее линейное напряжение и напряжения на обмотках двух последовательно включенных УТ), разводя ток, вытекающий из нагрузки, по всем выпрямительным мостам. За один цикл угол проводимости каждого диода составляет $2\pi/3$ (120°). Средние на интервалах проводимости значения токов всех диодов одинаковы (рис. 6) и равны трети тока нагрузки.

Напряжения $v_{УТ40}$ на обмотках уравнительных трансформаторов одинаковы и имеют сложную, несимметричную как по полупериодам, так и по величине и виду положительной и отрицательной полуволн форму. Полуволны имеют равные вольт-секундные площади. Действующее значение $V_{УТ40}$ составляет 0,213 от действующего значения напряжения питания V , частота $f_{УТ}$ втрое выше частоты напряжения питания f , а средний постоянный ток через обмотку УТ $I_{УТ}$ равен трети тока нагрузки. Выходное напряжение устройства V_{d40} при питании от трехфазной сети 115 В равно 267,3 В, что соответствует 2,324V и практически совпадает со значением шестипульсного выходного напряжения трехфазного моста Ларионова (2,34V). Эти данные позволяют определить относительную габаритную мощность уравнительного трансформатора [1, 2], которая, опустив вычисления, равна $p'_{УТ40} = 0,0153$. Соответственно, суммарная относительная габаритная

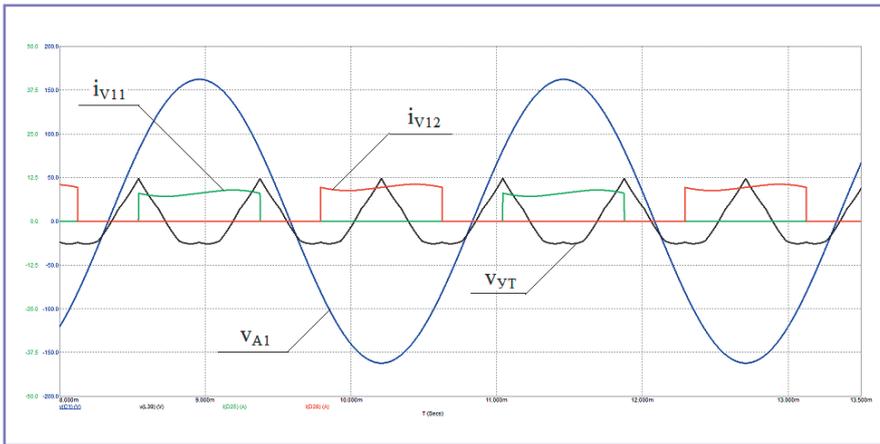


Рис. 6. Фазное напряжение v_{A1} , токи i_{V11} , i_{V12} диодов V11 и V12 и напряжение v_{UT20} на обмотке уравнивающего трансформатора УТ1 в схеме на рис. 5.

мощность двух уравнивательных трансформаторов $p'_{\Sigma(UT40)} = 2p'_{(UT40)} = 0,0306$.

Рассмотрим теперь работу трехфазных уравнивательных трансформаторов в АТВУ с неравномерной 20-градусной идеальной девятифазной системой напряжений (рис. 4б). По понятным причинам устройства, содержащие только один УТ, рассматриваться не будут. Схемная конфигурация исследуемого АТВУ и диаграмма состояния его выпрямителей не отличаются от описывающих равномерную 40-градусную систему (рис. 5, таблица 2). Отличаются лишь значения напряжений, составляющих полное напряжение выпрямительных ветвей, и углы между соответствующими трехфазными системами.

За один период напряжения питания угол проводимости каждого диода выпрямителей составляет $2\pi/3$ (120°).

Средние на интервалах проводимости значения токов всех диодов одинаковы и равны трети тока нагрузки, средние значения токов через обмотки уравнивательного трансформатора I_{UT} также одинаковы и также равны трети тока нагрузки.

Как и в рассмотренном выше случае равномерной девятифазной системы, напряжения на обмотках уравнивательных трансформаторов имеют сложную, несимметричную как по величине и виду положительной и отрицательной полуволн, так и по их длительности в пределах периода форму. Полуволны каждого из напряжений имеют равные вольт-секундные площади, их частота в три раза превышает частоту питающей сети. Выходное напряжение устройства V_{d20} при питании от трехфазной сети 115 В совпадает со значением V_{d40} и составляет 267,3 В, что соответствует 2,324V.

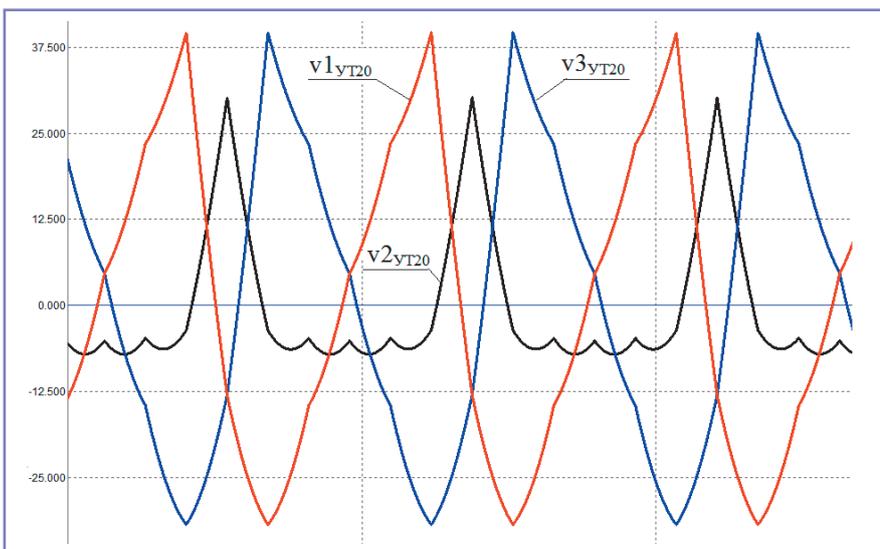


Рис. 7. Напряжения на обмотках уравнивательных трансформаторов АТВУ с девятифазной неравномерной 20-градусной системой напряжений, соответствующие опережающей ($v1_{UT20}$), «нулевой» ($v2_{UT20}$) и отстающей ($v3_{UT20}$) фазным группам. Напряжения $v1_{UT20}$ и $v3_{UT20}$ зеркальны по отношению друг к другу

Если трехфазную систему напряжений (фазную группу) А2-В2-С2 условно считать имеющей нулевой сдвиг, то по отношению к ней система А1-В1-С1 окажется опережающей, а система А3-В3-С3 – отстающей. Напряжения $v1_{UT20}$ и $v3_{UT20}$ на обмотках УТ, соответствующие опережающей и отстающей группам, имеют одинаковые, но зеркальные по отношению друг к другу формы и равные действующие значения $v1_{UT20} = v3_{UT20}$, составляющие 0,19 от действующего значения напряжения питания V . Напряжение $v2_{UT20}$ на «нулевой» обмотке по форме существенно образом отличается от напряжений $v1_{UT20}$ и $v3_{UT20}$ (рис. 7), его действующее значение равно $V2_{UT20} = 0,09V$.

Имея среднее значение токов I_{UT} ($I1_{UT20} = I2_{UT20} = I3_{UT20}$), действующие значения напряжений $V1_{UT20}$, $V2_{UT20}$ и $V3_{UT20}$ и коэффициент приведения частоты $K_f = f_{UT}/f = 3$, можно определить относительную габаритную мощность УТ, которая, опуская арифметические вычисления, равна $p'_{UT20} = 0,0112$. Суммарная относительная габаритная мощность двух уравнивательных трансформаторов $p'_{\Sigma(UT20)} = 2p'_{(UT20)} = 0,0224$.

Расчет трехфазного уравнивательного трансформатора

В большинстве случаев расчет какого-либо электромагнитного элемента (трансформатора, автотрансформатора, обмотки двигателя или генератора и др.) имеет целью, исходя из некоторой совокупности исходных данных (напряжение, частота, свойства и конфигурация магнитопровода, площадь его сечения, магнитная индукция и пр.), определить число витков конкретной обмотки или катушки, обеспечивающее правильную работу устройства.

Если к обмотке с числом витков W приложено напряжение $v(t)$, то по закону электромагнитной индукции Фарадея в ней наводится электродвижущая сила (ЭДС) $e(t)$, равная $e = -d\psi/dt$, где ψ – потокосцепление, определяемое как $W \cdot \Phi$ (Φ – магнитный поток в магнитопроводе, равный произведению площади сечения магнитопровода S на магнитную индукцию b). Тогда без учета знака, поскольку нас интересуют прежде всего количественные соотношения, и, пренебрегая активным сопротивлением обмотки, имеем:

$$v(t) = \Phi \frac{dW}{dt} = WS \frac{db}{dt} \quad (1)$$

или

$$\int \frac{v(t)}{WS} dt = \int db. \quad (2)$$

В установившемся режиме работы обмотки за время t_n одной полуволны напряжения $v(t)$ значение индукции в магнитопроводе меняется от некоторого заранее определенного значения $-B$ до $+B$ (или наоборот), тогда:

$$\frac{1}{WS} \int_0^{t_n} v(t) dt = 2B. \quad (3)$$

Таким образом, при заданных $v(t)$, t_n , B и S число витков W определяется выражением

$$W = \frac{\int_0^{t_n} v(t) dt}{2BS}, \quad (4)$$

но на интервале t_n :

$$\int_0^{t_n} v(t) dt = V_{CP} t_n. \quad (5)$$

Эту величину принято называть вольт-секундным интегралом, или вольт-секундами. Тогда

$$W = \frac{V_{CP} t_n}{2BS}. \quad (6)$$

Определим с помощью формулы (6) число витков W_{40} обмоток трехфазного УТ АТВУ с равномерной девятифазной системой напряжений. Будем считать площадь поперечного сечения магнитопровода S и рабочее значение магнитной индукции B заданными и одинаковыми для всех рассматриваемых ниже случаев. Все используемые в дальнейшем численные значения напряжений и временных интервалов получены с помощью ИКМ, исходя из напряжения питания с действующим значением $V = 115$ В частотой $f = 400$ Гц.

На рис. 8 приведено напряжение $v_{УТ40}$ на обмотке трансформатора с указанием мгновенных и средних значений во всех характерных точках и на всех временных интервалах. Поскольку вольт-секундные интегралы положительной и отрицательной полуволн напряжения одинаковы, можно смело записать:

$$W_{40} = \frac{V_{CP40}^+ t_{40}^+}{2BS} = \frac{V_{CP40}^- t_{40}^-}{2BS},$$

где V_{CP40}^+ и V_{CP40}^- и t_{40}^+ и t_{40}^- – средние значения и длительности, соответственно, положительной и отрицательной полуволн напряжения $v_{УТ40}$. Из рис. 8 имеем:

$$V_{CP40}^+ = 24,73 \text{ В} = 0,215V,$$

$$V_{CP40}^- = 19,81 \text{ В} = 0,172V,$$

$$t_{40}^+ = 371 \text{ мкс} = 0,445T = 0,445/3f = 0,148/f,$$

$$t_{40}^- = 463 \text{ мкс} = 0,555T = 0,555/3f = 0,185/f.$$

Тогда:

$$W_{40} = \frac{0,148 \cdot 0,215V}{2BSf} = \frac{0,185 \cdot 0,172V}{2BSf} \Rightarrow \\ \Rightarrow W_{40} = \frac{0,016V}{BSf}. \quad (7)$$

Аналогичные вычисления можно произвести и для определения числа витков W_{20} обмоток трехфазного уравнительного трансформатора АТВУ с неравномерной девятифазной системой напряжений. Здесь необходимо принять во внимание, что напряжения на обмотках такого УТ имеют разные формы, и числа витков, посчитанные по изложенной выше методике, для разных обмоток могут быть разными. Поскольку для нормальной работы трансформатора все его обмотки должны быть одинаковыми, очевидно, что за расчетное необходимо будет принять максимальное из полученных значений.

На рис. 9 и 10 приведены напряжения $v_{2УТ20}$ на «нулевой» и напряжения $v_{1УТ20}$ на «опережающей» обмотках трансформатора с указанием их

мгновенных и средних значений во всех характерных точках и на всех временных интервалах. Напомним, что «опережающее» $v_{1УТ20}$ и «отстающее» $v_{3УТ20}$ напряжения являются зеркальными отображениями друг друга, при этом очевидно, что $W_{120} = W_{320}$.

Для «нулевой» обмотки справедливо:

$$W_{220} = \frac{V_{2CP20}^+ t_{220}^+}{2BS} = \frac{V_{2CP20}^- t_{220}^-}{2BS}.$$

Из рис. 9 имеем:

$$V_{2CP20}^+ = 14,19 \text{ В} = 0,123V,$$

$$V_{2CP20}^- = 5,77 \text{ В} = 0,05V,$$

$$t_{220}^+ = 241 \text{ мкс} = 0,29T = 0,29/3f = 0,0967/f,$$

$$t_{220}^- = 593 \text{ мкс} = 0,71T = 0,71/3f = 0,2367/f.$$

Тогда

$$W_{220} = \frac{0,0967 \cdot 0,123V}{2BSf} = \frac{0,2367 \cdot 0,05V}{2BSf} \Rightarrow \\ \Rightarrow W_{220} = \frac{0,006V}{BSf}. \quad (8)$$

Аналогично и для «опережающей» и «отстающей» обмоток

$$W_{320} = \frac{V_{3CP20}^+ t_{320}^+}{2BS} = \frac{V_{3CP20}^- t_{320}^-}{2BS}.$$

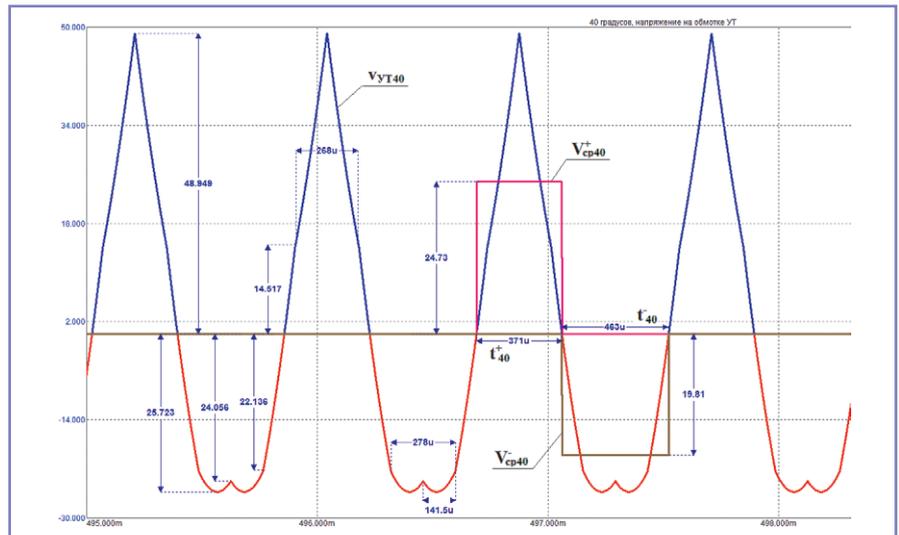


Рис. 8. К расчету W_{40} : средние значения V_{CP40}^+ и V_{CP40}^- и длительности t_{40}^+ и t_{40}^- положительной и отрицательной полуволн напряжения $v_{УТ40}$

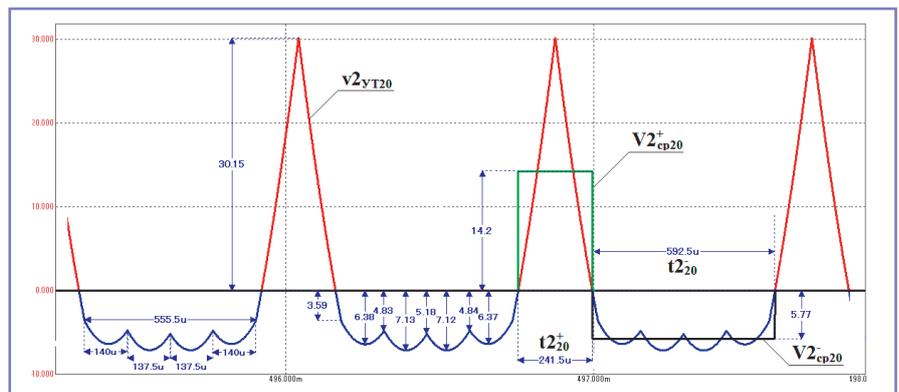


Рис. 9. К расчету W_{20} : средние значения V_{2CP20}^+ и V_{2CP20}^- и длительности t_{220}^+ и t_{220}^- положительной и отрицательной полуволн напряжения $v_{2УТ20}$

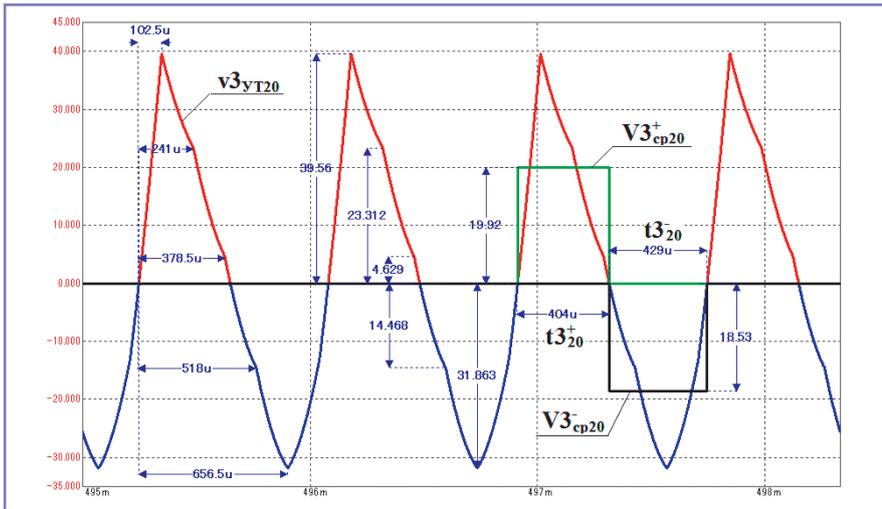


Рис. 10. К расчету W_{20} : средние значения V_{3+cp20} и V_{3-cp20} и длительности t_{3+20} и t_{3-20} положительной и отрицательной полуволн напряжения v_{3UT20}

Из рис. 10 имеем:

$$\begin{aligned} V_{3+cp20} &= 19,92 \text{ В} = 0,1732V, \\ V_{3-cp20} &= 18,53 \text{ В} = 0,161V, \\ t_{3+20} &= 401,5 \text{ мкс} = 0,482T = 0,482T/3f = 0,16/f, \\ t_{3-20} &= 431,5 \text{ мкс} = 0,518T = 0,518/3f = 0,17/f. \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} W_{3,20} &= \frac{0,16 \cdot 0,1732V}{2BSf} = \frac{0,17 \cdot 0,161V}{2BSf} \Rightarrow \\ &\Rightarrow W_{3,20} = \frac{0,014V}{BSf}. \end{aligned} \quad (9)$$

Из расчетов видно, что $W_{1,20} = W_{3,20} > W_{2,20}$. Таким образом, расчетное значение числа витков обмоток трехфазного уравнивающего трансформатора АТВУ с неравномерной девятифазной системой напряжений принимается равным $W_{20} = 0,014/BSf$.

Выводы

В двух частях статьи рассмотрены вопросы применения трехфазных уравнивающих трансформаторов в АТВУ с 18-пульсным выпрямлением.

Реконфигурация выпрямительной части АТВУ с 20-градусными топологиями с введением в нее трехфазных уравнивающих трансформаторов (УТ) позволяет преодолеть структурные ограничения, свойственные этим структурам, связать выходные цепи выпрямителей и образовать одноканальное устройство с выходным напряжением с высокими параметрами качества.

С помощью имитационного компьютерного моделирования определены габаритные мощности УТ при их работе в АТВУ как с равномерной 40-градусной, так и с неравномерной 20-градусной девятифазной системой напряжений, выведены формулы для расчета необходимого числа витков.

Все выводы, результаты и расчетные значения получены из предположения идеальности девятифазных систем напряжений – строгого равенства параметров всех выпрямительных ветвей (действующих значений фазных напряжений и эквивалентных сопротивлений) и точного соблюдения требуемого фазного сдвига между ними.

При наличии уравнивающих трансформаторов токи через диоды выпрямителей имеют иные, по сравнению с АТВУ с непосредственным подключением автотрансформаторного узла к выпрямителю, форму и величину – угол проводимости расширился до 120° , а амплитуда снизилась больше чем вдвое. Таким образом, вполне обоснованно можно предположить, что и действующие значения токов обмоток, и габаритные мощности АТ будут иными. Учитывая объективные ограничения, накладываемые разумным объемом одной статьи, авторы намерены посвятить этому вопросу отдельную публикацию.

Литература

1. Коляхин С.Ф., Коляхин В.С. Автотрансформаторно-выпрямительные устройства в системах электроснабжения летательных аппаратов. Трехфазные уравнивающие трансформаторы. Часть 1/«Электроника и электрооборудование транспорта», № 5, 2018
2. Коляхин С.Ф., Коляхин В.С. Автотрансформаторно-выпрямительные устройства в системах электроснабжения летательных аппаратов. Равномерные топологические структуры/«Электроника и электрооборудование транспорта», № 2, 2017.
3. Коляхин С.Ф., Коляхин В.С. Автотрансформаторно-выпрямительные устройства в системах электроснабжения летательных аппаратов. Неравномерные топологические

структуры/«Электроника и электрооборудование транспорта», № 2, 2018.

4. Коляхин С.Ф., Коляхин В.С., Третьяк В.И. Автотрансформаторно-выпрямительные устройства в системах электроснабжения летательных аппаратов. Девятифазная система напряжений и восемнадцатипульсное выпрямление/«Электроника и электрооборудование транспорта», № 2, 2016.

Коляхин Сергей Федорович

Родился в 1959 году. В 1984 году окончил Московский энергетический институт по специальности «Электрооборудование летательных аппаратов». Кандидат технических наук. Защитил диссертацию на тему «Исследование и разработка бортовых трансформаторно-выпрямительных устройств с многоканальным преобразующим трактом». Опыт работы – 40 лет. В настоящее время работает главным конструктором систем преобразования электроэнергии – заместителем главного конструктора ОАО «Аэрэлектромаш». Имеет более 145 печатных работ, в том числе 60 патентов и авторских свидетельств на изобретения и полезные модели.

Коляхин Вячеслав Сергеевич

Родился в 1985 году. В 2008 году окончил Московский энергетический институт по специальности «Промышленная электроника». Кандидат технических наук. Защитил диссертацию на тему «Разработка и исследование статических трехфазных преобразователей вторичных систем электроснабжения летательных аппаратов на основе ресурсо- и энергосберегающих принципов построения». В настоящее время работает ведущим специалистом ОАО «Аэрэлектромаш». Имеет 30 печатных работ, в том числе 9 патентов на изобретения и полезные модели.

Konyakhin Sergey

Was born in 1959. In 1984 he graduated from Moscow Energy Institute, his speciality is Aircraft electrical equipment. He is a candidate of engineering. He defended a thesis the theme is Research and development of on-board transformer-rectifier devices with multi-channel conversion route. He has 40 year work experience. At present he works as energy conversion systems chief designer – deputy chief designer in Aeroelectromash OJSC. He has more than 145 publications, including 60 patents and inventor's certificates.

Konyakhin Vyacheslav

Was born in 1985. In 2008 graduated from Moscow Power Engineering Institute with a degree in Industrial Electronics. Defended his Ph. D thesis in Development and study of static three-phase converters of secondary power supply systems of aircraft on the base of resource and energy saving design concepts. At the present, he is working as a lead specialist at Aeroelectromash OJSC. Has 30 printed works, including 9 patents for inventions and utility models.

Эффект Зоммерфельда и динамика вагонов

// The effect of Sommerfeldand wagon dynamics//

**Чернышева Ю.В.,
Горский А.Н., д.т.н., профессор,
Середа А.Г.,
ФБОУ ВО ПГУПС, Санкт-Петербург**

В статье рассмотрены вертикальные колебания вагонов грузового поезда. Приведенные аналитические выражения позволяют определить скорость вагона, при которой возникает резонанс между собственными колебаниями вагона и имеющейся неровностью пути. Показано, что значительное возрастание амплитуды колебаний вагона приводит к существенному отбору мощности локомотива, при этом снижается его скорость. Отмеченное явление особенно важно в настоящее время перехода к высокоскоростному движению.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, грузовой поезд, вертикальные колебания, резонансная частота, скорость, путь.

Арнольд Зоммерфельд (1868-1951), знаменитый немецкий физик-теоретик и математик, известен как специалист в области классической электродинамики (дифракции и распространения электромагнитных волн, электронной теории), в области специальной теории относительности, гидродинамики, инженерной физики и др. Опубликовал ряд статей инженерной направленности. Один из авторов настоящей статьи пользовался его формулами для расчета потерь в обмотках трансформаторов при высокочастотных синусоидальных воздействиях [1]. Известен также так называемый эффект Зоммерфельда, обнаруженный им в 1904 году при исследовании колебаний в динамо-машинах.

Зоммерфельд исследовал поведение неуравновешенного ротора, установленного на вибрирующем основании. Обнаруженный при этом эффект, называемый эффектом Зоммерфельда, заключается в том, что на начальном участке ОА (рис. 1), когда вибрационный момент относительно мал, частота ω вращения

The article describes vertical oscillations of freight train wagons. The analytical formulas help to determine wagons speed. It is special resonance speed. The resonance appears between self-oscillations and oscillations of rail roughness. It is shown, that significant rise of oscillations wagons amplitude result to picking of locomotive power, at that time speed decreases. This manifestation is important at that time of transition to high speed.

Keywords: induction motor, freight train, wheel tramp, oscillation, resonant frequency, speed, line.

ротора асинхронного двигателя увеличивается примерно так же, как при вращении ротора на неподвижном основании. При увеличении вращающего момента двигателя M и, соответственно, подводимой мощности $N = M\omega$, когда частота ω приближается к частоте свободных колебаний основания P , увеличение частоты двигателя ω происходит очень медленно (участок АВ), несмотря на существенное увеличение подводимой мощности N . При этом возрастает амплитуда колебаний основания. Вибрация основания тормозит вращение ротора, то есть служит дополнительной нагрузкой. При определенном значении $N = N_1$ происходит скачкообразное увеличение частоты двигателя ω до некоторого послерезонансного значения ω_1 , амплитуда колебаний основания при этом падает. При дальнейшем увеличении

мощности двигателя N его частота снова изменяется плавно (участок CD) [2].

Явления, обнаруженные Зоммерфельдом при анализе колебаний в системе асинхронный двигатель с неуравновешенным ротором на вибрирующем основании, происходят и в других механических системах, например на железнодорожном транспорте.

1. При движении грузового поезда по пути с неровностями (просадка рельсов, разношенные стыки) могут возникать явления, подобные рассмотренному. При достижении локомотивом некоторой скорости дальнейшее увеличение мощности не приводит к увеличению скорости, а затем при достижении ею некоторого значения и дальнейшем увеличении мощности происходит резкий бросок скорости и далее ее плавное увеличение. То есть изменение скорости происходит по кривой 2 (рис. 1).

2. Локомотив, ведущий состав с цистернами, не полностью заполненными жидким грузом (нефть, бензин), тормозится из-за колебаний жидкости в цистернах.

Качественно отдельные стороны эффекта Зоммерфельда: застревание

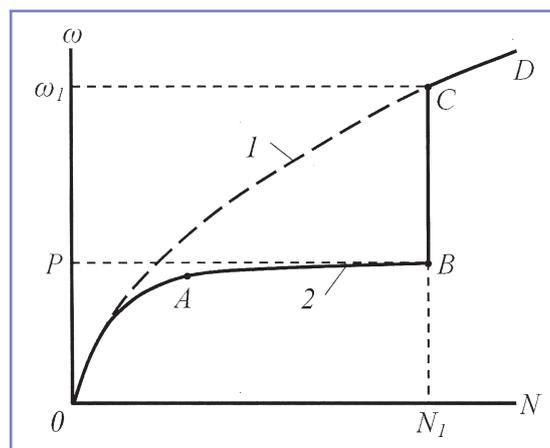


Рис. 1. Эффект Зоммерфельда:
1 – зависимость $\omega(N)$ двигателя с неуравновешенным ротором, установленным на неподвижном основании;
2 – то же для двигателя, установленного на вибрирующем основании

двигателя на частоте оборотов вблизи резонансной частоты; возрастание амплитуды колебаний вибрирующего основания без заметного изменения частоты вращения двигателя при увеличении подводимой к нему мощности; быстрый переход (срыв) частоты вращения двигателя, сопровождающийся резким уменьшением амплитуды колебаний основания после прохождения резонанса – объясняются резонансными явлениями. На увеличение амплитуды колебаний вибрирующего основания, возникающее при резонансе, тратится энергия. Поэтому, несмотря на возрастание мощности, подводимой к двигателю, это возрастание идет на увеличение амплитуды колебаний, а на увеличение вращающего момента дополнительной мощности не остается. Частота вращения двигателя и скорость движения локомотива не возрастают.

Чтобы количественно объяснить эти явления, рассмотрены колебания железнодорожного вагона при прохождении им неровностей. Наиболее изучены вертикальные колебания вагона [3].

Пусть наддресорный груз перемещается с постоянной скоростью V по пути с неровностями. Уравнение продольного профиля пути

$$\eta = \eta_{\max} \sin^2 \frac{\pi \xi}{l},$$

где l – длина волны (рис. 2).

Масса груза m , коэффициент жесткости винтовой рессоры c , сопротивление пропорциональны скорости. Деформациями пути и колеса можно пренебречь. Положение наддресорного груза определяется координатой y .

Дифференциальное уравнение колебаний груза

$$\ddot{y} + 2n\dot{y} + k^2y = \frac{1}{m} \Phi_e,$$

где Φ_e – сила инерции, n – коэффициент затухания ($n < k$, $k = \sqrt{\frac{c}{m}}$ – частота свободных колебаний груза. Так как $\xi = Vt$, то сила инерции

$$\begin{aligned} \Phi_e &= -m\dot{\eta} = m \frac{d^2}{dt^2} (\eta_{\max} \sin^2 \frac{\pi Vt}{l}) = \\ &= -m \frac{2\pi^2 V^2 \eta_{\max}}{l^2} \cos \frac{2\pi Vt}{l}. \end{aligned}$$

Тогда $\ddot{y} + 2n\dot{y} + k^2y = -h \cos pt$, (1)

где $p = \frac{2\pi V}{l}$, $h = \frac{\eta_{\max} p^2}{2}$.

Общее решение дифференциального уравнения (1) имеет вид

$$y = e^{-nt} (C_1 \cos k_1 t + C_2 \sin k_1 t) - A_b \cos(pt - \varepsilon),$$

где $k_1 = \sqrt{k^2 - n^2}$ – частота затухающих колебаний,

p – частота вынужденных колебаний;

A_b – амплитуда вынужденных колебаний

$$A_b = \frac{h}{\sqrt{(k^2 - p^2)^2 + 4n^2 p^2}};$$

ε – разность или сдвиг фаз;

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{2np}{k^2 - p^2};$$

C_1 и C_2 – постоянные, определяемые из начальных условий. Значения этих постоянных при $t = 0$: $y_0 = 0$, $\dot{y}_0 = 0$.

Тогда $C_1 = A_b \cos \varepsilon$, $C_2 = \frac{A_b}{k_1} (\eta \cos \varepsilon + p \sin \varepsilon)$ и общее решение уравнения (1) имеет вид

$$\begin{aligned} y &= A_b e^{-nt} [\cos \varepsilon \cos k_1 t + \\ &+ \frac{1}{k_1} (n \cos \varepsilon + p \sin \varepsilon) \sin k_1 t] - \\ &- A_b \cos(pt - \varepsilon). \end{aligned} \quad (2)$$

Первое слагаемое решения (2) определяет затухающие, а второе – вынужденные колебания груза, вызываемые неровностями пути.

В случае резонанса, когда $p = k$, $\varepsilon = \frac{\pi}{2}$,

$$y = \frac{h}{2\pi k} (\frac{ke^{-nt}}{k_1} \sin k_1 t - \sin kt).$$

Критическая скорость, при которой наступает резонанс, определяется из следующего соотношения:

$$\begin{aligned} k &= p = \frac{2\pi V_k}{l}; \\ V_k &= \frac{kl}{2\pi} = \frac{l}{T}. \end{aligned} \quad (3)$$

где T – период свободных колебаний наддресорного груза.

Если длина волны $l = 6$ м, $T = 0,3$ сек, то $V_k = 20$ м/с = 72 км/ч.

Период T обычно вычисляют по формуле

$$T = \frac{2\pi}{k} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{c}}. \quad (4)$$

Так как $c = \frac{mg}{f}$, где f – статическое удлинение винтовой пружины, то

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{f}{g}}.$$

Амплитуда вынужденных колебаний при резонансе

$$A_b = \frac{h}{2\pi k} = \frac{k\eta_{\max}}{4n}.$$

Для коэффициента затухания $n = 0,1k$ $A_b = 2,5\eta_{\max}$; для $n = 0,01k$ $A_b = 25\eta_{\max}$; для $n = 0$ $A_b = \infty$.

Найдем выражение, по которому амплитуда вынужденных колебаний стремится к ∞ . Для этого примем $n = 0$ (в реальности оно действительно невелико), тогда $\varepsilon = 0$, $k_1 = k$ и выражение (2) примет вид

$$y = \frac{h}{k^2 - p^2} (\cos kt - \cos pt).$$

В случае резонанса при $p = k$, $y = \frac{0}{0}$. Раскрывая эту неопределенность, получим

$$y = -\frac{ht}{2k} \sin kt = -\frac{k\eta_{\max}}{4} t \sin kt.$$

Амплитуда вынужденных колебаний груза $A_b = \frac{k\eta_{\max} t}{4}$ с течением времени неограниченно возрастает (рис. 3).

В действительности мощность локомотива ограничена. Амплитуда колебаний возрастает до некоторого значения и сохраняется. При увеличении мощности

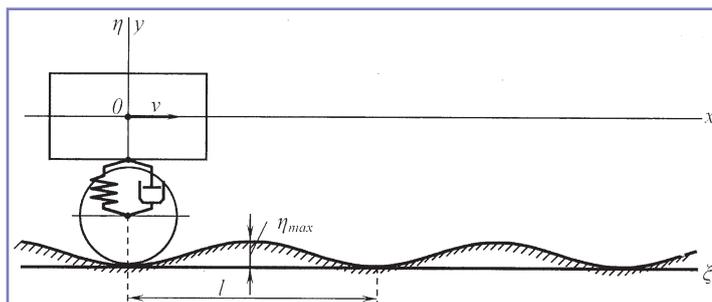


Рис. 2. Движение наддресорного груза с неровностями

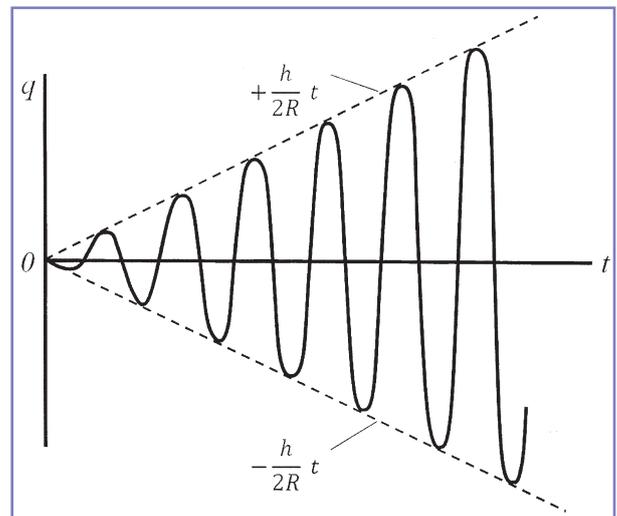


Рис. 3. График резонансных колебаний с непрерывно увеличивающейся амплитудой

скорость возрастает, частота вынужденных колебаний несколько возрастает. Система выходит из резонансного состояния, и дальше движение происходит в обычном режиме.

Подбирая винтовую пружину с другими параметрами (c и f), можно менять период вынужденных колебаний так, чтобы резонансная скорость имела такие значения, которых локомотив обычно не достигает.

Выводы

В рассмотренном примере наблюдается тот же эффект Зоммерфельда, что и в двигателе с неуравновешенным ротором, установленном на вибрирующем основании. Несмотря на то, что задача анализа вертикальных колебаний над-рессорного груза существенно упрощена, аналитически получены закономерности развития вынужденных колебаний грузового вагона, движущегося по пути с неровностями.

Для реального грузового поезда, имеющего n вагонов с электровозом 2ЭС5К, анализ выполнен путем имитационного моделирования. Результаты опубликованы в работе [4]. Приведенные в ней зависимости перемещения центра масс первого вагона и скорости поезда от времени движения качественно соответствуют полученным выше выражениям. При изучении влияния колебаний вагонов в вертикальной плоскости при движении по неровностям пути на скорость и ускорение поезда с локомотивом, имеющим двигателя ограниченной мощности, установлена скорость движения, при которой возникает резонанс, а следовательно, бросок мощности, т.е. резкое увеличение энергии, расходуемой локомотивом.

Литература

1. Русин Ю.С., Гликман И.Я., Горский А.Н. Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры. Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 225 с.
2. Энциклопедия по машиностроению XXL. Оборудование, материаловедение, механика, Интернет-ресурс.
3. Яблонский А. А., Норейко С.С. Курс теории колебаний. – М., В. Ш., 1975. – 248 с.
4. Бороненко Ю. П., Чернышева Ю.В. Особенности движения грузового поезда с двигателями ограниченной мощности при резонансных колебаниях вагонов. – Известия, ПГУПС, т. 14, вып. 4, 2017, с. 697-709.

Чернышева Юлия Владимировна

Родилась в 1982 году. В 2004 году окончила Петербургский государственный университет путей сообщения по специальности «Электрический транспорт». В настоящее время работает инженером кафедры «Электрическая тяга» и старшим преподавателем кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» ПГУПС, является соискателем ученой степени. Имеет 12 научных трудов.

Горский Анатолий Николаевич

Родился в 1938 году. В 1960 году окончил Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Инженер путей сообщений – электромеханик». Доктор технических наук, профессор. В 1995 году защитил диссертацию по теме «Методы расчета реакторно-трансформаторного оборудования преобразовательных устройств при минимизации массы и габаритов». Опыт работы – более 50 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электромеханические комплексы и системы» ФГБОУ ВО ПГУПС. Имеет 113 печатных трудов, в том числе 3 учебных пособия и 4 книги.

Серета Александр Геннадьевич

Родился в 1989 году. В 2013 году окончил ПГУПС с присвоением квалификации (степени) магистра по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника». В настоящее время работает инженером кафедры «Теоретические основы электротехники» ПГУПС. Имеет 5 научных работ.

Chernysheva Julia

Was born in 1982. In 2004 she graduated from St. Petersburg State Transport University majoring in Electric transport. At present she works as engineer of Electric traction department f St. Petersburg State Transport University / senior teacher of Wagons and rolling stock department of St. Petersburg State Transport University and she is candidate for a degree. She has 12 scientific works.

Gorskiy Anatoly

He was born in 1938. In 1960 he graduated from Leningrad Railway Engineering Transport Institute majoring in Engineer of Railway transport – Electrician. He is doctor of technical sciences, professor. In 1995 he defended the thesis, the thesis topic is Calculating methods of reactor and transformer equipment of conversion devices during minimizing weight and dimensions. He has 50 years of work experience. At present he works as associate professor of Electromechanical complexes and systems department of Emperor Alexander I St. Petersburg State University of Transport. He has 113 published papers, including 3 study guide and 4 books.

Sereda Alexander

Was born in 1989. In 2013 graduated from St. Petersburg State Transport University with master's degree in Electrical Energy Industry and Electrical Technology. At the present he is an engineer at Theoretical basics of electrical engineering department at St. Petersburg State Transport University. Has 5 research papers.

Обобщенное представление фазного напряжения многофазного преобразователя

// Generalized presence of phase voltage of a multiphase transmitter //

**Терешкин В. М., к.т.н., доцент,
Уфимский государственный авиационный
технический университет, Уфа**

В обобщенной форме представлено фазное напряжение многофазного преобразователя в зависимости от величины входного напряжения и количества фаз преобразователя. В аналитической форме приведены зависимости, связывающие мгновенные значения фазного напряжения с числом фаз многофазного преобразователя. Установлено, что при определенных алгоритмах управления многофазным преобразователем, независимо от количества фаз, амплитуда первой гармоники фазного напряжения остается неизменной и при единичном входном напряжении равна 0,637.

Ключевые слова: многофазный преобразователь, алгоритмы управления многофазным преобразователем, форма фазного напряжения, амплитуда первой гармоники фазного напряжения.

По результатам обзора источников информации можно отметить различные возможные области применения многофазных электрических машин.

В США перспективны многофазные двигатели для электромобилей и медицинской техники. Существует патент на электропривод для глубоководного аппарата с использованием многофазного асинхронного двигателя.

В Германии многофазные двигатели применяются для привода компрессоров, кроме того, фирмой Siemens разработан и эксплуатируется в России тяговый электропривод на основе четырехфазного асинхронного двигателя ($m = 4$), который установлен на серийном электровозе серии 2ЭС10 «Гранит». Фирма Bosch разработала пятифазный вентильный синхронный генератор, предназначенный для применения на автомобиле.

В Японии фирма Sanyo использует различные типы пятифазных двигателей

In the generalized form, the phase voltage of the multiphase converter is represented as a function of the input voltage and the number of phases of the converter. In the analytical form, the relationships connecting the instantaneous values of the phase voltage with the number of phases of a multiphase converter are presented. It is established that under certain control algorithms for a multiphase converter, regardless of the number of phases, the amplitude of the first harmonic of the phase voltage remains unchanged and at a single input voltage is 0,637.

Keywords: multiphase converter, control algorithms for a multiphase converter, phase voltage form, amplitude of the first harmonic of phase voltage.

в металлорежущих станках (электропривод низковольтный).

Многофазные асинхронные двигатели широко применяются в текстильной промышленности, где требуется стабильная скорость вращения в пределах одного оборота вала, а также в других областях, требующих наличия высоконадежных электроприводов с низким

уровнем шума и вибрации, например, в специальных вентиляционных системах и комплексах.

Учитывая современный уровень развития силовой электроники и микропроцессорной техники, можно предположить, что многофазные электрические машины могут стать альтернативой трехфазным машинам. Поэтому исследования в области создания многофазных электромеханических систем имеют теоретическое и прикладное значение.

В работах [1, 2] рассмотрены вопросы формирования фазных напряжений многофазных мостовых преобразователей и их сравнительный анализ с напряжениями трехфазной системы. Но это частные случаи применительно к конкретному числу фаз многофазного преобразователя. В данной работе установлена обобщенная зависимость формы и величины выходного напряжения многофазного преобразователя от числа фаз и величины входного напряжения.

На рис. 1 приведена обобщенная мостовая схема многофазного преобразователя, подключенного на многофазную нагрузку в виде рабочей обмотки двигателя, где m – число фаз, n – количество ключей преобразователя.

На рис. 2 изображены диаграммы фазных напряжений многофазных преобразователей при единичном входном напряжении и реализации трех

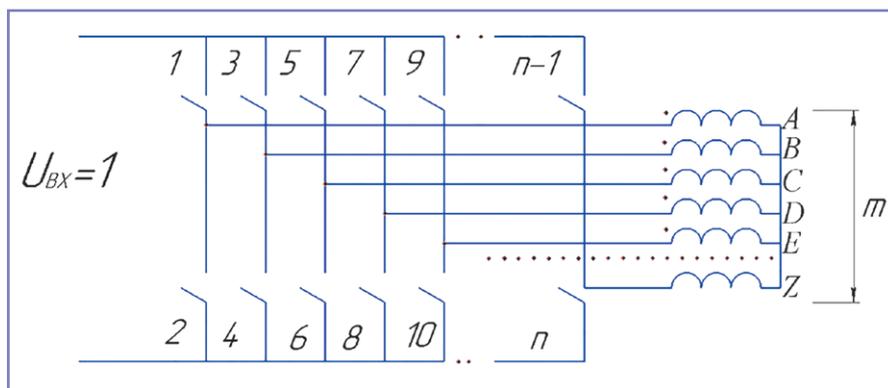


Рис. 1. Обобщенная мостовая схема многофазного преобразователя

алгоритмов управления. Номера ключей при реализации алгоритмов соответствуют рис. 1.

Последовательность коммутаций (алгоритм управления) трехфазного преобразователя имеет вид:

- 1) 1, 4, 5 (A₊B₋C₊);
- 2) 1, 4, 6 (A₊B₋C₋);
- 3) 1, 3, 6 (A₊B₊C₋);
- 4) 2, 3, 6 (A₋B₊C₋);
- 5) 2, 3, 5 (A₋B₊C₊);
- 6) 2, 4, 5 (A₋B₋C₊).

Коммутация трехключевая, всего шесть коммутаций за период. Алгоритм соответствует рис. 2а.

Последовательность коммутаций (алгоритм управления) пятифазного преобразователя имеет вид:

- 1) 1, 4, 6, 7, 9 (A₊B₋C₋D₊E₊);
- 2) 1, 4, 6, 8, 9 (A₊B₋C₋D₋E₊);
- 3) 1, 3, 6, 8, 9 (A₊B₊C₋D₋E₊);
- 4) 1, 3, 6, 8, 10 (A₊B₊C₋D₋E₋);
- 5) 1, 3, 5, 8, 10 (A₊B₊C₊D₋E₋);
- 6) 2, 3, 5, 8, 10 (A₋B₊C₊D₋E₋);
- 7) 2, 3, 5, 7, 10 (A₋B₊C₊D₊E₋);
- 8) 2, 4, 5, 7, 10 (A₋B₋C₊D₊E₋);
- 9) 2, 4, 5, 7, 9 (A₋B₋C₊D₊E₊);
- 10) 2, 4, 6, 7, 9 (A₋B₋C₋D₊E₊).

Коммутация пятиключевая, всего десять коммутаций за период. Алгоритм соответствует рис. 2б.

Последовательность коммутаций (алгоритм управления) семифазного преобразователя имеет вид:

- 1) 1, 4, 6, 8, 9, 11, 13 (A₊B₋C₋D₊E₊F₊G₊);
- 2) 1, 4, 6, 8, 10, 11, 13 (A₊B₋C₋D₋E₋F₊G₊);
- 3) 1, 3, 6, 8, 10, 11, 13 (A₊B₊C₋D₋E₋F₊G₊);
- 4) 1, 3, 6, 8, 10, 12, 13 (A₊B₊C₋D₋E₋F₋G₊);
- 5) 1, 3, 5, 8, 10, 12, 13 (A₊B₊C₊D₋E₋F₋G₊);
- 6) 1, 3, 5, 8, 10, 12, 14 (A₊B₊C₊D₋E₋F₋G₋);
- 7) 1, 3, 5, 7, 10, 12, 14 (A₊B₊C₊D₊E₋F₋G₋);
- 8) 2, 3, 5, 7, 10, 12, 14 (A₋B₊C₊D₊E₋F₋G₋);
- 9) 2, 3, 5, 7, 9, 12, 14 (A₋B₊C₊D₊E₊F₋G₋);
- 10) 2, 4, 5, 7, 9, 12, 14 (A₋B₋C₊D₊E₊F₋G₋);
- 11) 2, 4, 5, 7, 9, 11, 14 (A₋B₋C₊D₊E₊F₊G₋);
- 12) 2, 4, 6, 7, 9, 11, 14 (A₋B₋C₋D₊E₊F₊G₋);
- 13) 2, 4, 6, 7, 9, 11, 13 (A₋B₋C₋D₊E₊F₊G₊);
- 14) 2, 4, 6, 7, 8, 11, 13 (A₋B₋C₋D₋E₊F₊G₊).

Коммутация семиключевая, всего 14 коммутаций за период. Алгоритм соответствует рис. 2в.

На рис. 2 также изображены эквивалентные схемы нагрузки многофазного преобразователя в момент коммутации для соответствующего числа фаз, а именно 3, 5, 7. Эквивалентные схемы зафиксированы в момент первой коммутации.

Трехфазная нагрузка имеет в верхнем плече две обмотки, в нижнем

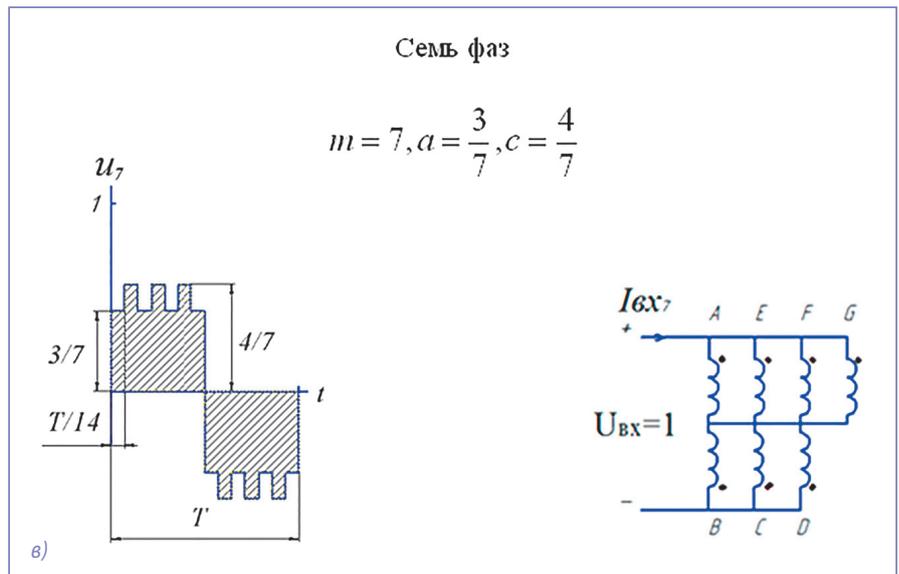
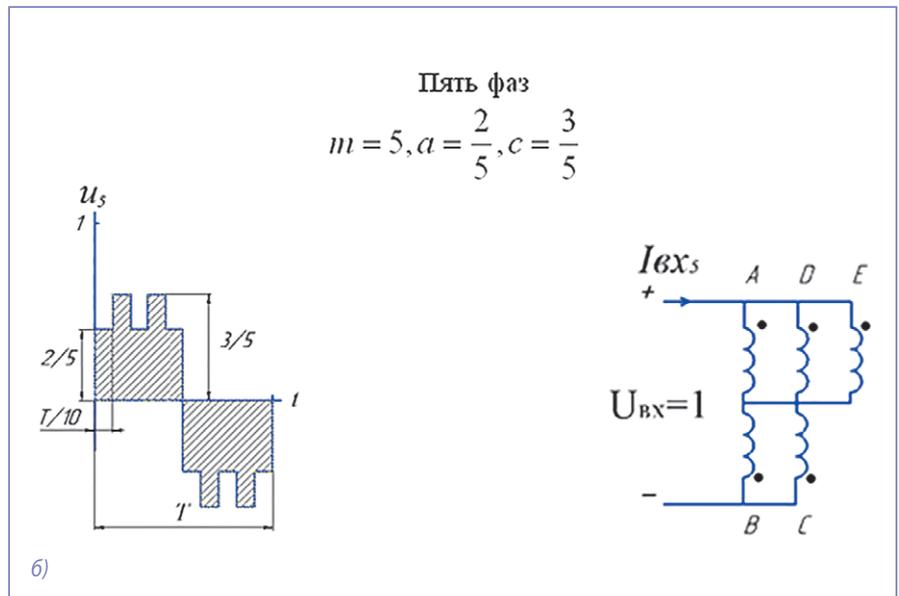
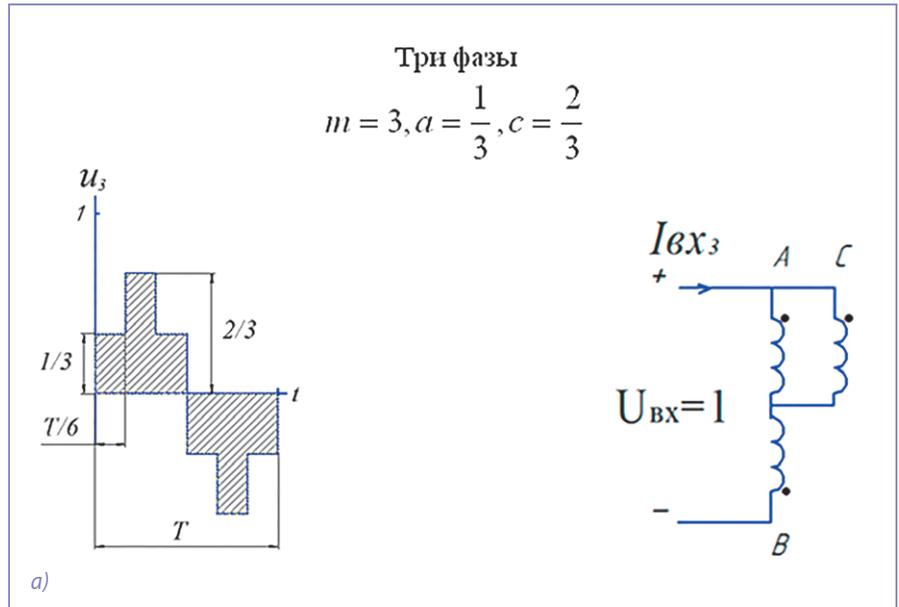


Рис. 2. Диаграммы фазного напряжения и эквивалентные схемы нагрузки многофазного преобразователя в момент коммутации

плече одну обмотку. Пятифазная нагрузка имеет в верхнем плече три обмотки, в нижнем плече две обмотки. Семифазная нагрузка имеет в верхнем плече четыре обмотки, в нижнем плече три обмотки и т.д. В процессе коммутации количество фаз в верхнем и нижнем плече чередуется: для трехфазной нагрузки 2-1, 1-2, для пятифазной нагрузки 3-2, 2-3 и т.д.

Величины a , c являются мгновенными значениями фазного напряжения в момент коммутации соответствующих фаз и при единичном входном напряжении могут быть определены обобщенными выражениями:

$$a = \frac{m-1}{2} = \frac{m-1}{2m}, \quad c = \frac{m+1}{2} = \frac{m+1}{2m},$$

где m – число фаз;

$$a + c = 1;$$

$\frac{m-1}{2} = 1, 2, 3, \dots$ – количество фаз в нижнем плече (по рис. 2);
 $\frac{m+1}{2} = 2, 3, 4, \dots$ – количество фаз в верхнем плече (по рис. 2).

Например, если предположить

$m = 99$, то

$$a = \frac{49}{99} = 0,4949, \quad c = \frac{50}{99} = 0,5050,$$

а форма фазного напряжения 99-фазного преобразователя приближается к форме меандра с амплитудой 0,5. Амплитуда первой гармоники меандра с амплитудой 0,5 равна $U_1 = \frac{2}{\pi} = 0,637$.

При разложении в ряд Фурье кривых, приведенных на рис. 2, получим, что амплитуды первых гармоник также равны 0,637, т.е. $U_{m13} = U_{m15} = U_{m17} = \dots = 0,637$.

Для примера рассмотрим функцию фазного напряжения пятифазного преобразователя.

Аналитически функция $u_5(t)$ может быть представлена выражением:

$$u_5(t) = \begin{cases} 2/5 & (0 < t < \frac{\pi}{5}); \\ 3/5 & (\frac{\pi}{5} < t < \frac{2\pi}{5}); \\ 2/5 & (\frac{2\pi}{5} < t < \frac{3\pi}{5}); \\ 3/5 & (\frac{3\pi}{5} < t < \frac{4\pi}{5}); \\ 2/5 & (\frac{4\pi}{5} < t < \pi). \end{cases}$$

Функция нечетная и после разложения в ряд Фурье имеет вид

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin nt,$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$, $b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(t) \sin ntdt$.

Амплитуда первой гармоники определяется выражением

$$b_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{5}} \frac{2}{5} \sin tdt + \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{5}}^{\frac{2\pi}{5}} \frac{3}{5} \sin tdt + \frac{2}{\pi} \int_{\frac{2\pi}{5}}^{\frac{3\pi}{5}} \frac{2}{5} \sin tdt + \frac{2}{\pi} \int_{\frac{3\pi}{5}}^{\frac{4\pi}{5}} \frac{3}{5} \sin tdt + \frac{2}{\pi} \int_{\frac{4\pi}{5}}^{\pi} \frac{2}{5} \sin tdt$$

Интегрируя и подставляя численные значения аргументов, получим

$$b_1 = -\frac{2}{\pi} \frac{2}{5} (\cos \frac{\pi}{5} - \cos 0) - \frac{2}{\pi} \frac{3}{5} (\cos \frac{2\pi}{5} - \cos \frac{\pi}{5}) - \frac{2}{\pi} \frac{2}{5} (\cos \frac{3\pi}{5} - \cos \frac{2\pi}{5}) - \frac{2}{\pi} \frac{3}{5} (\cos \frac{4\pi}{5} - \cos \frac{3\pi}{5}) - \frac{2}{\pi} \frac{2}{5} (\cos \pi - \cos \frac{4\pi}{5}) = 0,637$$

Амплитуда первой гармоники фазного напряжения пятифазного преобразователя при единичном входном напряжении $U_{m15} = 0,637$. Действующее значение синусоидального напряжения по первой гармонике пятифазного преобразователя $U_{15} = 0,707$, $U_{m15} = 0,45$.

Аналогичный результат получается при количестве фаз $m = 3, 7, 9$ и т.д.

В обобщенной форме для единичного входного напряжения многофазного преобразователя функция фазного напряжения $u_m(t)$ в диапазоне $0 < t < \pi$ может быть представлена:

$$u_m(t) = \frac{m-1}{2m}, \quad \text{если } (0 < t < \frac{\pi}{m}, \frac{2\pi}{m} < t < \frac{3\pi}{m}, \dots, \frac{(m-1) \cdot \pi}{m} < t < \pi),$$

$$u_m(t) = \frac{m+1}{2m}, \quad \text{если } (\frac{\pi}{m} < t < \frac{2\pi}{m}, \frac{3\pi}{m} < t < \frac{4\pi}{m}, \dots, \frac{(m-2) \cdot \pi}{m} < t < \frac{(m-1) \cdot \pi}{m}),$$

где $m = 3, 5, 7, 9, \dots$

Всего имеет место m слагаемых, которые формируют амплитуду первой гармоники фазного напряжения многофазного преобразователя.

На рис. 3 дана иллюстрация половины периода фазного напряжения m -фазного преобразователя при реализации алгоритмов управления аналогичных тем, которые приведены выше для 3, 5, 7-фазного преобразователя.

То есть, независимо от числа фаз, при единичном входном напряжении мостового многофазного преобразователя и приведенных алгоритмах управления амплитуда первой гармоники фазного напряжения (временная гармоника) равна 0,637. Существуют также высшие временные гармоники фазного напряжения многофазных преобразователей, создающие высшие временные гармоники фазного тока.

Как было установлено на примере пятифазной машины, номер высшей временной гармоники фазного тока, которая «трансформируется» в пространственно временную составляющую, формирующую результирующий магнитный поток, выше, чем у трехфазной машины. Для пятифазной машины

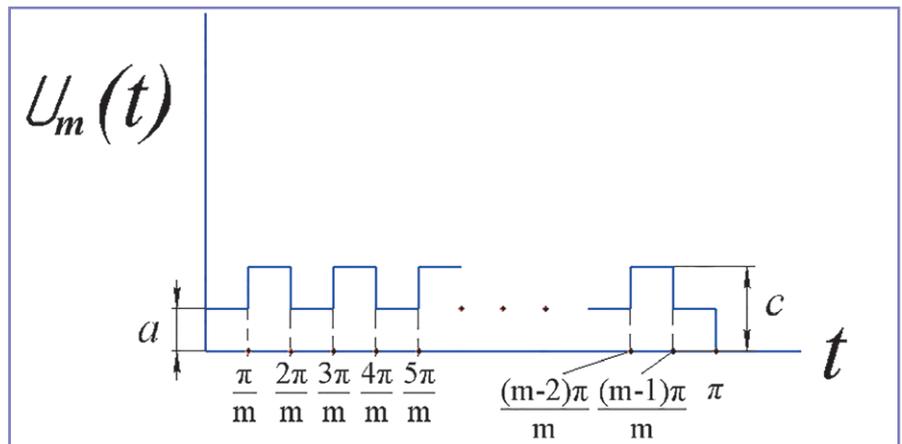


Рис. 3. Форма половины периода фазного напряжения m -фазного преобразователя

это 11-я гармоника прямой последовательности и 9-я гармоника обратной последовательности. В результате пятифазная машина имеет меньшие вибрации по сравнению с трехфазной, хотя высшие временные гармоники фазного тока (3, 5, 7 и т.д.) существуют, разогревают медь, но при этом они не «трансформируются» в электромагнитный момент и, как следствие, не создают вибраций.

Аналогичные рассуждения справедливы для семи- и девятифазной машин.

Выводы

1. Получено обобщенное выражение формы фазного напряжения многофазного преобразователя с нечетным количеством фаз.

2. При единичном входном напряжении многофазного преобразователя

величина фазного напряжения преобразователя остается неизменной и равна 0,637.

Литература

1. Терешкин В.М., Гришин Д.А. Исследование алгоритмов работы пятифазного преобразователя, реализующего режимы векторной широтно-импульсной модуляции. // «Электротехника», 2017, № 2, с. 46–52.
2. Терешкин В.М., Гришин Д.А., Макулов И.А. Перспективы применения многофазных машин переменного тока. // «Электроника и электрооборудование транспорта», 2017, № 1, с. 19–26.

Терешкин Владимир Михайлович

Родился в 1953 году. В 1976 году окончил Уфимский авиационный институт по специальности «Авиационное и автотракторное

электрооборудование» (инженер-электромеханик). Кандидат технических наук, доцент. В 1985 году защитил диссертацию по спецтеме. Опыт работы – 40 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электромеханика» УГАТУ. Имеет более 50 научных трудов.

Tereshkin Vladimir

Was born in 1953. In 1976 he graduated from Ufa State Aviation Technical University with specialization in Aviation and tractor electrical equipment (electromechanical engineer). He is candidate of technical sciences, associate professor. He defended the thesis with specialized topic. He has 40 years of work experience. At present he works as associate professor of Electromechanics department of Ufa State Aviation Technical University. He has more than 50 publications.

Исследование динамических режимов работы переключаемой фильтрокомпенсирующей установки

// Research of dynamic operating modes of switchable filter compensating unit //

**Серебряков А.С., д.т.н., профессор,
Герман Л.А., д.т.н., профессор,
филиал СамГУПС, Нижний Новгород**

**Осокин В.Л., к.т.н., доцент,
Нижегородский государственный
инженерно-экономический университет, Княгинино**

*Приведены результаты анализа переходных процессов в двухступенчатой фильтрокомпенсирующей установке в тяговой сети переменного тока напряжением 25 кВ. Первая ступень – последовательное включение двух LC-секций – происходит при малых нагрузках, вторая ступень – одна LC-секция – при движении тяжеловесных поездов. Анализ проведен в интегрированном пакете MATHCAD путем решения нелинейных дифференциальных уравнений в форме Коши методом Рунге – Кутты четвертого порядка. Определены броски тока и напряжения при шунтировании демпфирующего резистора в максимум и в ноль тока.
Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, потери электроэнергии, компьютерное моделирование, переходный процесс, тяговая сеть переменного тока.*

Фильтрокомпенсирующие установки (ФКУ) в системах электроснабжения электрических железных дорог переменного тока служат для емкостной компенсации реактивной мощности тяговой нагрузки и фильтрации высших гармоник тока и напряжения. ФКУ подключаются между питающим контактным проводом или питающей шиной 27,5 кВ и рельсом. Они содержат последовательно включенные конденсатор и реактор, образующие LC-контур, настраиваемый на фильтрацию третьей гармонической составляющей [1, 2, 3]. Резонансная частота с учетом небольшой расстройки составляет 140 Гц.

Для ограничения бросков тока и перенапряжений на конденсаторе при включении ФКУ последовательно в LC-контур на время коммутации

Results of analysis of transition processes in two-level filter compensating unit in the traction AC network with voltage of 25 kV are given. The first stage is the sequential inclusion of two LC sections at low loads, and the second stage is one LC section at the movement of heavy trains. The analysis is carried out in the integrated MATHCAD package by solving nonlinear differential equations in the form by the fourth-order Runge – Kutta method. The current and voltage surges during the shunting of the damping resistor to the maximum and to the zero current are determined.

Keywords: compensation of reactive power, power losses, computer modeling, transient process, the traction network of alternating current.

включают демпфирующий (пусковой) резистор, который после включения ФКУ шунтируется выключателем.

Недостаток указанных устройств заключается в том, что тяговая нагрузка на межподстанционной зоне не постоянная. Она непрерывно изменяется, в то время как значение емкости ФКУ вне зависимости от нагрузки остается постоянным. Согласно существующим нормативным документам [4] значение емкости ФКУ выбирается в зависимости от двух следующих вариантов движения поездов:

- при средних нагрузках – из расчета получения минимальных потерь электроэнергии;
- при движении тяжеловесных поездов – из расчета максимально возможного повышения напряжения для обеспечения

заданной провозной способности железной дороги.

Во втором случае емкость получается примерно в 1,5 раза больше, чем в первом. Это значит, что если выбрать емкость по первому варианту для получения минимальных потерь при средних нагрузках, ее не хватит, чтобы поддержать напряжение при проходе тяжеловесных поездов. Если же выбрать емкость достаточной, чтобы пропускать тяжеловесные поезда, то при средних нагрузках будет перекомпенсация реактивной мощности, и при этом может чрезмерно возрасти напряжение и потери электроэнергии.

Значения мощностей ФКУ в тяговой сети, рассчитываемые для повышения пропускной способности железной дороги в современных условиях, как правило, достаточно велики и часто превосходят 6-8 Мвар [1, 2, 3]. Естественно, что при снижении тяговой нагрузки при таких мощностях ФКУ напряжение в контактной сети межподстанционной зоны может повыситься до значения, более допустимого 29 кВ, что вызывает аварийное отключение ФКУ. К тому же при высоком напряжении резко снижается надежность работы конденсаторов.

Следовательно, ФКУ должна быть регулируемой или иметь хотя бы два значения мощности для указанных выше режимов [5], чтобы обеспечить снижение потерь электроэнергии, т.е. обеспечить энергосбережение без ущерба для перевозочного процесса при пропуске тяжеловесных составов. Это достигается за счет изменения значения емкости ФКУ. Будем называть такую установку переключаемой ФКУ.

На рис. 1 представлена схема переключаемой ФКУ, выполненная на основании отечественных изобретений [6, 7, 8]. Схема представляет собой принципиально новое техническое решение регулируемой установки, так как регулируемые секции конденсаторов включены не параллельно с основной батареей, а последовательно.

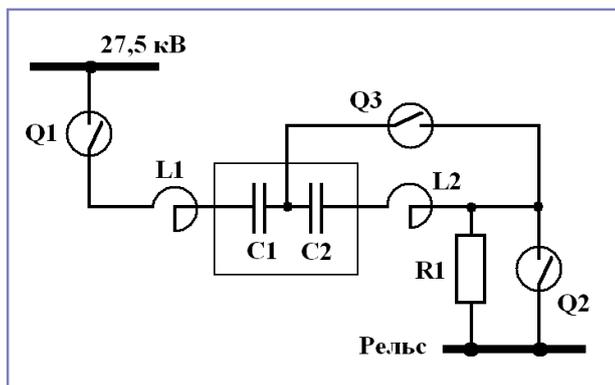


Рис. 1. Переключаемая ФКУ:
Q1 – главный выключатель; C1 – конденсаторная батарея 1-й секции;
L1 – фильтровый реактор 1-й секции; C2 – конденсаторная батарея 2-й секции; L2 – фильтровый реактор 2-й секции;
R1 – демпфирующий резистор; Q2 – выключатель 10 кВ демпфирующего резистора; Q3 – выключатель 10 кВ 2-й секции ФКУ

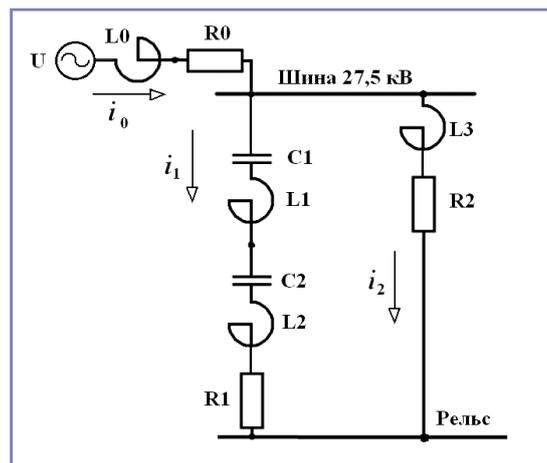


Рис. 2. Расчетная схема ФКУ с учетом системы внешнего электроснабжения и тяговой нагрузки

Наличие двух секций обеспечивает две ступени мощности ФКУ – наименьшую и наибольшую. Первая ступень наименьшей мощности состоит из последовательно включенных двух секций конденсаторных батарей C1 и C2 и двух фильтровых реакторов L1 и L2. Каждая секция ФКУ настроена на резонансную частоту 140 Гц, поэтому обе ступени ФКУ настроены на эту же частоту,

Включение первой ступени в работу происходит следующим образом. При отключенных выключателях Q1, Q2, Q3 включается главный выключатель Q1, а затем через заданное время демпфирующий резистор R1 шунтируется включением выключателя Q2. Первая ступень для ФКУ на посту секционирования тяговой сети обеспечивает допустимый режим напряжения при малых нагрузках и рассчитывается с целью наибольшего снижения потерь электроэнергии в тяговой сети при средней мощности тяговой нагрузки межподстанционной зоны.

Вторая ступень ФКУ наибольшей мощности состоит из включенных в первой секции конденсаторной батареи C1 и фильтрового реактора L1. Включение в работу второй ступени ФКУ при включенной первой ступени происходит следующим образом. При включенном главном выключателе Q1 отключается выключатель Q2, расшунтируя демпфирующий резистор R1, после чего включается выключатель Q3. Через небольшой промежуток времени выключатель Q2 включается и шунтирует демпфирующий резистор R1, после чего установка работает в штатном режиме максимальной мощности. Вторая ступень рассчитывается по нормативному документу [4]

для обеспечения заданной пропускной способности железной дороги.

Схему (рис. 1) можно реализовать и при одном реакторе. Если применить, например, реактор ФРОМ-3200 на 33,6 Ом [1] и ток 230 А, то минимальную мощность можно сформировать на 3 Мвар, максимальную мощность – на 4-6 Мвар. Если в схеме два реактора, то соотношение мощностей может быть любым. При соотношении максимальной мощности к минимальной более 2 напряжение на выключателе Q2 не будет превышать $U_{ш}/3$, где $U_{ш}$ – напряжение на шинах ФКУ (принимаяем $U_{ш} = 27,5-29$ кВ). Таким образом, оправдано напряжение 10 кВ выключателя Q2.

Отметим важное преимущество по надежности представленной схемы. Расчеты и опыт эксплуатации показывают, что в режиме минимальной мощности ФКУ работает 60-80% всего времени. Срок службы конденсаторов в значительной степени зависит от напряжения [3]. Расчеты показывают, что снижение напряжения в режиме минимальной нагрузки повышает ресурс работы конденсаторов в несколько раз. Вот почему в условиях эксплуатации рекомендуется переводить существующие и работающие много лет нерегулируемые установки поперечной емкостной компенсации в регулируемый режим, т.е. делать их переключаемыми.

Для того чтобы убедиться в работоспособности переключаемой ФКУ, с помощью интегрированного пакета Mathcad были исследованы переходные процессы в ней. Расчеты выполнены по схеме замещения (рис. 2), включающей переключаемую ФКУ (C1, L1, C2, L2, R1), систему внешнего электроснабжения (U, L0, R0)

и тяговую нагрузку, эквивалентную в первом приближении цепью L3-R2. Расчеты выполнены для ФКУ, у которой мощность первой ступени – 3 Мвар, а второй – 6 Мвар.

Выключатели Q1, Q2 и Q3 на схеме (рис. 2) не показаны. Их срабатывание, изменяющее параметры элементов схемы замещения, заложено в программе, приведенной на рис. 3. Программа составлена в соответствии со следующими уравнениями для схемы на рис. 2:

$$L_0 \frac{di_0}{dt} + R_0 i_0 + L_3 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 = u(t), \quad (1)$$

$$L_0 \frac{di_0}{dt} + R_0 i_0 + (L_1 + L_2) \frac{di_1}{dt} + u_{c1} + u_{c2} + R_1(t) i_1 = u(t), \quad (2)$$

$$i_0 = i_1 + i_2 \quad \text{или} \quad (3)$$

$$\frac{di_0}{dt} = \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt}. \quad (4)$$

Запишем уравнения (1), (2) и (4) в матричной форме

$$\begin{bmatrix} L_0 & 0 & L_3 \\ L_0 & L_1 + L_2 & 0 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_0}{dt} \\ \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(t) - R_0 i_0 - R_2 i_2 \\ u(t) - R_0 i_0 - R_1(t) i_1 - u_{c1} - u_{c2} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Решение матричного уравнения (5) методом Крамера имеет вид:

$$\frac{di_0}{dt} = \frac{\Delta i_0}{\Delta}; \quad \frac{di_1}{dt} = \frac{\Delta i_1}{\Delta}; \quad \frac{di_2}{dt} = \frac{\Delta i_2}{\Delta}. \quad (6)$$

Определители для формулы (6) находятся следующим образом:

$$\Delta = \begin{bmatrix} L_0 & 0 & L_3 \\ L_0 & L_1 + L_2 & 0 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} = -L_0(L_1 + L_2 + L_3) - L_3(L_1 + L_2); \quad (7)$$

$$\frac{duc_1}{dt} = \frac{i_1}{C1}; \quad (14)$$

$$\frac{duc_2}{dt} = \frac{i_1}{C2}, \quad (15)$$

$$\Delta i_0 = \begin{bmatrix} u(t) - R_0 i_0 - R_2 i_2 & 0 & L_3 \\ u(t) - R_0 i_0 - R_1(t) i_1 - uc_1 - uc_2 & L_1 + L_2 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} =$$

$$-(u(t) - R_0 i_0 - R_2 i_2) \cdot (L_1 + L_2) - L_3(u(t) - R_0 i_0 - R_1(t) i_1 - uc_1 - uc_2); \quad (8)$$

$$\Delta i_1 = \begin{bmatrix} L_0 & u(t) - R_0 i_0 - R_2 i_2 & L_3 \\ L_0 & u(t) - R_0 i_0 - R_1(t) i_1 - uc_1 - uc_2 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} =$$

$$-(L_0 + L_3)(u(t) - R_0 i_0 - R_1(t) i_1 - uc_1 - uc_2) + L_0(u(t) - R_0 i_0 - R_2 i_2); \quad (9)$$

$$\Delta i_2 = \begin{bmatrix} L_0 & 0 & u(t) - R_0 i_0 - R_2 i_2 \\ L_0 & L_1 + L_2 & u(t) - R_0 i_0 - R_1(t) i_1 - uc_1 - uc_2 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} =$$

$$L_0(u(t) - R_0 i_0 - R_1(t) i_1 - uc_1 - uc_2) - (L_0 + L_1 + L_2)(u(t) - R_0 i_0 - R_2 i_2). \quad (10)$$

Выражения для производных токов с учетом выражений (6) – (10) запишутся:

$$\frac{di_0}{dt} = \frac{-(u(t) - R_0 i_0 - R_2 i_2) \cdot (L_1 + L_2) - L_3(u(t) - R_0 i_0 - R_1(t) i_1 - uc_1 - uc_2)}{-L_0(L_1 + L_2 + L_3) - L_3(L_1 + L_2)}; \quad (11)$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{-(L_0 + L_3)(u(t) - R_0 i_0 - R_1(t) i_1 - uc_1 - uc_2) + L_0(u(t) - R_0 i_0 - R_2 i_2)}{-L_0(L_1 + L_2 + L_3) - L_3(L_1 + L_2)}; \quad (12)$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{L_0(u(t) - R_0 i_0 - R_1(t) i_1 - uc_1 - uc_2) - (L_0 + L_1 + L_2)(u(t) - R_0 i_0 - R_2 i_2)}{-L_0(L_1 + L_2 + L_3) - L_3(L_1 + L_2)}. \quad (13)$$

Пользуясь уравнениями (11) – (13) и добавив уравнения для производных напряжений на конденсаторах

получим систему дифференциальных уравнений в форме Коши для решения ее в интегрированном пакете Mathcad. Программа расчета переходного процесса в двухступенчатой ФКУ в интегрированном пакете Mathcad с помощью решения пяти дифференциальных уравнений, записанных в форме Коши, методом Рунге – Кутты четвертого порядка приведена на рис. 3. В программе введены следующие машинные переменные: $x_0 = i_0$; $x_1 = i_1$; $x_2 = i_2$; $x_3 = uc_1$; $x_4 = uc_2$.

Результаты решения системы дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс в схеме с переключаемой ФКУ (рис. 1) при шунтировании первой секции, приведены на рис. 4 и 5. На этих рисунках представлены три стадии переходного процесса при переключении мощности ФКУ с минимального значения на максимальное, т.е. показан процесс шунтирования второй секции ФКУ.

На рис. 4 и 5 стадия 1 – это работа двух последовательно включенных секций С1, L1 и С2, L2 при введенном демпфирующем резисторе R1 – подготовительный этап перед шунтированием второй секции. Стадия 2 – шунтируется вторая секция С2, L2 при включенном демпфирующем резисторе R1. Стадия 3 – при зашунтированной второй секции шунтируется демпфирующий резистор R1, и ФКУ переводится в штатный режим максимальной мощности.

Процесс шунтирования второй секции (стадия 2) в обоих случаях (рис. 4 и 5) происходит в момент максимального тока и нулевого напряжения на конденсаторах С1 и С2 ($t = 0,051$ с). Переходные процессы второй стадии, так же как и процессы первой стадии, в обоих случаях протекают одинаково. Здесь за счет включенного демпфирующего резистора R1 бросков тока и напряжения в оставшейся в работе первой секции С1, L1 не наблюдается.

Процессы, протекающие в замкнутой накоротко второй секции С2, L2, на рис. 4 и 5 не показаны. Исследованиями установлено, что если секция С2, L2 шунтируется в момент максимального тока и нулевого напряжения на конденсаторе С2, то в замкнутой секции не происходит бросков тока и напряжения. Это наиболее благоприятный момент для шунтирования секции. Дело в том, что в процессе

Шунтирование секции. Напряжение и ток в оставшейся секции

U := 27500 f := 50 $\psi := \frac{0 \cdot \pi}{180}$ $\omega := 2\pi \cdot f = 314.159$

$u(t) := \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi)$ R0 := 1.1 L0 := 0.015 + 0.032

C1 := $24 \cdot 10^{-6}$ R2 := 97 L3 := 0.25 C2(t) := if(t ≤ 0.0514, $24 \cdot 10^{-6}$, 10)

L1 := 0.054 R1(t) := if(t ≤ 0.0514, 70, 0.0) L2(t) := if(t ≤ 0.0514, 0.054, 0)

$$x := \begin{pmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \\ uc_1 \\ uc_2 \end{pmatrix} \quad D(t, x) := \begin{bmatrix} \frac{(u(t) - R_0 \cdot x_0 - R_2 \cdot x_2) \cdot (L_1 + L_2(t)) + L_3 \cdot (u(t) - R_0 \cdot x_0 - R_1(t) \cdot x_1 - x_3 - x_4)}{L_0 \cdot (L_1 + L_2(t) + L_3) + L_3 \cdot (L_1 + L_2(t))} \\ \frac{(L_0 + L_3) \cdot (u(t) - R_0 \cdot x_0 - R_1(t) \cdot x_1 - x_3 - x_4) - L_0 \cdot (u(t) - R_0 \cdot x_0 - R_2 \cdot x_2)}{L_0 \cdot (L_1 + L_2(t) + L_3) + L_3 \cdot (L_1 + L_2(t))} \\ \frac{(-L_0) \cdot (u(t) - R_0 \cdot x_0 - R_1(t) \cdot x_1 - x_3 - x_4) + (L_0 + L_1 + L_2(t)) \cdot (u(t) - R_0 \cdot x_0 - R_2 \cdot x_2)}{L_0 \cdot (L_1 + L_2(t) + L_3) + L_3 \cdot (L_1 + L_2(t))} \\ \frac{1}{C1} \cdot x_1 \\ \frac{1}{C2(t)} \cdot x_1 \end{bmatrix}$$

Z := rfixed(x, 0.05, 50000, D) n := 0..50000

$t_n := Z_n,0$ $i_n := Z_n,2$ $uc1_n := Z_n,4$ $uc2_n := Z_n,5$

Рис. 3. Программа расчета переходного процесса в двухступенчатой ФКУ

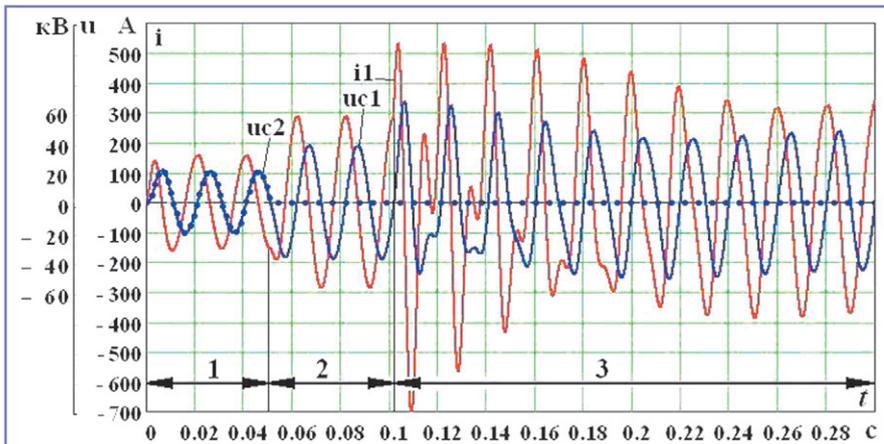


Рис. 4. Переходный процесс перевода ФКУ в режим максимальной мощности. Шунтирование второй секции и шунтирование демпфирующего резистора производится в максимум тока

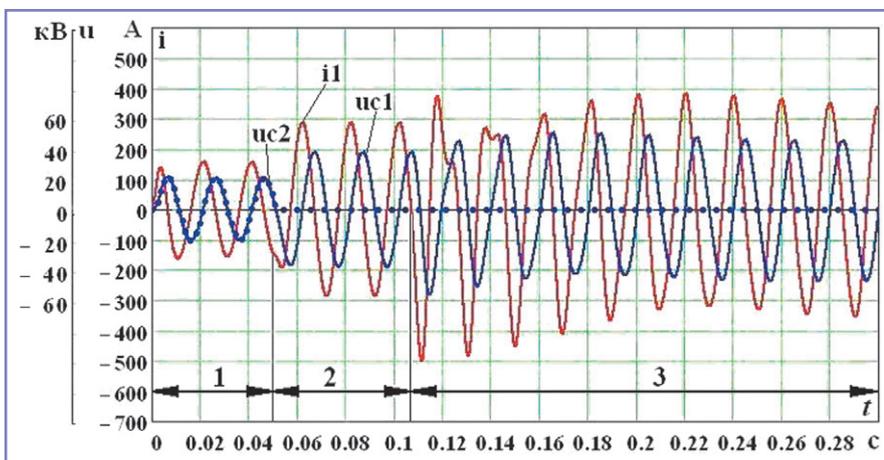


Рис. 5. Переходный процесс перевода ФКУ в режим максимальной мощности. Шунтирование второй секции производится в максимум тока, а шунтирование демпфирующего резистора производится в ноль тока

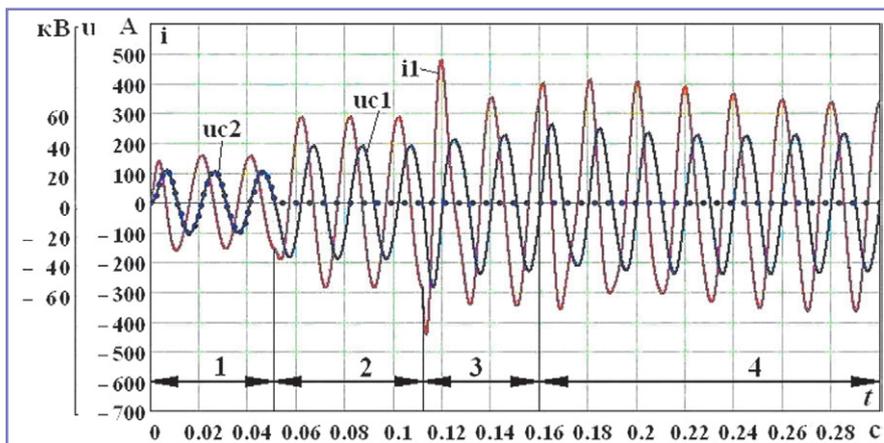


Рис. 6. Переходный процесс перевода ФКУ в режим максимальной мощности. Шунтирование второй секции производится в максимум тока, а шунтирование демпфирующего резистора – в два этапа в максимум тока

работы секции в ее элементах С2 и L2 периодически накапливается и отдается электрическая энергия. Емкостное сопротивление конденсатора С2 больше индуктивного сопротивления реактора

L2. Поэтому максимальное значение запасенной энергии у конденсатора значительно больше, чем у реактора. За счет энергии, запасенной в элементах С2 и L2, в замкнутой секции С2, L2 возникают

синусоидальные колебания с частотой 140 Гц, которые постепенно затухают. Чем меньше запасенная энергия, тем меньше амплитуда колебаний в замкнутой коротко секции. Следовательно, наиболее благоприятный момент для шунтирования секции С2, L2 – это момент времени, когда напряжение на конденсаторе С2 близко к нулю, как это показано на рис. 4 и 5. В то же время за счет включения демпфирующего резистора R1 не происходит перенапряжений и в оставшейся в работе первой секции С1, L1, что также видно на рис. 4 и 5.

Стадия 3 протекает по-разному. На рис. 4 демпфирующий резистор шунтируется при $t = 0,102$ с в момент максимального тока, а на рис. 5 – при $t = 0,107$ с в момент прохождения тока через ноль. В первом случае максимальное значение тока составляет 700 А, а во втором – 500 А. В первом случае максимальное значение напряжения на конденсаторе С1 составляет 66,4 кВ, а во втором – 55 кВ. Во втором случае переходный процесс протекает более спокойно, с меньшими бросками тока и напряжения на конденсаторе. Таким образом, при шунтировании демпфирующего резистора в максимум тока при зашунтированной второй секции броски тока в первой секции возрастают на 40%, а броски напряжения – на 20% по сравнению с бросками при шунтировании демпфирующего резистора в ноль тока при максимальном значении напряжения на конденсаторе С2. Здесь при шунтировании демпфирующего резистора требуется, чтобы мощность, накопленная в элементах оставшейся в работе секции, была максимальной.

На рис. 6 показан переходный процесс перевода ФКУ в режим максимальной мощности, когда шунтирование второй секции при включенном демпфирующем резисторе также производится в максимум тока, но шунтирование демпфирующего резистора R1 происходит в два этапа, причем в наиболее неблагоприятные моменты времени, т.е. в максимум тока. В этом случае у демпфирующего резистора с сопротивлением 70 Ом сначала шунтируется только часть резистора с сопротивлением 55 Ом (стадия 3), а затем оставшаяся часть с сопротивлением 15 Ом (стадия 4) [9]. Переходный процесс в этом случае даже при коммутациях в наиболее неблагоприятные моменты времени протекает более спокойно, с меньшими бросками тока и напряжения. Анализ показал, что броски напряжения на конденсаторе С1

первой секции при этом не превышают 110% от номинального значения. Переходный процесс будет проходить еще благоприятнее, если применить новое техническое решение, предложенное в [10] и позволяющее шунтировать демпфирующий резистор в три этапа.

Выводы

1. Рассмотренный вариант переключаемой фильтрокомпенсирующей установки обеспечивает допустимые значения перенапряжений в переходных режимах при переключении ступеней мощности ФКУ.

2. Для снижения бросков тока в ФКУ в переходных режимах следует шунтировать секцию С2-L2 без демпфирующего резистора в момент времени, когда напряжение на конденсаторе близко к нулю. Демпфирующий резистор следует вводить для ограничения бросков тока и напряжения в первой секции при шунтировании второй секции. Шунтировать демпфирующий резистор следует в нуль проходящего по нему тока.

3. При несинхронизированном шунтировании демпфирующего резистора рекомендуется проводить эту операцию в два этапа.

Литература

- Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог: монография. – М.: МИИТ, 2012. – 211 с.
- Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
- Герман Л.А., Серебряков А.С., Дулепов Д.Е. Фильтрокомпенсирующие установки в системах тягового электроснабжения железных дорог / Княгинино, НГИЭУ, 2017. – 402 с.
- Система тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Методика выбора мест размещения и мощности устройств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности / СТО «РЖД». 07.022.2-2015.
- Герман Л.А., Серебряков А.С., Максимова А.А. Фильтрокомпенсирующие установки в тяговых сетях переменного тока / Вестник ВНИИЖТ, 2016, № 1. – С. 26-34.
- Патент РФ № 2475912 от 09.03.2011. Устройство переключаемой однофазной поперечной емкостной компенсации (Серебряков А.С., Герман Л.А., Дулепов Д.Е., Семенов Д.А.). Оpubл. 20.02.2013. Бюл. 5.
- Патент РФ на изобретение № 2459335 от 22.04.2011. Устройство переключаемой одно-

фазной поперечной емкостной компенсации (Васильев С.Н., Гончаренко В.П., Латманов М.В., Мизинцев А.В.). Оpubл. 20.08.2012. Бюл. 23.

8. Патент РФ на изобретение № 2656368 от 01.07.2016. Устройство ступенчатой поперечной емкостной компенсации (Герман Л.А., Серебряков А.С., Гончаренко В.П., Якунин Д.В., Максимова А.А. и др.). Оpubл. 05.06.2018. Бюл. 16.

9. Патент РФ на полезную модель № 102842 от 21.07.2010. Устройство поперечной емкостной компенсации (Герман Л.А., Серебряков А.С., Дулепов Д.Е., Семенов Д.А.). Оpubл. 10.03.2011. Бюл. 7.

10. Патент РФ на изобретение № 2647709 от 09.02.2016. Фильтрокомпенсирующее устройство (Серебряков А.С., Герман Л.А., Дулепов Д.Е.). Оpubл. 19.03.2018. Бюл. 8.

Серебряков Александр Сергеевич

Родился в 1939 году. В 1961 году окончил Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева по специальности «Электрификация промышленных предприятий и установок». Доктор технических наук, профессор. Защитил докторскую диссертацию на тему «Методы и средства диагностики изоляции электрических машин и аппаратов их защиты». В настоящее время работает профессором кафедры «Техника и технологии железнодорожного транспорта» филиала Самарского государственного университета путей сообщения в Нижнем Новгороде. Член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ. Автор более 350 научных работ, в том числе 10 книг. Имеет более 50 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Герман Леонид Абрамович

Родился в 1937 году. В 1959 году окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик». Защитил докторскую диссертацию по теме «Теория и практика совершенствования режима системы тягового электроснабжения переменного тока с установками емкостной компенсации». Доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии железнодорожного транспорта» филиала Самарского государственного университета путей сообщения в Нижнем Новгороде, член-корреспондент Российской академии транспорта. Автор более 350 научных трудов, 70 изобретений и патентов. Имеет 2 правительственные награды.

Осокин Владимир Леонидович

Родился в 1976 году. В 1998 году окончил Нижегородскую государственную сельско-

хозяйственную академию. Кандидат технических наук, доцент. В 2011 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Повышение эффективности функционирования электрических подогревателей воды путем разработки стенда для их тестирования». В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электрификация и автоматизация» Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (НГИЭУ). Оpubликовал 10 печатных работ, 2 монографии, получил 1 патент на изобретение.

Serebryakov Alexander

Was born in 1939. In 1961 he graduated from Nizhny Novgorod State Technical University after the name of R.E. Alekseev on specialty Electrification of industrial enterprises and unites. He is a doctor of technical sciences, professor. He defended his doctor's dissertation with topic Methods and means of diagnostics of insulation of electrical machines and devices of its protection. Now he is the professor of the chair Technique and technology of railway transport at branch of Samara StateTransport University in Nizhny Novgorod. He is corresponding member of the Russian academy of electrotechnical sciences. He is author of more than 300 scientific papers, including 10 books. He has more than 50 certificates of authorship and patents for inventions.

German Leonid

Was born in 1937. In 1959 he graduated from Moscow Institute of Transport Engineers by specialty Railway engineer-electrician (1959). He defended his doctor's dissertation with topic Theory and practice of improving the mode traction system of alternating current with capacitive compensation units. He is a doctor of technical sciences, professor of the chair Technique and technology of railway transport at branch of Samara State Transport University in Nizhny Novgorod. He is corresponding member of the Academy of Transport of the Russian Federation. He is author of more than 350 scientific works, 70 inventions and patents. He has 2 government awards.

Osokin Vladimir

Was born in 1976. In 1998 he graduated from Nizhny Novgorod State Agricultural Academy. He is a candidate of technical sciences, associated professor. In 2011 he defended his candidate's Dissertation with topic Increasing the efficiency of electric water heaters by developing its test facility. Now he is a Chief of the chair Electrification and automation at Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University. He published 10 scientific papers, 2 monographs, 1 patent for invention.

Учет постоянной времени нагрева при разработке электростартера для запуска газотурбинных установок

// Developing explosion proof electric starter for gas-turbine engine start, taking in account the heating time constant //

**Власов А.И., к.т.н.,
Коньшев Д.В., Коротков И.В.,
АО «Электропривод», Киров**

*В статье приведен опыт по разработке взрывобезопасного электростартера для запуска газотурбинной установки с учетом постоянной времени нагрева и с соблюдением полученного авторами тождественного соотношения.
Ключевые слова: система электрозапуска, газотурбинный электродвигатель, электростартер, постоянная времени нагрева, тождественное соотношение.*

*The article presents experience in developing the explosion proof electric starter for gas-turbine engine start, taking in account the heating time constant and identical relation, obtained by the authors of article.
Keywords: electric start system, gas-turbine engine, electric starter, heating time constant, identical relation.*

НК-38СТ, Д-30ЭУ, ПС-90ГП, АЛ-31СТ, ГТД, в составе газоперекачивающего агрегата ГТН-6Р и ГПА-16 «Ладога», ГТУ типа НК-361, газотурбовоза ГТ-1, газоперекачивающего агрегата ГТН-6Р на Медвеьем нефтегазо-конденсатном месторождении и других, а также оказывает сервисные услуги для эксплуатируемых систем [1, 4]. Основные технические характеристики систем запуска представлены в таблице 1.

В авиации для использования в качестве электростартеров в системе запуска ГТД применяются следующие типы электрических машин: синхронные бесконтактные, бесконтактные переменного тока, асинхронные, бесконтактные с когтеобразным ротором, бесконтактные

В связи с участием России в выполнении условий Киотского протокола для энергетических компаний в конце 90-х годов прошлого века обозначился ряд проблем, связанных с запуском газотурбинных двигателей (ГТД), предназначенных для работы в составе газоперекачивающих агрегатов (ГПА) и газотурбинных электростанций (ГТЭС) [1, 2].

На тот момент для запуска газотурбинных установок (ГТУ), работающих в составе ГТЭС и ГПА, использовались пневмостартеры, в которых для турбодетандера расходуются тысячи кубических метров газа. Для энергетических компаний выходом из сложившейся ситуации стало внедрение электрического запуска вместо турбодетандерного. Его существенное преимущество обеспечивается выполнением требований по взрывобезопасности электрозапуска ГТД, работающих в составе ГПА и ГТЭС [3].

Значительный вклад в развитие электрического запуска ГТД для ГПА и ГТЭС внесло предприятие АО «Электропривод», которое на сегодняшний день разрабатывает, изготавливает и серийно поставляет комплектные системы электрозапуска ГТД.

В состав комплектной системы электрозапуска входят электростартер, блок управления электростартером (далее – БУС) и соединительные кабели.

В настоящее время параметрический ряд электростартеров с БУС

(рис. 1) обеспечивает электрозапуск более 300 газотурбинных двигателей, таких как НК-16СТ, НК-16-18СТ, НК-36СТ, НК-37,

Таблица 1. Основные технические характеристики систем запуска

Система	Тип электростартера (электродвигателя)	Блок управления	Мощность электростартера, кВт	Частота вращения выходного вала, об/мин, не менее	Масса электростартера (электродвигателя), кг, не более
СТВД-25Д-9000	(ДАТВ300-120Т-9000)	БУС-120Т	120	9000	135,5
–	СТЭ-18СТ-АЛ	БУС-18СТ-АЛ, БУС-120Т-АЛ	65	4900	(57)
СТВД-25Д-10Т	(ДАТВ300-140Т-10)	БУС-140Т	140	10000	(140)
СТВД-30Д-11Т	(ДАТВ300-160Т-11)	БУС-160Т	220	11000	(140)
СТВД-400-10Т	(ДАТВ400-200Т-10)	БУС-220Т	200	10200	300
СТВД-400-12Т	(ДАТВ400-200Т-12)	БУС-220Т-12	220	11900	300
–	СТЭ-18СТ	БУС-18СТ	65	2600	(57)
–	СТЭ-18СТ-361-1,1М	БУС-18СТ-361-1,1М	65	2200	(57)



Рис. 1. Ряд электростартеров

с комбинированным возбуждением, индукторные, вентильно-индукторные, вентильные магнитоэлектрические, коллекторные постоянного тока [5].

Широко распространенные электростартеры постоянного тока для запуска авиационных ГТУ [6] содержат сцепную кулачковую муфту одностороннего действия, редуктор, коллекторный электродвигатель постоянного тока и устройство включения стартера.

Недостатками электростартера являются низкая надежность щеточно-коллекторного узла, наличие искрения в котором усложняет обеспечение взрывобезопасности электростартера. Большие габариты на требуемую мощность для запуска ГТУ, повышенные токи в обмотках приводят к их критическому нагреву, повышенному износу щеток и ускоренному нагреву коллектора.

Электростартеры разработки АО «Электропривод» спроектированы и изготовлены на основе асинхронных короткозамкнутых электродвигателей с повышенной частотой вращения 12000 об/мин и более, подключенных к питающей сети через частотный преобразователь, снабженный измерителем частоты вращения электростартера, и устройство включения электростартера.

Такой электростартер также содержит сцепную кулачковую муфту одностороннего действия и редуктор [3].

ГТД обладают большим моментом инерции ротора турбины – порядка 30 кг·м², время раскрутки при запуске ГТУ достигает 100 секунд и более. Известные электростартеры развивают быстро нарастающий пусковой момент, который может по величине превышать необходимый момент для раскрутки ГТУ. Это приводит к динамическим ударам в сцепной кулачковой муфте одностороннего действия электростартера как в момент запуска, так и в процессе раскрутки, что может послужить причиной поломки трансмиссии.

Развиваемый электростартером момент при выходе ГТУ на режим работы становится избыточным, что перегружает трансмиссию и приводит к перегреву электростартера.

В электростартерах АО «Электропривод» также наблюдались удары в сцепной кулачковой муфте одностороннего действия при сцеплении и в процессе раскрутки ГТУ. То есть момент, развиваемый асинхронным электродвигателем, передаточное число редуктора и, следовательно, нагрев обмоток асинхронного

электродвигателя не являлись оптимальными в совокупности для использования его в качестве электростартера для запуска ГТУ.

При этом электростартер устанавливается на месте пневмостартера и не должен требовать доработки мест стыковки и дополнительных мест для размещения в ГТУ, что позволит производить монтаж системы электрозапуска с электростартером в условиях эксплуатации.

В связи с вышеперечисленным перед разработчиками АО «Электропривод» была поставлена задача по созданию взрывобезопасного электростартера с габаритами, позволяющими производить монтаж системы электрозапуска с электростартером в условиях эксплуатации, без доработки мест стыковки и дополнительных мест для размещения в ГТУ, с достаточным и оптимальным развиваемым моментом асинхронного двигателя электростартера, некритичным нагревом его обмоток, позволяющим производить надежный и безопасный электрозапуск газотурбинной установки.

Известно, что при проектировании электродвигателя, специально предназначенного для кратковременного режима работы, стремятся к увеличению постоянной времени нагрева T , так как при этом растет коэффициент перегрузки по току и мощности. Увеличение постоянной времени нагрева T , как правило, достигается увеличением теплоемкости электродвигателя.

Постоянная времени нагрева T растет при прочих равных условиях пропорционально первой степени линейных размеров [7]. В данном случае габариты электростартера ограничены требованием возможности замены пневмостартера в эксплуатации, и это ограничивает возможность увеличения линейных размеров, тем более что обеспечение взрывобезопасности само по себе уже вносит увеличение размеров, например, в местах стыковок корпусных деталей электростартера.

Известно выражение для постоянной времени нагрева асинхронного электродвигателя T [8]:

$$T = \theta_y \cdot \frac{c \cdot G}{P}, \quad (1)$$

где θ_y – установившееся превышение температуры электродвигателя над температурой окружающей среды;

c – удельная теплоемкость, Дж/кг·К;

G – масса, кг;

P – мощность внутренних источников нагрева, Дж/с.

Для упрощения воспользуемся оценкой эквивалентных величин аналогично [9].

Основной внутренней источник нагрева асинхронного электродвигателя – это нагрев обмоток при прохождении по ним тока. Тепло, выделяемое в обмотках, определяется по закону Джоуля – Ленца, следовательно,

$$P \sim I^2,$$

где I – ток статора асинхронного электродвигателя, и, учитывая выражение (1), можно записать, что

$$T \sim \frac{1}{I^2}. \quad (2)$$

Момент, развиваемый асинхронным электродвигателем, равен

$$M \sim \frac{1}{I^2}, \quad (3)$$

где I^2 – приведенный к статору вторичный ток.

Следовательно, учитывая выражения (2) и (3), получаем

$$T \sim \frac{1}{M}. \quad (4)$$

Отсюда увеличить постоянную времени нагрева асинхронного электродвигателя T можно, уменьшив момент асинхронного электродвигателя. Исходя из известного соотношения [9],

$$t = 4 \cdot T, \quad (5)$$

где t – интервал времени, за которое достигается практически установившееся превышение температуры электродвигателя над температурой окружающей среды; в пределе можно записать, что необходимо выполнить соотношение

$$\frac{M_H}{M_{эл}} = \frac{t}{T} = 4, \quad (6)$$

где M_H – номинальный момент раскрутки газотурбинной установки,

$M_{эл}$ – номинальный момент асинхронного электродвигателя.

Понижающим редуктором с передаточным числом i получаем на выходе электростартера заданный номинальный момент раскрутки газотурбинной установки M_H . Отсюда, с учетом КПД редуктора η , приходим к соотношению

$$\frac{M_H}{M_{эл}} = \frac{t}{T} = i \cdot \eta = 4. \quad (7)$$

Если рассмотреть график нагрева (рис. 2) [9], то естественно допустить использование в соотношении чисел 1, 2 и 3. Все зависит от назначения электростартера, условий использования, характера и величины нагрузок.

На АО «Электропривод» по предложенному соотношению выполнен

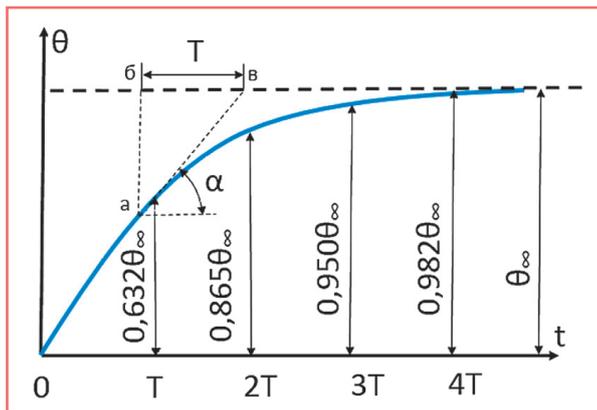


Рис. 2. Кривая нагрева идеального однородного твердого тела

электростартер СТЭ-18СТ с блоком управления БУС-18СТ (рис. 3).

Соединение электростартера с коробкой приводов газотурбинных установок при помощи шлицевого вала, а крепление по ОСТ 11876-74, обеспечивают установку электростартера вместо пневмостартера.

Электростартер обеспечивает холодную прокрутку, горячий запуск двигателя и промывку газозвдушного тракта. Режим работы электростартера повторно-кратковременный. В состав электростартера входят следующие сборочные единицы, выполненные в одном корпусе: асинхронный электродвигатель, редуктор, муфта сцепления и выходной вал.

Асинхронный электродвигатель предназначен для привода электростартера и состоит из корпуса со статором, ротора и подшипникового щита. В корпус запрессован пакет статора с обмоткой. Соединение фаз обмотки – «звезда», число пар полюсов обмотки $p = 2$. На корпусе расположена панель с выводами для подключения асинхронного электродвигателя к БУС-18СТ. На выходном конце вала ротора электростартера имеются шлицы для установки зубчатого колеса редуктора.

Редуктор предназначен для уменьшения частоты вращения и увеличения момента, передаваемых от асинхронного электродвигателя к выходному валу электростартера. Редуктор одноступенчатый, четырехпоточный, выполнен в виде планетарной ступени с остановленным водилом. Центральное зубчатое колесо ступени закреплено на валу асинхронного электродвигателя, четыре паразитных зубчатых колеса установлены на неподвижном водиле, закрепленном в корпусе. Подвижное корончатое зубчатое колесо связано с ведущим элементом муфты сцепления посредством эвольвентного

шлицевого соединителя.

Муфта сцепления предназначена для сцепления электростартера с помощью выходного вала со шлицами с ротором газотурбинной установки во время запуска и расцепления после прекращения запуска.

Выходной вал предназначен для передачи крутящего момента от электростартера к ротору газотурбинной установки.

Значения параметров электростартера СТЭ-18СТ сведены в таблицу 2.

Принимая во внимание значения параметров из таблицы 2, уменьшив момент на валу асинхронного электродвигателя,

соответственно, увеличиваем постоянную времени нагрева T , следовательно, увеличивается и t – интервал времени, за которое достигается практически установившееся превышение температуры электродвигателя над температурой окружающей среды.

Соотношение не изменится. Таким образом, в данном электростартере СТЭ-18СТ выполнены предложенные выше соотношения.

По техническим условиям на СТЭ-18СТ нагрев обмоток составляет не более 105°C , что подтверждает правильность предложенного технического решения для исполнения электростартера.

Технический уровень разработанного электростартера подтвержден патентом на полезную модель № 182830.

Таблица 2. Значения параметров электростартера СТЭ-18СТ

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальная мощность при частоте вращения выходного вала 2520 об/мин, кВт	65
Ток, потребляемый электростартером при номинальном моменте, не более, А	240
Номинальный момент $M_{н}$, развиваемый электростартером, Н·м	245
КПД редуктора, о.е.	0,9
Передаточное число редуктора	4,45
Момент на валу стартера $M_{эл}$, Н·м	61,25
Отношение $\frac{M_{н}}{M_{эл}}$	4

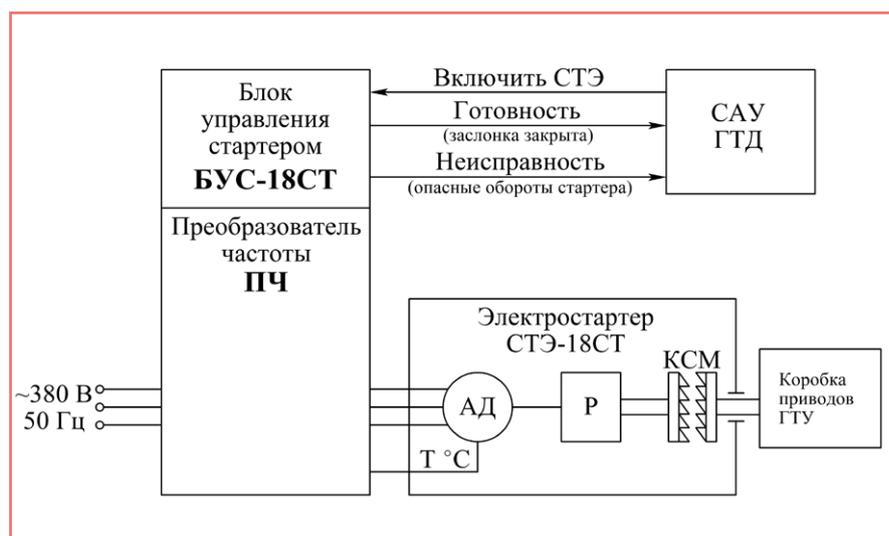


Рис. 3. Структурная схема электростартера СТЭ-18СТ:

САУ ГТД – система автоматического управления ГТД, БУС-18СТ – блок управления электростартером,

ПЧ – преобразователь частоты, СТЭ-18СТ – электростартер, АД – асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором,

Р – редуктор, КСМ – кулачковая сцепная муфта, Т°С – тепловая защита, Ротор ВД ГТД – ротор высокого давления газотурбинного двигателя

Выводы

1. Найдено аналитическое тождественное соотношение (7), устанавливающее взаимосвязь между моментом раскрутки ГТУ, моментом и постоянной времени нагрева асинхронного электродвигателя, КПД и передаточного числа редуктора электростартера.

2. С соблюдением тождественного соотношения (7) достигнут технический результат, получен малогабаритный, мощный, с увеличенными перегрузочными способностями, надежный электростартер во взрывозащищенном исполнении.

3. Предложенное техническое решение может применяться в различных отраслях промышленности, таких как автомобильная, судостроение, авиационная и т.д., где требуется осуществлять электростартерный запуск.

Литература

1. Туев Ю.Р. Об опыте творческого решения проблем запуска газотурбинных двигателей // «Электроника и электрооборудование транспорта», 2011, № 4. – С. 26-28.
2. Данилович А.С. Электрозпуск – повышение конкурентоспособности // Пермские газовые турбины, ИБ № 8, 2006. – www.avid.ru/pr/other/ntex/ib8/elektrozapusk/
3. Волокитина Е. В., Никитин В.В., Носков А.В., Шалагинов В.Ф. Электростартер для запуска газотурбинных установок // «Электроника и электрооборудование транспорта», 2005, № 5. – С. 39-42.
4. Грязев К.Д. Частотно-управляемые электростартеры для запуска газотурбинных установок / Грязев К.Д., Новоселова А.В., Шалагинов В.Ф. // Научно-технический семинар «Электропривод: теория, технология, практика и перспективы», Киров, 25 апреля 2018 г. Сборник тезисов докладов. – Киров, АО «Электропривод», 2018. – 117 с.

5. Власов А.И. Выбор типа стартер-генератора для автономных подвижных объектов / Власов А.И., Волокитина Е.В. // «Электроника и электрооборудование транспорта», 2008, № 5. – С. 2-6.

6. Стартер-генератор СТГ-12ТМВ / Техническое описание, инструкция по технической эксплуатации. – Киров, АО «Электропривод», 1964.

7. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х ч. Ч. 2. Машины переменного тока. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. – 3-е изд, перераб. – Л.: Энергия, 1973. – 684 с. с ил.

8. Гуревич Э.И. Тепловые испытания и исследования электрических машин. Л.: Энергия, 1977. – 296 с. с ил.

9. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

Власов Андрей Иванович

Родился в 1979 году. В 2002 году окончил Вятский государственный университет по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2010 году защитил диссертацию на тему «Магнитоэлектрический стартер-генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения». Опыт работы – 15 лет. В настоящее время работает заместителем генерального директора – техническим директором АО «Электропривод». Имеет 32 научные публикации.

Конышев Дмитрий Владимирович

Родился в 1977 году. Окончил Вятскую государственную сельскохозяйственную академию по специальности «Механизация сельского хозяйства» (1999) и Вятский государственный университет по специальности «Экономика и управление на промышленном предприятии» (2003). В настоящее

время работает генеральным директором АО «Электропривод». Имеет 5 научных публикаций.

Коротков Илья Владимирович

Родился в 1955 году. В 1980 году окончил Кировский политехнический институт по специальности «Электромеханика». Опыт работы – 38 лет. В настоящее время работает начальником Бюро патентования, информации и защиты интеллектуальной собственности АО «Электропривод». Имеет 10 научных публикаций.

Vlasov Andrey

Was born in 1979. In 2002 he graduated from Vyatka State University majoring in Electricengineering. He is candidate of technical sciences. In 2010 he defended the dissertation with topic Magnetolectric starter-generator in the system of power supply of new generation aircraft. He has 15 years of work experience. At present he works as Deputy general director – technical director of Electroprivid OJSC. He has 32 scientific publications.

Konyshev Dmitri

Was born in 1977. He graduated from Vyatka State Academy of Agriculture Sciences majoring in Agricultural engineering (1999) and Vyatka State University majoring in Economics and management on industrial enterprise (2003). At present he works as general director of Electroprivid OJSC. He has 5 scientific publications.

Korotkov Iliia

Was born in 1955. In 1980 graduated from Kirov Polytechnic Institute with a degree in Electrical Machinery. Has 38-year working experience. At the present he is a head of patent science, information and intellectual property protection bureau at Electroprivid OJSC. He has 10 research articles.

Робастные алгоритмы управления реактивным электродвигателем с анизотропной магнитной проводимостью ротора

// Robust algorithms for the control of reactive motor with anisotropic magnetic conductivity of the rotor //

Белоусов И.В.,
Гельвер Ф.А., к.т.н.,
Самосейко В.Ф., д.т.н., профессор,
филиал ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный
научный центр», Санкт-Петербург

Предложены алгоритмы векторного управления реактивным электродвигателем с анизотропной магнитной проводимостью ротора, которые обладают робастностью. Выполнены синтез подчиненной системы управления и настройка регуляторов на технический оптимум. Предложенные алгоритмы управления позволяют реализовать оптимальное управление реактивной электрической машиной с анизотропной магнитной проводимостью ротора по критериям быстродействия и энергетической эффективности. Ключевые слова: робастность, реактивный электродвигатель с анизотропной магнитной проводимостью ротора, быстродействие, энергетическая эффективность, критерий энергетической эффективности, фазная матрица, периодические коэффициенты, характеристический полином, контур тока намагничивания, контур тока нагрузки, устойчивость, технический оптимум.

The algorithms of vector control of the reactive electric motor with anisotropic magnetic conductivity of the rotor, which have robustness, are proposed. Adapted for the synthesis of a subordinate control system and setting of regulators on the technical optimum. The proposed control algorithms allow to realize the optimal control of the reactive electric machine with anisotropic magnetic conductivity of the rotor by the criterion of speed or energy efficiency. Keywords: robustness, reactive electric motor with anisotropic magnetic conductivity of the rotor, speed, energy efficiency, the criterion of energy efficiency, phase matrix, periodic coefficients, characteristic polynomial, circuit of the magnetizing current, the current loop load resistance, the technical optimum.

Важнейшим элементом электропривода является электрическая машина. Наибольшее распространение в электроприводе получили классические машины, принцип действия которых основан на пульсациях взаимных индуктивностей обмоток статора и ротора – синхронные и асинхронные электрические машины. Однако развитие полупроводниковой преобразовательной техники привело к тому, что в последнее время все большее внимание обращается на реактивные электрические машины, принцип действия которых основан на пульсациях собственных индуктивностей обмоток статора (машины с зубчатым статором и ротором [1] – [7]), а также на пульсациях

как собственных, так и взаимных индуктивностей обмоток статора (реактивные электрические машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора [8]). Последние получают все большее распространение и вызывают большой интерес у специалистов. Исследованию

таких электрических машин посвящено большое количество работ как в России [8] – [13], так и за рубежом [14] – [24].

В этих работах убедительно показано, что реактивные электрические машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора имеют высокие энергетические, массогабаритные и эксплуатационные показатели, превосходящие аналогичные показатели классических электрических машин. Данные показатели особенно актуальны для электроприводов, используемых в автономных электроэнергетических системах.

Структурная схема электропривода с реактивным электродвигателем, ротор которого имеет анизотропную магнитную проводимость, приведена на рис. 1. Полагается, что в силовой канал такого электропривода входит преобразователь частоты и реактивный двигатель с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Информационное обеспечение управления приводом осуществляется с помощью датчиков токов статора и датчика положения ротора. Управляющее устройство представляет собой микропроцессорный блок, формирующий управляющие сигналы U_s^* , поступающие в систему управления преобразователем частоты. Выходной переменной электропривода является электромагнитный момент или скорость вращения ротора. Управление выходной переменной осуществляется задающим сигналом u_3 , поступающим в управляющее устройство от системы управления с более высоким рангом иерархии.

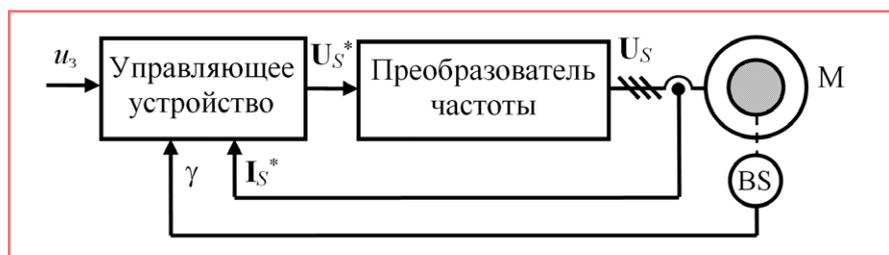


Рис. 1. Структурная схема электропривода с реактивным электродвигателем

Разработке эффективных алгоритмов управления электроприводом с реактивными электрическими машинами с анизотропной магнитной проводимостью ротора посвящается данная работа. Наиболее распространенными критериями эффективности алгоритмов управления электроприводом в зависимости от решаемых задач являются быстрдействие или энергетическая эффективность. В качестве критерия энергетической эффективности далее понимается величина потерь энергии, затрачиваемая на единицу заданного электромагнитного момента.

Базовые и относительные величины

Разработка алгоритмов управления предполагает знание математических моделей элементов силового канала электропривода. При описании математических моделей и разработке алгоритмов управления электроприводом удобно применять относительные единицы различных физических величин [25]. Удобство обусловлено тем, что результаты исследования различных электроприводов, характеризующихся значительными отличиями в мощности, становятся универсальными и сопоставимыми. Кроме того, введение относительных величин ведет к сокращению числа параметров, фигурирующих в исследовании, и делает полученные результаты более обозримыми и удобными для использования.

Для введения относительных единиц переменных, используемых в математической модели, требуется выделить набор базовых величин. Базовые величины разделим на основные и производные. В качестве набора базовых величин примем минимальный набор констант, имеющих различные единицы измерений, который позволяет выразить остальные производные базовые величины с другими единицами измерений через набор основных базовых величин.

При выборе основного набора базовых величин целесообразно исходить из номинальных данных электрической машины: номинального напряжения статора электродвигателя U_n ; номинального тока статора I_n ; номинальной угловой частоты напряжения статора ω_n . В качестве основных базовых целесообразно использовать величины:

$$U_6 = \sqrt{2} \times U_n; I_6 = \sqrt{2} \times I_n; \omega_6 = \omega_n.$$

Производные базовые величины синтезируются из основных базовых

величин: $R_6 = U_6/I_6 = U_n/I_n$ – сопротивление; $L_6 = U_6/I_6/\omega_6$ – индуктивности; $M_6 = p \times (m/2) \times U_6 \times I_6/\omega_6$ – электромагнитного момента; $T_6 = 1/\omega_6$ – времени; $P_6 = (m/2) \times U_6 \times I_6$ – мощности, где m – где число фаз; p – число пар полюсов.

Переменная, выраженная в относительных единицах, равна отношению переменной к соответствующему базовому значению. Переменные, выраженные в относительных единицах, будем помечать верхним индексом *.

Математическая модель механической части привода

При разработке алгоритмов управления будем также полагать, что механическая часть электропривода имеет голономные связи. С учетом этого электро-механическая система рассматривается как одномассовая, приведенная масса которой сосредоточена в роторе электродвигателя. Описание динамики скорости вращения ротора осуществляется уравнением движения Ньютона

$$T_{\text{мех}} \times p\omega^* = M^* - M_c^*,$$

где $T_{\text{мех}}$ – механическая постоянная времени; ω^* – относительная угловая скорость вращения ротора; M^* – относительный электромагнитный момент; M_c^* – относительное значение момента сопротивления.

Математическая модель реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора

При разработке алгоритмов управления электроприводом полагается, что быстрдействие преобразователя частоты существенно превосходит скорость протекания электромагнитных процессов в электрической машине. Поэтому основное влияние на динамические процессы в электроприводе оказывает электрическая машина.

Дифференциальные уравнения напряжений, описывающие динамику электромагнитных процессов, имеют периодические коэффициенты

$$U_s = R_s \cdot I_s + p \{L_{ss}(\gamma) \cdot I_s\}, \quad (1)$$

где U_s – вектор напряжений на обмотках статора; I_s – вектор токов в обмотках статора; $R_s = R_s \cdot 1$ – матрица сопротивлений обмотки статора; R_s – сопротивление обмотки статора; p – оператор дифференцирования по времени t ; $\gamma = \omega \cdot t$ – угол

поворота ротора; ω – угловая электрическая скорость вращения ротора; $L_{ss}(\gamma) = D_s^T(\gamma) \cdot L_0 \cdot D_s(\gamma)$ – матрица основных индуктивностей m -фазной обмотки статора; $D_s(\gamma)$ – фазная матрица; $L_0 = \text{diag}(L_d, L_q)$ – матрица экстремальных проводимостей обмотки статора; L_d и L_q – продольная и поперечная индуктивности; $r = 2 \cdot \pi/m$ – угол фазового сдвига.

Фазная матрица представляет собой проекции магнитных осей фазных обмоток статора на оси координат d, q на плоскости поперечного разреза ротора машины:

$$D_s(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & \cos(p+\gamma) & \dots & \cos((m-1) \cdot p+\gamma) \\ \sin(\gamma) & \sin(p+\gamma) & \dots & \sin((m-1) \cdot p+\gamma) \end{bmatrix}$$

Полагается, что ось координат d совпадает с направлением наибольшей магнитной проводимостью ротора, а ось координат q – с направлением наименьшей магнитной проводимостью ротора.

Уравнения напряжений (1) имеют периодические коэффициенты. Их непосредственное использование для синтеза системы управления проблематично. Поэтому целесообразно их преобразование к уравнениям с постоянными коэффициентами, полагая

$$U_1 = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \frac{2}{m} \cdot D_s(\gamma) \cdot U_s;$$

$$I_1 = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{m} \cdot D_s(\gamma) \cdot I_s.$$

Уравнения напряжений на обмотках статора и ротора (1), подвергнутые преобразованию, примут следующий вид:

$$U_1 = R \cdot I_1 + \omega \cdot E \cdot L_0 \cdot I_1 + L_0 \cdot pI_1, \quad (2)$$

где E – матрица поворота двумерного вектора на угол $\pi/2$; $R = R_s$ – отображение сопротивления обмотки статора на плоскость поперечного сечения машины.

Уравнения (2) являются отображениями исходных уравнений (1) в оси координат ротора d, q . В развернутой форме записи уравнения напряжений статора (2) в относительных единицах примут следующий вид:

$$u_d^* = R^* \cdot i_d^* - \omega^* \cdot L_q^* \cdot i_q^* + \frac{L_d^*}{\omega_6^*} \cdot p i_d^*; \quad (3)$$

$$u_q^* = R^* \cdot i_q^* + \omega^* \cdot L_d^* \cdot i_d^* + \frac{L_q^*}{\omega_6^*} \cdot p i_q^*. \quad (4)$$

Ток продольного контура i_d намагничивает реактивную машину, а ток поперечного контура i_q определяет ее нагрузку.

Характеристический полином уравнений (3) и (4)

$$Y(p) = L_d^* \cdot L_q^* \cdot \frac{p^2}{\omega_6^2} + \omega^* \cdot R^* \cdot (L_d^* + L_q^*) \cdot \frac{p}{\omega_6} + R^{*2} + \omega^{*2} \cdot L_d^* \cdot L_q^*$$

Относительные значения корней характеристического уравнения $Y(p) = 0$:

$$p_{1,2}^* = \frac{R^*}{2} \cdot \left(-\frac{L_d^* + L_q^*}{L_d^* \cdot L_q^*} \pm \sqrt{\left(\frac{L_d^* - L_q^*}{L_d^* \cdot L_q^*} \right)^2 - \frac{4 \cdot \omega^{*2}}{R^{*2}}} \right)$$

При малой скорости вращения ротора отрицательные и действительные

$$\omega^* \leq \frac{R^*}{2} \cdot \frac{L_d^* - L_q^*}{L_d^* \cdot L_q^*}$$

При большей скорости вращения корни комплексные. В этом случае модуль мнимой части корня приближенно равен ω , а действительная часть определяется выражением $R = (1/L_q + 1/L_d)/2$. Зависимости относительных значений действительной и отрицательной мнимой части корней характеристического уравнения от скорости приведены на рис. 2.

Электромагнитный момент машины запишется в относительных единицах в следующем виде [9]:

$$M^* = (L_d^* - L_q^*) \cdot i_d^* - i_q^* \quad (5)$$

Структурная схема реактивного электродвигателя с анизотропной магнитной проводимостью приведена на рис. 3.

Робастность управления

Параметры любой модели электрической машины известны лишь приближенно. Поэтому система управления, синтезированная по математической модели, функционирует в условиях неопределенности, обусловленной неполнотой знаний о реальном объекте. Анализ динамических свойств реактивных электрических машин показывает [8], что корни характеристических уравнений динамических моделей лежат на комплексной плоскости вблизи мнимой оси. Это свидетельствует о том, что запас устойчивости систем управления, объектом управления которых является электродвигатель, достаточно небольшой.

В этой связи алгоритмы автоматического управления реактивными электродвигателями с анизотропной магнитной проводимостью ротора должны обладать свойством робастности (грубости [26], [27]). Система называется грубой (по А.А. Андронову), если малые

изменения параметров не приводят к качественному изменению ее динамического поведения. Линейная динамическая система, корни характеристического уравнения которой находятся вблизи мнимой оси, является негрубой.

Для придания свойств робастности (грубости) объекту управления (рис. 3), введем отрицательные обратные связи по токам статора i_d^* и i_q^* . В результате получим грубую систему управления, представленную на рис. 4.

Будем полагать, что коэффициенты обратной связи $R_d^* = R_q^* + R_x^*$. Уравнения, описывающие динамические процессы в системе управления, соответствующей изображенной на рис. 4 структурной схеме, в относительных единицах примут следующий вид:

$$y_d^* = R_1^* \cdot i_d^* - \omega^* \cdot L_q^* \cdot i_q^* + \frac{L_d^*}{\omega_6^*} \cdot p i_d^* \quad (6)$$

$$y_q^* = R_1^* \cdot i_q^* + \omega^* \cdot L_d^* \cdot i_d^* + \frac{L_q^*}{\omega_6^*} \cdot p i_q^* \quad (7)$$

где $R_d^* = R_q^* + R_x^*$ – эквивалентное относительное сопротивление контуров намагничивания и нагрузки.

Характеристический полином уравнений (6) и (7)

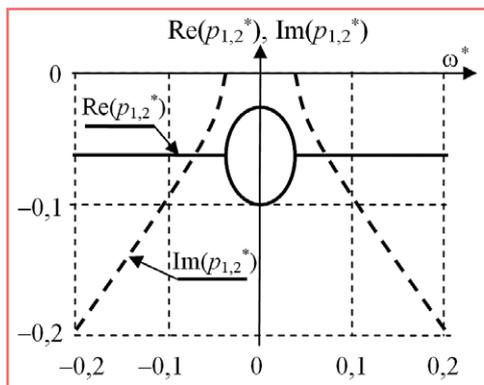


Рис. 2. Зависимости действительной и отрицательной мнимой части корней характеристического уравнения от скорости

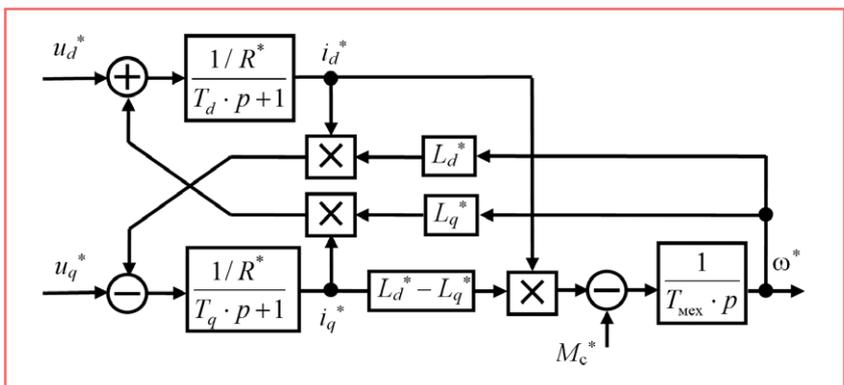


Рис. 3. Структурная схема реактивной машины в координатах d, q

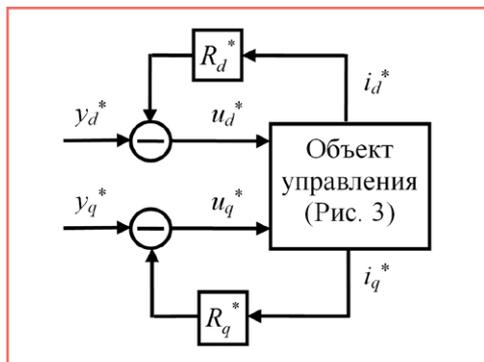


Рис. 4. Структурная схема системы управления с отрицательными обратными связями, обеспечивающими ее грубость

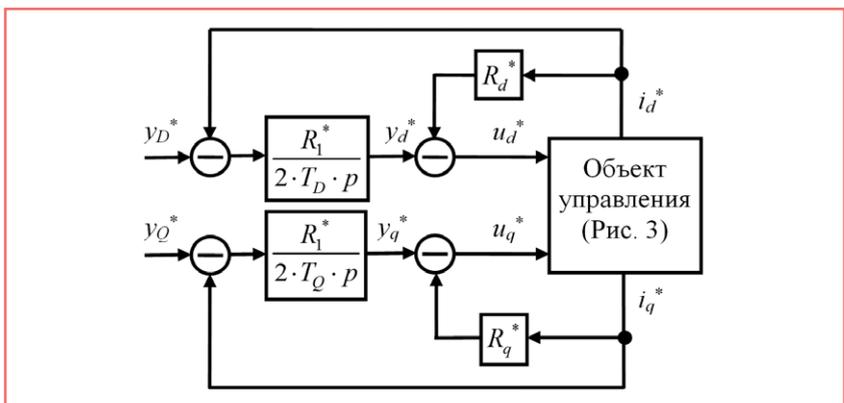


Рис. 5. Структурная схема системы управления контурами токов намагничивания и нагрузки

$$Y(p) = L_d^* \cdot L_q^* \cdot \frac{p^2}{\omega_0^2} + \omega^* \cdot R_1^* \cdot (L_d^* + L_q^*) \cdot \frac{p}{\omega_0} + R_1^{*2} + \omega^{*2} \cdot L_d^* \cdot L_q^*$$

Если выполнено условие

$$\omega^* \leq \frac{R_1^* \cdot L_d^* - L_q^*}{2 \cdot L_d^* \cdot L_q^*}, \quad (8)$$

то корни характеристического уравнения $Y(p) = 0$ будут отрицательными и действительными, а характер динамических процессов будет аperiodическим. Положим, что $\omega^* = 1$, и из неравенства (8) найдем

$$R_1^* \approx R_x^* \geq \frac{2 \cdot L_d^* \cdot L_q^*}{L_d^* - L_q^*} \approx 2 \cdot L_q^*. \quad (9)$$

Относительные значения индуктивностей контуров обычно имеют значения: $L_d^* = 1,5 \div 3$; $L_q^* \approx 0,1 \cdot L_d^*$. Тогда из выражения (9) следует, что коэффициент обратной связи должен удовлетворять неравенству $R_x^{*3} \geq 0,3 \div 0,6$. Таким образом, если выполняется неравенство (9), то динамические процессы в системе управления, структурная схема которой изображена на рис. 4, будут носить аperiodический характер при $|\omega^*| \leq 1$. Система управления становится грубой по А.А. Андронову [26], [27].

Синтез динамических процессов

Синтез динамических процессов в контурах намагничивания (6) и тока нагрузки (7) может быть выполнен независимо, полагая, что для контура тока намагничивания (6) ток i_q является возмущающим воздействием, а для контура тока нагрузки (7) ток i_d является возмущающим воздействием. Объектом управления контура тока намагничивания будет являться аperiodическое звено

$$W_D = \frac{1/R_1^*}{T_D \cdot p + 1},$$

где $T_D = \frac{L_d^*}{\omega_0 \cdot R_1^*}$ – постоянная времени контура тока намагничивания.

Согласно принципу настройки контура на технический оптимум регулятор тока контура намагничивания находится по формуле [9]

$$W_{pD} = \frac{1}{W_D \cdot 2 \cdot T_m \cdot p \cdot (T_m \cdot p + 1)} = \frac{R_1^*}{2 \cdot T_D \cdot p},$$

где $T_m = T_D$.

Регулятор тока контура нагрузки находится аналогично

$$W_{pQ} = \frac{1}{W_Q \cdot 2 \cdot T_m \cdot p \cdot (T_m \cdot p + 1)} = \frac{R_1^*}{2 \cdot T_Q \cdot p},$$

где $W_Q = \frac{1/R_1^*}{T_Q \cdot p + 1}$ – объект управления контура нагрузки, $T_m = T_Q = \frac{L_q^*}{\omega_0 \cdot R_1^*}$ – постоянная времени контура тока нагрузки. На рис. 5 изображена структурная схема системы управления контурами токов намагничивания и нагрузки.

Синтезированные контуры управления токами намагничивания и нагрузки являются астатическими и позволяют независимо управлять переменными i_d и i_q . Постоянная времени этих контуров существенно зависит от выбора коэффициента передачи R_x^* . Чем большие значения принимает коэффициент передачи R_x^* , тем выше быстродействие контуров управления токами намагничивания и нагрузки.

Синтез системы управления с максимальным быстродействием

Быстродействие электропривода определяется скоростью изменения электромагнитного момента (5), величина которого зависит от токов i_d и i_q . Быстродействие контуров токов намагничивания i_d и нагрузки i_q определяется постоянными времени T_D и T_Q . Постоянная времени T_D много больше постоянной времени T_Q . Следовательно, быстродействие контура тока намагничивания i_d существенно меньше быстродействия контура тока нагрузки i_q . То есть для обеспечения наибольшего быстродействия нужно поддерживать ток намагничивания на максимально возможном уровне, а управление электромагнитным моментом осуществлять путем регулирования тока нагрузки.

Значение относительного тока, при котором достигается максимальное

намагничивание машины, можно найти из режима холостого хода. Полагая в уравнении (4) $u_q^* = 1$; $\omega^* = 1$; $i_q^* = 0$ и $R^* = 0$, находим, что максимальное намагничивание достигается при $i_d^* \approx 1/\square L_d^*$. Управляющее воздействие тока намагничивания для поддержания постоянства тока намагничивания $y_D^* = 1/\square L_d^*$. Управляющее воздействие y_Q^* при постоянстве тока намагничивания будет задавать электромагнитный момент машины

$$M_a^* = (1 - L_q^*/L_d^*) \cdot y_Q^*.$$

Быстродействие управления моментом будет определяться постоянной времени T_Q .

Используя принцип подчиненного управления, при необходимости может быть сформирован контур скорости. Регулятор контура скорости должен быть пропорциональным с коэффициентом усиления

$$k_{pc} = \frac{R^* \cdot T_{мех}}{4 \cdot T_Q}.$$

Структурная схема системы управления с максимальным быстродействием приведена на рис. 6. Преобразование m -фазных токов статора в координаты вектора тока осуществляется по формулам:

$$i_d^* = \frac{2}{m} \cdot \sum_{k=0}^{m-1} i_k^* \cdot \cos(\gamma + k \cdot \rho);$$

$$i_q^* = \frac{2}{m} \cdot \sum_{k=0}^{m-1} i_k^* \cdot \sin(\gamma + k \cdot \rho),$$

где $\rho = 2 \cdot \pi/m$ – угол фазового сдвига; γ – угол поворота ротора.

Преобразование координат вектора напряжений в m -фазные напряжения статора осуществляется по формуле

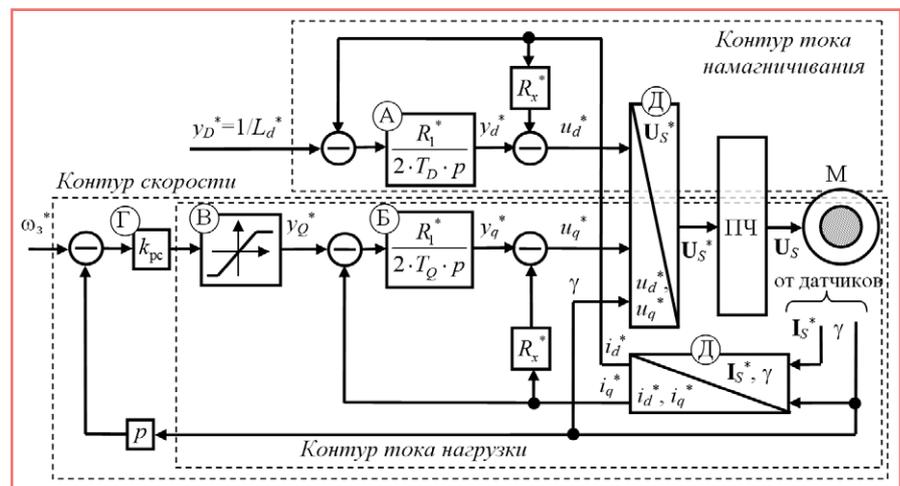


Рис. 6. Структурная схема управления при постоянном токе намагничивания: А – регулятор тока намагничивания; Б – регулятор тока нагрузки; В – блок ограничения тока нагрузки; Г – регулятор скорости; Д – блоки преобразования напряжений и токов статора; ПЧ – преобразователь частоты

$u_k = u_d^* \cdot \cos(\gamma + k \cdot \rho) + u_q^* \cdot \sin(\gamma + k \cdot \rho)$,
где $k = 0, 1, \dots, m - 1$.

Синтез системы управления с максимальным показателем энергетической эффективности

Относительные потери электрической мощности можно оценить по формуле

$$\Delta P^* = R^* \cdot (i_d^{*2} + i_q^{*2}).$$

Показатель энергетической эффективности

$$\frac{M^*}{\Delta P^*} = \frac{(L_d^* - L_q^*) \cdot i_d^* \cdot i_q^*}{R^* \cdot (i_d^{*2} + i_q^{*2})}$$

достигает максимума при $i_d^* = i_q^*$. Таким образом, для получения заданного момента при выполнении данного равенства управление электрической машиной будет выполняться с минимальными потерями электрической мощности. При достижении равенства $i_d^* \approx 1/\sqrt{L_d^*}$ система управления должна переходить в режим работы с постоянным током намагничивания. Структурная схема системы управления с максимальным показателем энергетической эффективности приведена на рис. 7.

Выводы

Предложенные в данной работе алгоритмы векторного управления реактивным электродвигателем с анизотропной магнитной проводимостью ротора обладают робастностью, то есть небольшие изменения параметров электрической машины не приводят к качественному изменению ее динамического

поведения. Синтезированы регуляторы подчиненной системы управления и выполнена настройка регуляторов на технический оптимум. Предложенные алгоритмы управления позволяют реализовать оптимальное управление по критериям быстродействия и энергетической эффективности, что позволяет повысить быстродействие или уменьшить потери энергии в электроприводе. Представленный подход к построению системы управления с высоким запасом устойчивости справедлив при построении системы управления любым типом электромеханического преобразователя.

Литература

1. Самосейко В.Ф., Гельвер Ф.А., Хомяк В.А., Лазаревский Н.А. Реактивные электрические машины с зубчатым статором и ротором. Методика проектирования. Алгоритмы управления / Под ред. Самосейко В.Ф. // СПб ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2016. – 174 с.
2. Бычков М.Г. Элементы теории вентильно-индукторного электропривода / М.Г. Бычков // Электричество, 1997, № 8. – С. 35-44.
3. Ваганов М.А. Электромагнитный момент вентильно-индукторного двигателя / М.А. Ваганов, И.А. Горюшкин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – С. 67-77.
4. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели / Ю.А. Голландцев // СПб ГНЦ РФ: ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 148 с.
5. Ильинский Н.Ф. Перспективы применения вентильно-индукторного электропривода в современных технологиях / Н.Ф. Ильин-

- ский // Электротехника, 1997, № 2. – С. 1-3.
6. Кононенко Е.В. Синхронные реактивные машины / Е.В. Кононенко. – М.: Энергия, 1970. – 208 с.
7. Кузнецов В.А. Вентильно-индукторные двигатели / В.А. Кузнецов, В.А. Кузьмичев. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 71 с.
8. Самосейко В.Ф., Гельвер Ф.А., Хомяк В.А., Хайров Д.А. Синхронные электрические машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Методика проектирования. Алгоритмы управления / Под ред. Самосейко В.Ф. – СПб ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2016. – 174 с.
9. Дмитриевский В.А., Прахт В.А., Казакбаев В.М. [и др.] Экспериментальное сравнение асинхронного и синхронного реактивного электродвигателей // XVI науч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока». Екатеринбург, 5-9 октября 2015 г., с. 19-22.
10. Захаров А.В. Перспективы технического применения синхронных электродвигателей с анизотропной магнитной проводимостью ротора / А.В. Захаров // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVIII Бернадосовские чтения)», Иваново, 2015 г., с. 124-127.
11. Гельвер Ф.А. Реактивная электрическая машина с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Конференция молодых ученых и специалистов. СПб ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2014. – С. 25-34.
12. Гельвер Ф.А., Белоусова Н.В., Самосейко В.Ф. Реактивный электрический преобразователь с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 (7-9 октября 2014 г.). – Саранск, Издательство мордовского университета. – С. 394-398.
13. Самосейко В.Ф., Гельвер Ф.А., Белоусов И.В. Перспективы использования реактивных электрических машин в электроприводе // Труды IX Международной (X Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. Пермь, 3-7 октября 2016 г. – (ICPDS2016). – С. 359-363.
14. Boglietti K.A., Cavagnino, A., Pastorelli, M., Vagati, A. Experimental comparison of induction and synchronous reluctance motors performance, Conference record of the 2005 industry applications conference. Fortieth IAS annual meeting, Vol. 1, pp. 474-479, 2-6 Oct. 2005.
15. Hofmann H.H., Sanders S.R. High-speed synchronous reluctance machine with minimized rotor losses. In: IEEE Transactions on industry applications. 36, No. 2, 2000, pp. 531-539.
16. Lamghari-Jamal M. I., Fouladgar J., Zaim E.H., Trichet D. A magneto-thermal study of a high-

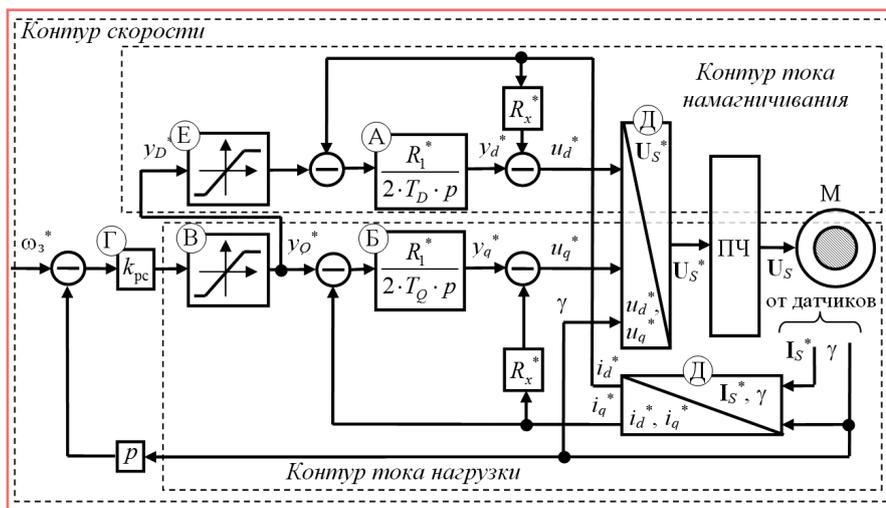


Рис. 7. Структурная схема управления с максимальным показателем энергетической эффективности:
 А – регулятор тока намагничивания; Б – регулятор тока нагрузки; В – блок ограничения тока нагрузки; Г – регулятор скорости; Д – блоки преобразования напряжений и токов статора; Е – блок ограничения тока намагничивания; ПЧ – преобразователь частоты

speed synchronous reluctance machine. In: IEEE Transactions on magnetics. 42, No. 4, 2006, pp. 1271-1274.

17. Lipo T.A. Synchronous reluctance machines a viable alternative for AC drives. In electric machines & power systems. 19, No. 6, 1991, pp. 659-671.

18. Matsuo T., Lipo A. Rotor design optimization of synchronous reluctance machine, IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 4, No. 2, pp. 359-365, June 1994.

19. Miller T.J.E. Switched reluctance motors and their control. Oxford university, 1993, 203 p.

20. Miller T.J.E., Hutton A., Cossar C., Staton D.A. Design of a synchronous reluctance motor drive. In: IEEE Transactions on industry applications. 27, No. 4, 1991, pp. 741-749.

21. Pires W.L., Mello H.G. G., Nau S.L. Minimization of losses in converter-fed induction Motors-optimal flux solution. E-Drive Magazine, 2008.

22. Platt D. Reluctance motor with strong rotor anisotropy. IEEE Transactions on industry applications. 28, No. 3, 1992, pp. 652-658.

23. Staton D.A., Cossar C., Miller T.J.E., Hutton A. Design of a synchronous reluctance motor drive. IEEE Transactions on industry applications, Vol. 27, No. 4, pp. 741-749, July/August 1991.

24. Tahi S., Ibtouen R., Bounekhla M. Design optimization of two synchronous reluctance machine structures with maximized torque and power factor. Progress in electromagnetics research B, 2011, Vol. 35, pp. 369-387.

25. Самосейко В.Ф. Теоретические основы управления электроприводом / В.Ф. Самосейко. – СПб: Элмор, 2007. – 464 с.

26. Андронов А.А., Понрягин Л.С. Грубые системы // Доклады АН СССР, 1937, т. 14. – С. 247-249.

27. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. 2-е изд., перераб. и испр. – М.: Наука, 1981. – 918 с.

Белоусов Игорь Владимирович

Родился в 1972 году. В 1995 году окончил Санкт-Петербургский государственный морской технический университет по специальности «Прикладная математика». В настоящее время работает доцентом кафедры электропривода и электрооборудования береговых установок ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова и ведущим инженером филиала ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Гельвер Федор Андреевич

Родился в 1980 году. В 2004 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций (СПГУВК) по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». Кандидат технических наук. В 2009 году защитил диссертацию по теме «Алгоритмы оптимального управления гребной электрической установкой с машинной двойного питания». Опыт работы – 15 лет. В настоящее время работает начальником лаборатории филиала ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр» и доцентом кафедры ЭП и ЭОБУ ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова. Имеет 33 научные статьи, 2 монографии и 29 патентов на изобретение.

Самосейко Вениамин Францевич

Родился в 1947 году. Окончил Ленинградский институт водного транспорта (ЛИВТ). Доктор технических наук, профессор. В настоящее время работает профессором кафедры электропривода и электрооборудования береговых установок ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова и ведущим инженером филиала ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Belousov Igor

Was born in 1972. In 1995 graduated from St. Petersburg State Marine Technical University with a degree in Applied Mathematics. At the present he is an associate professor at Electric drive and electrical equipment of onshore facilities department at Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping and a lead engineer at Krylov State Research Centre.

Gelver Fedor

Was born in 1980. In 2004 he graduated from St. Petersburg State University of Water communications with degree in Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes. He is candidate of technical sciences. In 2009 he defended a dissertation by the theme Algorithms of optimal control of electric propulsion plant with double-fed electric machine. He has 15 years of work experience. At present he works as head of laboratory of Krylov State research Centre branch and associate professor at Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. He has 33 scientific articles, 2 monographs and 29 patents of invention.

Samoseiko Veniamin

Was born in 1947. Graduated from Leningrad Institute of Water Transport (LIWT). He is a Doctor of Engineering Science, professor. At the present moment is a professor of Electric drive and electrical equipment of onshore facilities department at Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping and a lead engineer at Krylov State Research Centre.

Техническое обслуживание электронных систем управления двигателем

// Maintenance of electronic engine control systems //

**Баженов Ю.В., к.т.н., профессор,
Каленов В.П.,
Владимирский государственный университет
им. А. Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир**

Приведены результаты исследования эксплуатационной надежности электронных систем управления двигателем VAZ-21129 автомобилей Lada Vesta и причины возникновения в них повреждений. Определены элементы, лимитирующие надежность ЭСУД в эксплуатации. Обоснованы рекомендуемые наработки по проведению технических воздействий для основных элементов рассматриваемой системы. Разработаны методические рекомендации по техническому обслуживанию конструктивных элементов ЭСУД.

Ключевые слова: электронная система управления двигателем, конструктивный элемент, техническое состояние, работоспособность, контроль.

The results of research on the operational reliability of electronic engine management systems for the VAZ-21129 engine of Lada Vesta vehicles and the causes of damage in them are presented. The elements limiting the reliability of the electronic engine management system in operation are determined. The recommended advances in the implementation of technical impacts for the main elements of the system under consideration are substantiated. Methodical recommendations on maintenance of structural elements of the electronic engine management system have been developed.

Keywords: electronic engine management system, structural element, technical condition, operability, control.

Работой автомобильных двигателей внутреннего сгорания управляет электронная система (ЭСУД), использование которой позволяет добиться высоких технико-экономических показателей их работы при одновременном соблюдении жестких экологических требований по выбросам вредных веществ в окружающую среду.

В конструктивных элементах ЭСУД, как и любой другой системе автомобиля, в процессе эксплуатации авто неизбежно возникают различного рода повреждения (изнашивание, изменение электрических характеристик системы, нарушение регулировок, повреждение датчиков, их разъемов, предохранителей и др.). Несвоевременное выявление и неустранение этих повреждений вызывает увеличение токсичности отработавших газов, нарушение работы двигателя, полную или частичную потерю им работоспособности.

Обеспечить эксплуатационную надежность и снизить затраты на восстановление работоспособности ЭСУД призвана

система ТО и ремонта, которая предполагает выполнение контрольно-диагностических работ системы и своевременное устранение появившихся в ней неисправностей. Однако в действующей документации по техническому обслуживанию автомобилей как отечественного, так и импортного производства операции

контроля ЭСУД при прохождении регламентного обслуживания не предусмотрены. В процессе проведения ТО проверяются лишь коды возникших неисправностей, хранящихся в памяти электронного блока управления, и только при их наличии осуществляются контрольно-диагностические операции в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя. При отсутствии кодов неисправностей в памяти блока ЭСУД признается технически исправной и дополнительные проверки не проводятся. Это приводит к выпуску в эксплуатацию после проведения ТО транспортных средств, ЭСУД которых имеет скрытые неисправности, что влечет за собой увеличение количества ее линейных отказов. Это существенно увеличивает затраты на эксплуатацию автомобиля и доставляет серьезные проблемы его владельцу.

Отсюда следует необходимость создания системы обеспечения работоспособности ЭСУД в эксплуатации, которая базировалась бы на обязательном проведении контрольно-диагностических работ по оценке состояния ее элементов на предприятиях автосервиса. Разработка такой системы предусматривает прежде всего проведение исследований эксплуатационной надежности

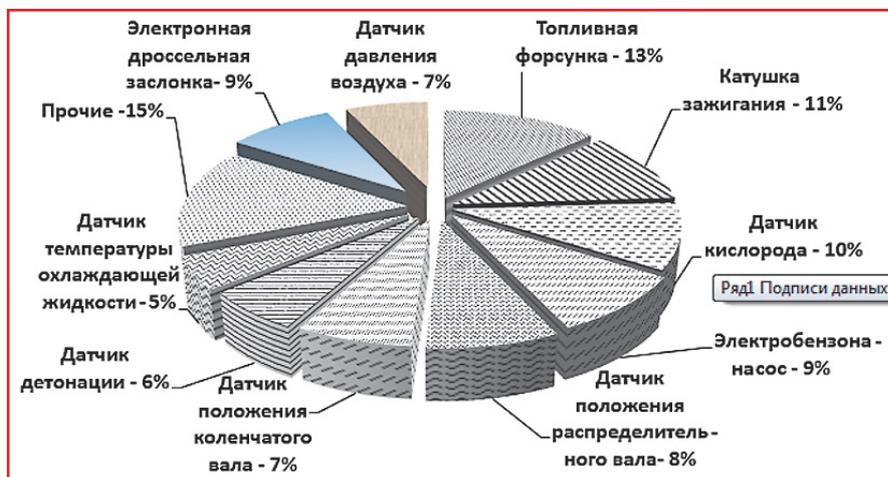


Рис. 1. Диаграмма распределения отказов элементов ЭСУД двигателя VAZ-21129

конструктивных элементов ЭСУД; выявление элементов, лимитирующих надежность системы; определение целесообразности и сроков планово-предупредительных замен конструктивных элементов ЭСУД, не имеющих признаков изменения технического состояния; подготовку методических рекомендаций по контролю технического состояния элементов ЭСУД.

Результаты исследований эксплуатационной надежности автомобилей Lada, выполненные на базе дилерского центра в городе Владимире, показали, что на отказы ЭСУД приходится свыше 20% от общего количества отказов автомобиля. Одной из самых распространенных неисправностей исследуемых ЭСУД, устанавливаемых на двигатель ВАЗ-21129, является повреждение топливных форсунок. По статистике, на них приходится 13% от общего количества отказов ЭСУД (рис. 1).

Основной причиной повреждения топливных форсунок является возникновение и накопление на ее деталях различного рода отложений. Работа двигателя с неисправными форсунками сопровождается затрудненным пуском, повышенным расходом топлива, снижением мощности, нестабильной работой ДВС в режиме холостого хода, провалами при разгоне автомобиля.

Из-за обрыва проводников в обмотках и межвиткового замыкания достаточно часто теряют свою работоспособность катушки зажигания (11%). Их

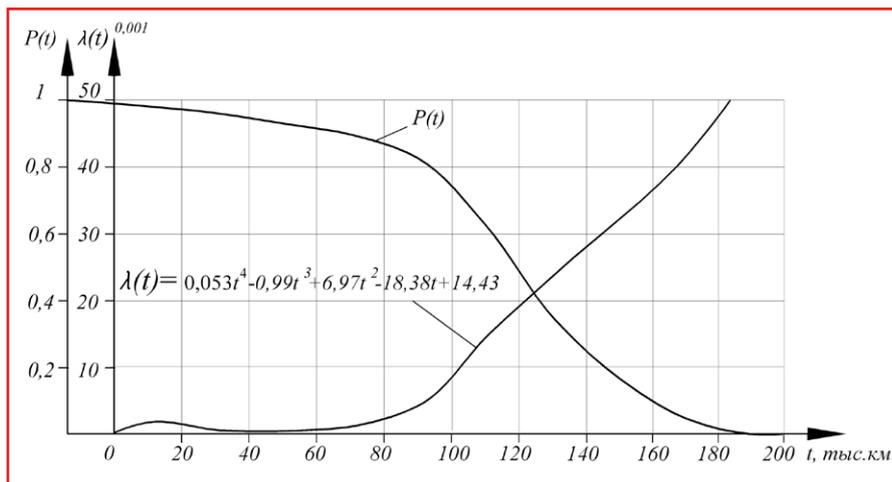


Рис. 2. Закономерности изменения $P(t)$ и $\lambda(t)$ каталитического нейтрализатора по наработке t

отказы приводят к перебоям в работе двигателя, снижению мощности, увеличению выбросов вредных веществ в окружающую среду.

Отказы ЭСУД довольно часто связаны с повреждениями датчиков, которые приводят к увеличению расхода топлива и выбросов вредных веществ в окружающую среду, нарушению оптимального состава рабочей смеси и ее дозированной подачи в цилиндры, нестабильной работе двигателя в режиме холостого хода. Наибольшее влияние на работоспособность двигателя оказывает датчик положения коленчатого вала, отказ которого приводит к невозможности запуска двигателя, так как электронный блок управления двигателем (ЭБУД) блокирует подачу топлива.

Для оценки эксплуатационной надежности элементов ЭСУД использовались такие показатели ее безотказности, как вероятность безотказной работы $P(t)$ и интенсивность отказов $\lambda(t)$. По результатам проведенных исследований статистические оценки этих показателей, найденные с помощью компьютерной программы Microsoft Office Excel для основных элементов ЭСУД двигателя ВАЗ-21129, приведены в таблице 1.

В качестве примера на рис. 2 приведена графическая интерпретация изменения интенсивности отказов $\lambda(t)$ и вероятности безотказной работы $P(t)$ каталитического нейтрализатора.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что интенсивность отказов каталитического нейтрализатора

Таблица 1. Показатели безотказности элементов ЭСУД

Элемент ЭСУД	Значения $P(t); \lambda(t) \cdot 10^{-4}$ по интервалам наработки, тыс. км									
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	160-180	180-200
Катушка зажигания	0,95;2,47	0,92;1,72	0,82;5,55	0,68;9,67	0,52;13,58	0,40;12,29	0,29;16,27	0,1628,57	0,06;42,85	0; 97,52
Электромагнитная форсунка	0,98;1,01	0,96;1,03	0,9; 3,22	0,76; 8,43	0,56; 15,15	0,4; 16,67	0,26; 21,78	0,16; 23,81	0,08; 33,39	0; 93,21
Кислородный датчик	0,97; 1,72	0,95;0,89	0,93; 0,90	0,86;3,77	0,66;13,3	0,48;16,4	0,31; 21,7	0,17;28,6	0,07;42,8	0; 99,8
Каталитический нейтрализатор	0,96; 1,85	0,95; 0,93	0,93; 0,97	0,91; 0,99	0,83; 4,16	0,61; 15,21	0,38; 23,63	0,2; 31,25	0,07; 46,66	0; 91,23
Бензонасос	0,93; 3,45	0,91; 1,21	0,88; 1,23	0,82; 3,89	0,66; 10,44	0,49; 15,38	0,27; 29,41	0,16; 26,31	0,06; 40,16	0; 96,76
Датчик положения коленчатого вала	0,97; 1,07	0,95; 1,09	0,93; 1,12	0,87; 3,53	0,71; 10,81	0,48; 17,85	0,29;24,32	0,19; 21,73	0,08;38,46	0; 87,12
Электронная дроссельная заслонка	0,93; 3,15	0,91; 1,09	0,89; 1,12	0,83; 3,52	0,65; 12,32	0,48; 14,28	0,32; 20,45	0,18; 28,64	0,08;38,46	0; 91,87
Датчик детонации	0,96; 2,05	0,96; 0	0,94; 1,03	0,90; 2,12	0,74; 9,52	0,54; 15,15	0,31; 27,29	0,17;28,07	0,05;50,46	0; 97,13
Датчик положения распределительного вала	0,96; 1,96	0,94; 1,96	0,92; 1,03	0,88; 2,12	0,67; 13,58	0,48; 16,66	0,30; 21,95	0,19; 23,07	0,09; 33,36	0; 91,18
Датчик температуры охлаждающей жидкости	0,97; 1,09	0,95; 1,12	0,93; 1,14	0,86; 3,61	0,80; 3,89	0,60; 13,84	0,41; 19,14	0,23; 26,66	0,08; 46,66	0; 88,21
Датчик давления воздуха	0,95; 2,22	0,93; 1,18	0,91; 1,17	0,86; 2,43	0,80; 3,89	0,58; 15,62	0,34; 25,58	0,17; 33,89	0,04; 60,56	0; 98,47
Электронная педаль газа	0,98; 0,93	0,96; 0,95	0,94; 0,97	0,88; 3,03	0,83; 3,22	0,61; 15,38	0,40; 20,39	0,24; 25,79	0,09; 44,44	0; 90,87

начинает заметно расти после достижения наработки 100-110 тыс. км, а вероятность его безотказной работы снизилась к этому пробегу автомобиля до значения $P(t) = 0,76$. К этой наработке в нейтрализаторе накапливается большое количество содержащихся в отработавших газах загрязняющих частиц, которые снижают эффективность его работы. В связи с этим для обеспечения надежной работы ЭСУД целесообразно проводить контроль технического состояния рассматриваемого элемента на ТО-7 при пробеге 105 тыс. км, не дожидаясь отказа.

ЭСУД двигателя VA3-21129 представляет собой сложную техническую систему, которая включает в себя свыше 20 конструктивных элементов. Не все из них в одинаковой степени оказывают влияние на ее эксплуатационную надежность. Как правило, надежность технических систем автомобиля лимитируется в основном надежностью нескольких, а иногда и всего лишь одним конструктивным элементом. Поэтому выявление таких элементов в ЭСУД, обеспечение их работоспособного состояния в процессе эксплуатации автомобиля приводит к повышению надежности всей рассматриваемой системы.

В данной работе определение элементов, лимитирующих надежность ЭСУД, осуществлялось с использованием методики, основанной на комплексном учете частоты возникающих в ней отказов, влиянии их последствий на работоспособность двигателя, а также удельных затрат на восстановление или замену отказавших элементов [2]. В результате проведенных исследований к элементам, лимитирующим надежность ЭСУД автомобиля Lada Vesta с двигателем VA3-21129, следует отнести: бензонасос, датчик положения коленчатого вала, катушку зажигания, датчик кислорода, каталитический нейтрализатор и электронную дроссельную заслонку. Средняя наработка до отказа этих элементов и суммарные затраты на их замену представлены в таблице 2.

Установление номенклатуры таких элементов ЭСУД имеет важное практическое значение для сферы эксплуатации автотранспортных средств, так как является основой для оптимизации системы поддержания их работоспособности (периодичность ТО, обоснование наработок до замен элементов, не имеющих признаков появления неисправностей,

Таблица 2. Элементы, лимитирующие надежность ЭСУД

Элемент ЭСУД	Затраты на замену неисправного элемента, руб.	Средняя наработка до отказа, тыс. км	Среднее квадратическое отклонение, тыс. км
Катушка зажигания	2300	56,9	35,4
Электромагнитная форсунка	3800	75,8	31,9
Кислородный датчик	4300	80,4	40,6
Каталитический нейтрализатор	27 200	112,3	29,8
Бензонасос	8600	90,5	31,2
Датчик положения коленчатого вала	1800	96,1	37,3
Электронная дроссельная заслонка	6600	88,7	42,8

технологий проведения контрольно-диагностических работ и т.д.).

По возможности определения состояния при проведении технического обслуживания автомобилей все конструктивные элементы ЭСУД можно разделить на две группы:

- элементы, техническое состояние которых можно оценить по изменению соответствующих диагностических параметров;
- элементы, не имеющие явных признаков повреждений, оценка технического состояния которых при проведении контрольно-диагностических работ практически невозможна.

Для элементов первой группы при достижении ими определенной наработки назначается контроль технического состояния. В случае если диагностические параметры элемента выходят за пределы допустимых значений, изложенных в технической документации завода-изго-

товителя, для обеспечения надежной работы ЭСУД выполняются необходимые технические воздействия по устранению возникших повреждений.

К элементам второй группы относятся в основном датчики различного назначения (положения коленчатого вала, давления топлива или воздуха, температуры охлаждающей жидкости и др.). Элементы этой группы при достижении ими определенной наработки рекомендуется заменять. Как показывает практика, эксплуатация таких элементов после достижения ими рекомендуемой наработки до замены с большой долей вероятности приводит к их отказу на пробеге автомобиля до выполнения очередного ТО.

По результатам выполненных исследований обоснованы рекомендуемые наработки по выполнению необходимых технических воздействий для каждого конструктивного элемента ЭСУД (таблица 3). Эти наработки

Таблица 3. Рекомендуемые наработки по проведению технических воздействий для основных элементов ЭСУД двигателя VA3-21129

Конструктивный элемент	Средняя наработка до отказа, тыс. км	Рекомендуемая наработка для проведения технических воздействий, тыс. км	Техническое воздействие
Катушка зажигания	56,9	45 (ТО-3)	Контроль
Электромагнитная форсунка	75,8	60 (ТО-4)	Контроль
Кислородный датчик	80,4	75 (ТО-5)	Замена
Каталитический нейтрализатор	112,3	105 (ТО-7)	Контроль
Бензонасос	90,5	75 (ТО-5)	Контроль
Датчик положения коленчатого вала	96,1	90 (ТО-6)	Замена
Электронная дроссельная заслонка	88,7	75 (ТО-5)	Контроль
Датчик детонации	98,5	90 (ТО-6)	Замена
Датчик положения распределительного вала	112,9	105 (ТО-7)	Замена
Датчик температуры охлаждающей жидкости	104,4	90 (ТО-6)	Замена
Датчик давления воздуха	117,8	105 (ТО-7)	Замена
Электронная педаль газа	110,6	105 (ТО-7)	Контроль

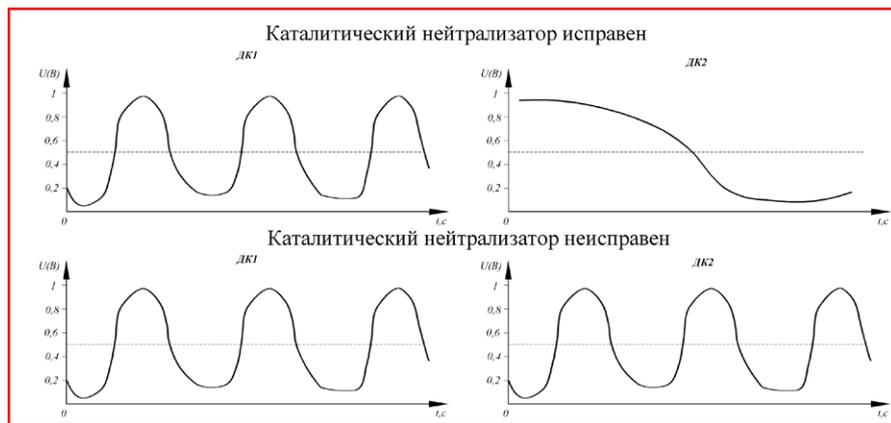


Рис. 3. Вид осциллограмм датчиков кислорода при исправном и неисправном каталитическом нейтрализаторе: ДК1 – датчик кислорода до каталитического нейтрализатора; ДК2 – датчик кислорода после каталитического нейтрализатора

корректируются с учетом проведения регламентной периодичности технического обслуживания автотранспортных средств, которая для автомобиля Lada Vesta составляет 15 тыс. км.

Контрольно-диагностические операции разработаны для каждого конструктивного элемента ЭСУД первой группы. Например, контроль технического состояния каталитического нейтрализатора осуществляется диагностическим прибором Grade-X или осциллографом, с помощью которых снимают осциллограммы эффективности работы верхнего и нижнего датчиков кислорода, установленных в выпускной системе, соответственно, до и после каталитического нейтрализатора. Количество кислорода, содержащегося в отработавших газах на выходе из нейтрализатора, всегда меньше количества кислорода на входе в него. Это связано прежде всего с тем, что часть кислорода, содержащегося в отработавших газах, расходуется на дожигание в нейтрализаторе не сгоревших в процессе работы двигателя частиц топлива. Поэтому при исправном нейтрализаторе осциллограммы, снятые с датчиков кислорода, должны значительно отличаться друг от друга (рис. 3).

Полученные осциллограммы сравнивают с нормативными, представленными в технической документации завода-изготовителя. В случае расхождения полученных осциллограмм с нормативными необходима замена каталитического нейтрализатора.

Выводы

Внедрение в производственный процесс предприятий автотехобслуживания разработанных рекомендаций по техническому обслуживанию конструктивных элементов ЭСУД позволяет существенно сократить количество их отказов, обеспечив тем самым высокий уровень надежности в эксплуатации.

Литература

1. Баженов Ю.В. Основы теории надежности машин: учеб. пособие / Ю.В. Баженов. – М.: Форум, 2017. – 320 с.
2. Баженов Ю.В., Каленов В.П. Выявление элементов, лимитирующих надежность электронных систем управления двигателем автомобиля / Мытищи: Бюллетень транспортной информации, 2017, № 265, с. 19-23.
3. Набоких В.А. Диагностика электрооборудования автомобилей и тракторов: учеб. пособие. – М.: Форум, 2013. – 288 с.
4. Рэндалл М. Электрическое и электронное оборудование автомобилей. – М.: Алфамер Паблшинг, 2008. – 284 с.
5. Тюнин А.А. Диагностика электронных систем управления двигателями легковых автомобилей: учеб. пособие. – М.: Солон-Пресс, 2007. – 352 с.
6. Ют В.Е. Электрооборудование автомобилей. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2006. – 439 с.

Баженов Юрий Васильевич

Родился в 1941 году. В 1968 году окончил Московский автомобильно-дорожный институт (МАДИ) по специальности «Строительные и дорожные машины и оборудование». Кандидат технических наук, профессор.

В 1976 году защитил диссертацию по теме «Исследование некоторых вопросов формирования маршрутов восстановления деталей при капитальном ремонте машин». Опыт работы – 48 лет. В настоящее время работает заместителем директора Института машиностроения и автомобильного транспорта Владимирского государственного университета им. А. Г. и Н.Г. Столетовых, профессором кафедры «Автомобильный транспорт». Имеет свыше 150 публикаций, 4 учебных пособия с грифом Министерства РФ, 4 учебных пособия с грифом УМО.

Каленов Владимир Павлович

Родился в 1990 году. В 2012 году окончил Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н.Г. Столетовых по специальности «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования в автомобильном транспорте». Опыт работы – 5 лет. В настоящее время – аспирант кафедры «Автомобильный транспорт» Владимирского государственного университета им. А. Г. и Н.Г. Столетовых. Имеет 17 научных публикаций.

Bazhenov Yuri

Was born in 1941. In 1968 graduated from Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) with a degree in Construction and Road-building Machines and Equipment. He has Ph. D in Engineering Science, is a professor. In defended his thesis on Studying of some issues on establishing components recovery ways during thorough repair of machines. Has a 48-year working experience. At the present he is a Deputy Director of Mechanical Engineering and Automobile Transport Institute at A.G and N.G. Stoletovs Vladimir State University, a professor of Automobile Transport faculty. He has over 150 publications, 4 teaching mediums with a stamp of RF Ministry, 4 teaching mediums with Academic Methodological association stamp.

Kalenov Vladimir

Was born in 1990. In 2012 graduated from Vladimir State University named after Alexander and Nikolai Stoletovs with a degree in Service of transport and technological machines and equipment in automobile transport. Has a 5-year working experience. At the present is a postgraduate student of Automobile transport faculty at Vladimir State University named after Alexander and Nikolai Stoletovs. Has 17 research papers.

Экспериментальные исследования электротехнического производственного комплекса диагностики электрооборудования автомобилей

// Experimental studies of the electrical industrial complex of car electrical equipment diagnostics //

Козловский В.Н., д.т.н.,
Новикова А.П., к.т.н.,
СамГТУ, Самара

Пьянов М.А., к.т.н.,
ПАО «АВТОВАЗ», Тольятти

Дебелов В.В., к.т.н.,
ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», Москва

В представленной работе приведены результаты разработки и реализации электротехнического и электронного производственного комплекса диагностики работоспособности системы электрооборудования автомобилей. Ключевые слова: качество, надежность, автомобиль, система электрооборудования, диагностика.

The given work represents the results of development and realization of electrical and electronic industrial complex of car electrical equipment system performance diagnostics. Keywords: quality, reliability, car, engine electrical system, diagnostics.

В основе предлагаемого метода диагностирования электрооборудования автомобиля лежит высокоточное измерение потребляемого тока устройств электрооборудования при коммутации с дальнейшей обработкой результатов измерений, по которым определяются комплектующие, вышедшие из строя [1]. Кроме того, этот метод позволяет вскрыть комплектующие, имеющие отклонения технических характеристик (от заявленных производителем) и, как правило, приводящие к выходу из строя комплектующих в процессе эксплуатации автомобиля.

Предлагаемая система технического диагностирования электрооборудования автомобиля (диагностический комплекс) обеспечивает тестирование элементов электрооборудования в процессе сборки машин на главном конвейере; тестирование и диагностику работоспособности всех элементов электрооборудования с целью выявления дефектов и их устранения на ремонтных участках (в том числе элементов системы электронного впрыска как при работающем, так и при неработающем двигателе); хранение результатов тестирования с привязкой к VIN-номеру автомобиля, номеру комплектации, получение статистических

данных по запросам с корпоративных рабочих мест; отслеживание тестируемого автомобиля при его техобслуживании в процессе эксплуатации; сбор и хранение информации о дефектах, причинах и способах их устранения как при производстве, так и в процессе технического обслуживания [2].

Кодификатор дефектов в системе соответствует единому кодификатору автопроизводителя. Выявленные дефекты фиксируются в системе управления сборкой автомобилей по VIN-номеру и номеру комплектации для дальнейшей работы с гарантийными машинами и статистического анализа качества как самого автомобиля, так и электротехнических комплектующих. Дефекты, причины и способы их устранения представлены в системе анализа причин дефектов в виде «дерева отказов».

Сервис диагностического комплекса предусматривает автоматическую загрузку операционной

системы, запуск и выполнение программы пользователя после включения питания оборудования; удобный интерфейс для оперативной работы; визуализацию происходящего процесса проверки; сохранение всей содержащейся в системе информации как в случае кратковременных перебоев питания, так и при длительном отключении электроэнергии; удобство и безопасность при работах по ремонту, диагностированию и обслуживанию оборудования; выдачу сообщений о неисправностях на экране монитора без запроса оператора; регистрацию времени возникновения, продолжительности и времени окончания аварийных ситуаций, неисправностей оборудования, режимов и состояний, в которых находилось оборудование; сохранение данных о диагностике в базе данных Access; проведение периодической калибровки диагностического комплекса. При этом калибруемые параметры выводятся на индикацию отдельной экранной формы и автоматически заносятся в управляющую программу; выдачу всей информации, выводимой для оператора, обслуживающего и сервисного персонала на экране монитора и на печати, на русском языке; хранение с привязкой к VIN-номеру автомобиля результатов испытаний для статистических целей. Тестирование начинается со считывания штрихкодов



Рис. 1. Работа с программным обеспечением без манипуляторов

VIN-номера, комплектации автомобиля для выбора программы испытаний и личного номера водителя-испытателя; после завершения испытания каждого автомобиля сервер предприятия-производителя забирает результаты испытаний из базы данных Access.

На рис. 2 представлена структурная схема диагностического комплекса.

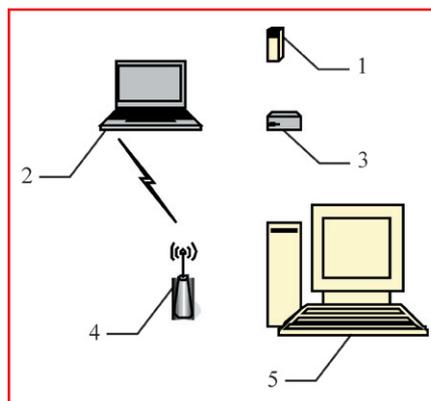


Рис. 2. Структурная схема диагностического комплекса:
1 – измерительный модуль; 2 – носимый пульт оператора;
3 – адаптер автомобильных интерфейсов;
4 – точка радиодоступа;
5 – базовая станция

Базовая станция 5 (рис. 2) диагностического комплекса представляет собой автоматизированное рабочее место в исполнении IP54 (в прочном корпусе для промышленного использования) на основе персонального компьютера (ПК) – совместимой рабочей станции.

Базовая станция предназначена для организации запроса комплектации автомобиля по номеру шасси и передачи результатов тестирования в информационную базу данных предприятия. Точка радиодоступа 4, предназначенная для организации связи между базовой станцией 5 и носимым пультом оператора 2 с использованием стандартного интерфейса IEEE802.11, представляет собой коммутатор сети с передачей данных по радиоканалу DWL-2100AP (фирма D-Link, США).

Носимый пульт оператора (НПО) в виде портативного планшетного компьютера в исполнении IP55 (рис. 3) предназначен для считывания штрих-кода, приема данных с измерительного модуля и адаптера автомобильных интерфейсов, передачи информации на базовую станцию и выдачи команд оператору для выполнения действий по включению/выключению диагностируемых устройств. На дисплее носимого пульта оператора

Таблица 1. Технические характеристики носимого пульта оператора

Компонент	Характеристика
Чипсет	Intel 855
Процессор	Intel Pentium M с номинальной частотой 1.5 GHz
Оперативная память	512 мВ
Дисплей	8,4" LCD TFT 800x600
Сенсорный экран	Резистивный тип, занимает порт COM4
Клавиатура	8 программируемых функциональных клавиш (F1-F8), имеется возможность закрепить за каждой клавишей наиболее часто используемую функцию
Flash-диск	4 GB
Звуковая подсистема	Звуковой контроллер 16 bit. Встроенные брызгозащищенные стереодинамики
Габаритные размеры	274x36x196 мм
Питание	Встроенный аккумулятор или бортовая сеть автомобиля
Вес	1,8 кг

отображается ход выполнения тестирования систем электрооборудования автомобиля и команды, выдаваемые оператору-диагносту. НПО имеет один встроенный канал беспроводной радиосвязи стандарта IEEE802.11 для связи с базовой станцией 5 и два беспроводных канала радиосвязи стандарта IEEE802.15.1 для связи с измерительным модулем 1 и модулем автомобильных интерфейсов 3 (таблица 1).

Адаптер автомобильных интерфейсов предназначен для передачи управляющих команд контроллерам автомобиля, программирования контроллеров электронных систем автомобиля, считывания информации из контроллеров (коды ошибок, результаты измерений), разработан специально для работы в составе диагностического комплекса.

Адаптер выполнен в прочном корпусе для промышленного использования (IP55 исполнение), подключается к диагностической колодке автомобиля и обеспечивает связь между носимым пультом оператора и контроллерами электронных систем автомобиля через радиоканал с использованием стандартного интерфейса IEEE802.15.1. Питание

адаптера осуществляется от бортовой сети автомобиля (8...16 В).

Измерительный модуль (таблица 2) предназначен для регистрации переходных процессов в электрических цепях электрооборудования автомобиля и передачи результатов на носимый пульт оператора. Принцип измерения переменного тока без размыкания силовой цепи основан на измерении магнитной индук-



Рис. 3. Носимый пульт оператора

ции, создаваемой этим током. Для этого применяется первичный преобразователь с обработкой измерительного сигнала, поступающего с чувствительного элемента Холла, в цифровой код с помощью 14-разрядного АЦП. Передача оцифрованной измерительной информации производится по радиоканалу с использованием стандартного интерфейса IEEE802.15.1.

Таблица 2. Технические характеристики измерительного модуля

Компонент	Характеристика
Корпус	Исполнение IP54
Способ измерения тока	Бесконтактный, основанный на эффекте Холла
Протокол передачи данных	IEEE 802.15.1
Максимальный измеряемый ток	200А
Погрешность (при 25°C), не более	± 1,5%
Питание	Бортовая сеть автомобиля (8...16 В)

Измерительный модуль устанавливается непосредственно на автомобиль и подключается к положительному проводу, охватывая его разъемным кольцом магнитопровода токовых клещей.

Принцип измерений построен на эффекте Холла. Результаты измерений обрабатываются носимым пультом оператора. Работа оператора с программным обеспечением (ПО) носимого пульта осуществляется в режиме диалога. При тестировании устройств электрооборудования ПО выдает команды на включение устройства, а оператор выполняет их. На экран выводится индикатор выполнения текущего теста. ПО запускает модуль тестирования, который производит измерение параметров в соответствии с методикой тестирования текущего устройства электрооборудования, проводит требуемый расчет, сравнивает измеренные и/или вычисленные величины с предельными значениями и записывает результат теста. По окончании теста ПО дает команду на выключение устройства и включение следующего.

Тестирование электронных систем управления (электронной системы управления двигателем (ЭСУД), электроусилителя рулевого управления (ЭУР), системы автоматического управления климатической установкой (САУКУ) и др.) и их компонентов происходит в фоновом режиме и начинается с момента подключения адаптера автомобильных интерфейсов к колодке диагностики автомобиля. Технология заключается в следующем: считываются идентификационные данные контроллера системы управления и проверяются на соответствие комплектации автомобиля; считывается память кодов неисправностей; тестируются датчики систем управления; производится запись идентификационных характеристик автомобиля, запись кода разблокировки в контроллер системы надувной подушки безопасности; производится активация регистратора параметров эксплуатации двигателя и автомобиля в контроллер ЭСУД; тестируются компоненты системы управления, управление которыми возможно по диагностическому протоколу.

Этот процесс в основном происходит без участия оператора. При необходимости ПО выводит команду оператору на дисплей носимого пульта для проведения каких-либо действий.

Экспериментальные исследования комплекса диагностики элементов электрооборудования автомобилей

Для проведения экспериментального исследования была собрана лабораторная установка по схеме, представленной на рис. 4.

Элементы, входящие в состав лабораторной установки, сведены в таблицу 3.

Для исключения грубых ошибок при анализе измерительного процесса необходим значительный объем выборки. Рекомендуемое количество циклов измерений для получения достоверных данных $k = 25$, диагностируемых образцов $N = 5$ и операторов, осуществляющих измерения, $M = 2$.

Экспериментальные исследования проводятся по следующей программе:

1. Собрать лабораторную установку по схеме, приведенной на рис. 4.
 2. Снять осциллограммы переходного процесса в заведомо исправном изделии электрооборудования при коммутации.
 3. Вычислить постоянную времени изменения тока для каждого тестового импульса по формуле:
- $$\tau = (t_2 - t_1) \left(\ln(i(t_2)) - \ln(i(t_1)) \right)^{-1} \quad (1)$$
4. Определить среднее значение $\bar{\tau}$.
 5. Провести тестовое диагностирование этого же модуля зажигания разработанным диагностическим комплексом не менее 10 раз.
 6. Получить результаты тестирования (постоянную времени изменения

тока) из базы данных диагностического комплекса.

7. По результатам эксперимента определить размах показаний R и среднее значение $\bar{\tau}$.

8. Оценить погрешность измерения диагностического комплекса, приняв рассчитанное в п. 4 значение τ за действительное.

9. Повторять процедуры 5-8 каждый час в течение дня эксперимента.

10. Построить по результатам контрольную карту измерительного процесса.

11. Повторить процедуры 9, 10 для пяти образцов двумя операторами.

12. Заменить на автомобиле исправное изделие на заведомо неисправное и повторить процедуры 2-8.

13. Проанализировать полученные результаты.

К изделиям электрооборудования, имеющим активно-индуктивную нагрузку и существенно влияющим на работоспособность транспортного средства, относятся форсунки, модуль зажигания, тяговое реле стартера и прочее. Среди них наиболее распространенным дефектом, согласно статистике дефектов сборки автомобилей семейства Lada Kalina, является обрыв или короткозамкнутые витки модуля зажигания, что приводит к явному или скрытому отказу. Поэтому в качестве диагностируемого изделия выбираем модуль зажигания 2111-3705010 фирмы Bosch (Германия) автомобиля VA3-1118 (Lada Kalina).

Для проведения исследования использовалась стандартная функция тестирования элементов системы управления

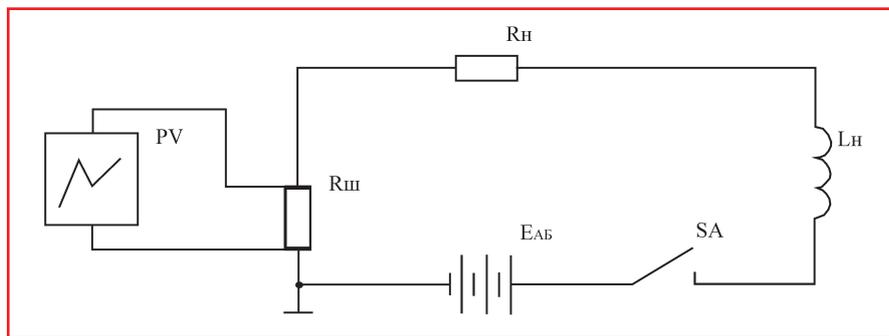


Рис. 4. Схема лабораторной установки

Таблица 3. Лабораторная установка

Элемент	Характеристика
Персональный компьютер	Pentium 4 – 3 GHz, ОЗУ 1 Gb, ATI Radeon Pro 256 Mb
Осциллографическая приставка	4 канала, цифровая фильтрация, самописец АСК-3107 ф. АКТАКОМ
Шунт измерительный	ШС – 10 А – 0,5, ШС – 20 А – 0,5

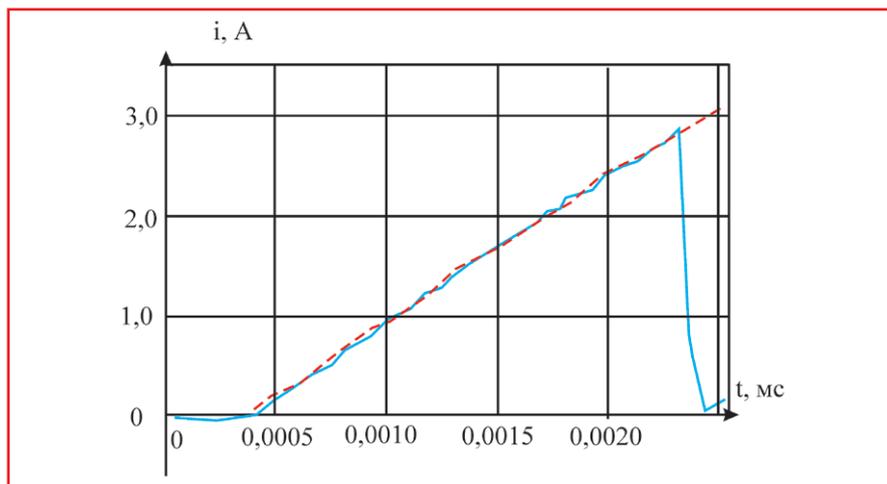


Рис. 5. Осциллограмма тока в первичной обмотке заведомо исправного модуля зажигания:
— экспериментальная кривая; - - - - - теоретическая кривая.

двигателя, реализованная во всех современных контроллерах. Для тестирования модулей зажигания, управляемых контроллерами, устанавливаемыми на автомобили семейства ВАЗ, используется серия из 20 тестовых импульсов частотой 100 Гц и длительностью 2 мс, что соответствует работе двигателя на максимальных оборотах.

На рис. 5 представлена осциллограмма изменения тока в первичной обмотке заведомо исправного модуля зажигания в течение одного тестового импульса. Используя полученные данные, определяем значение постоянной времени по формуле (1) для всех тестовых импульсов.

Среднее значение постоянной времени

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^{20} \tau_i}{20} = 17,100 \text{ мс.} \quad (2)$$

Вычисленное по результатам эксперимента на лабораторной установке среднее значение постоянной времени тока первичной цепи принимаем за действительное для исправного модуля зажигания при дальнейших исследованиях.

Полученное значение постоянной времени попадает в заявленное поле допуска $\tau = 17 \pm 5\%$ мс.

Определим активное сопротивление первичной обмотки модуля зажигания для последующего сравнительного анализа возможности его использования в качестве диагностического параметра при определении отклонения технических характеристик модуля от заявленных производителем $R_{1_{исп}} = 0,71 \text{ Ом}$.

Полученные из базы данных диагностического комплекса значения постоянной времени сведены в таблице 4.

Определим среднее значение $\bar{\tau}_{ДК}$

$$\bar{\tau}_{ДК} = \frac{\sum_{i=1}^{10} \tau_{ДКi}}{10} = 17,051 \text{ мс.} \quad (3)$$

Определим размах показаний R по формуле

$$R = X_{MAX} - X_{MIN} = 17,073 - 17,019 = 0,054 \text{ мс.} \quad (4)$$

Абсолютная погрешность измерений диагностического комплекса

$$\Delta = \bar{\tau}_{ДК} - \tau, \quad (5)$$

где $\bar{\tau}_{ДК}$ – среднее значение постоянной времени, измеренной диагностическим комплексом, τ – действительное значение постоянной времени.

$$\Delta_{исп} = 17,051 - 17,10 = -0,049 \text{ мс} \quad (6)$$

Относительная погрешность измерений диагностического комплекса:

$$\gamma_{исп} = \frac{\Delta_{исп}}{\tau} \cdot 100\%, \quad (7)$$

$$\gamma_{исп} = \frac{-0,049}{17,10} \cdot 100\% = -0,29\%. \quad (8)$$

Таким образом, относительная погрешность измерений в данном случае менее 0,3%.

Построение контрольной карты измерительного процесса

В качестве контролируемого параметра выступает постоянная времени тока τ переходного процесса в первичной обмотке модуля зажигания при коммутации. Для построения контрольной карты по количественному признаку сделаем предположение, что постоянная времени τ – случайная величина с нормальным распределением, контрольные границы определяются 6σ интервалом. Принимая во внимание, что нормальная случайная величина полностью определяется двумя параметрами: положением центра рассеивания a (средним значением) и величиной стандартного отклонения σ , построим по результатам ряда экспериментов контрольную карту Шухарта ($\bar{X} - R$ -карта).

Измерения проводились циклами по десять тестов каждый час в течение рабочего дня. Результаты измерений одного модуля зажигания сведены в таблице 5.

Контрольные границы, основанные на объеме подгрупп и величине

Таблица 4. Результаты эксперимента

№ теста	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
τ , мс	17,065	17,028	17,059	17,073	17,051	17,062	17,039	17,062	17,047	17,019

Таблица 5. Результаты эксперимента

Время, мс/ под-группы	8-00	9-00	10-00	11-00	12-00	13-00	14-00	15-00	16-00
1	17,065	17,071	17,056	17,097	17,073	17,063	17,037	17,053	17,062
2	17,028	17,087	17,138	17,058	17,067	17,116	17,048	17,081	17,113
3	17,059	17,133	17,037	17,111	17,059	17,122	17,034	17,126	17,049
4	17,073	17,076	17,026	17,083	17,076	17,092	17,028	17,016	17,101
5	17,051	17,122	17,068	17,053	17,084	17,068	17,045	17,019	17,049
6	17,062	17,148	17,021	17,072	17,098	17,112	17,067	17,122	17,083
7	17,039	17,013	17,085	17,132	17,048	17,086	17,079	17,106	17,057
8	17,062	17,085	17,033	17,130	17,095	17,107	17,058	17,082	17,065
9	17,047	17,113	17,027	17,076	17,086	17,113	17,037	17,055	17,095
10	17,019	17,094	17,035	17,143	17,063	17,082	17,087	17,073	17,089
	17,051	17,094	17,053	17,096	17,075	17,096	17,052	17,073	17,076
R	0,054	0,135	0,112	0,090	0,050	0,059	0,059	0,107	0,064

изменчивости внутри подгруппы, определяются по формулам:

$$UCL_R = D_4 \cdot \bar{R}, \quad (9)$$

$$UCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \cdot \bar{R}, \quad (10)$$

$$LCL_R = D_3 \cdot \bar{R}, \quad (11)$$

$$LCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \cdot \bar{R}, \quad (12)$$

где $\bar{R} = 0,081$ мс – среднее значение размахов группы измерений;

$\bar{\bar{X}} = 17,074$ мс – среднее значение средних по подгруппам.

Коэффициенты для расчета контрольных границ карты Шухарта, зависящие от объема подгруппы n , сведены в таблицу 6.

При проведенных экспериментальных исследованиях объем подгруппы (число измерений в одном цикле) составляет $n = 10$. Тогда:

$$UCL_R = D_4 \cdot \bar{R} = 1,78 \cdot 0,081 = 0,144 \text{ мс},$$

$$UCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \cdot \bar{R} = 17,074 + 0,31 \cdot 0,081 = 17,099 \text{ мс},$$

$$LCL_R = D_3 \cdot \bar{R} = 0,22 \cdot 0,081 = 0,018 \text{ мс},$$

$$LCL_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \cdot \bar{R} = 17,074 - 0,31 \cdot 0,081 = 17,048 \text{ мс}.$$

Аналогично строятся карты Шухарта еще для четырех образцов модулей зажигания, диагностируемых двумя операторами.

Экспериментальные исследования неисправного изделия

На рис. 6 представлена осциллограмма изменения тока в первичной обмотке заведомо неисправного модуля зажигания (несколько короткозамкнутых витков в первичной обмотке, приводящих к снижению энергии разряда) в течение одного тестового импульса.

Используя полученные данные, определяем значение постоянной времени по формуле (1) для всех тестовых импульсов.

Полученные из базы данных диагностического комплекса значения постоянной времени сведены в таблицу 7.

Относительная погрешность измерений диагностического комплекса

$$\gamma_{\text{неисп}} = \frac{\Delta_{\text{неисп}}}{\tau} 100\%, \quad (13)$$

$$\gamma_{\text{неисп}} = \frac{0,096}{19,801} \cdot 100\% = 0,486\%$$

в данном случае менее 0,5%.

Относительное изменение значений диагностических параметров при наличии неисправности в модуле зажигания определим по формуле

Таблица 6. Коэффициенты для расчета контрольных границ карты Шухарта

N	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D ₄	3,27	2,57	2,28	2,11	2,00	1,92	1,86	1,82	1,78
D ₃	-	-	-	-	-	0,08	0,14	0,18	0,22
A ₂	1,88	1,02	0,73	0,58	0,48	0,42	0,37	0,34	0,31

Таблица 7. Результаты эксперимента

№ теста	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
τ, мс	19,895	19,897	19,904	19,887	19,893	19,901	19,905	19,892	19,895	19,901

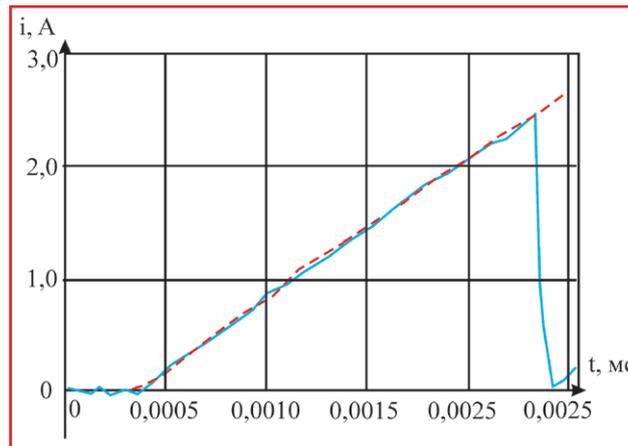


Рис. 6. Осциллограмма тока в первичной обмотке заведомо неисправного модуля зажигания — экспериментальная кривая; — теоретическая кривая.

$$\%X = \frac{|X_{\text{неисп}} - X_{\text{исп}}|}{X_{\text{исп}}} 100\%, \quad (14)$$

где $X_{\text{исп}}$ – значение диагностического параметра для исправного модуля зажигания, $X_{\text{неисп}}$ – значение диагностического параметра для неисправного модуля зажигания.

$$\%\tau = \frac{|\tau_{\text{неисп}} - \tau_{\text{исп}}|}{\tau_{\text{исп}}} 100\% = 15,79\%$$

$$\%R1 = \frac{|R1_{\text{неисп}} - R1_{\text{исп}}|}{R1_{\text{исп}}} 100\% = 2,82\%$$

Таким образом, применение в качестве диагностического параметра постоянной времени тока переходного процесса увеличивает полноту диагностирования, а следовательно, повышает качество диагностирования автомобильного электрооборудования.

Продолжительность диагностирования всего комплекса электрооборудования одного автомобиля при применении разработанного диагностического комплекса составляет 5,2 минуты, что на 23,1% меньше времени диагностирования с помощью диагностического комплекса Sovtest.

На основании проведенных исследований можно сделать ряд выводов. Выполнено тестовое диагностирование заведомо исправного и неисправного модуля зажигания, подтвердившее работоспособность разработанного диагностического комплекса. При этом относительная погрешность измерений постоянной времени тока переходного процесса для

разработанного диагностического комплекса не превышает 0,5%. Проведен ряд экспериментов по диагностированию элемента электрооборудования (пяти заведомо исправных образцов модуля зажигания двумя операторами) с целью последующей статистической оценки пригодности измерительного процесса, по результатам которых построены контрольные карты Шухарта. Экспериментально установлено, что продолжительность диагностирования при использовании разработанного диагностического комплекса сокращается на 23,1% относительно существующей системы, причем на 1,4% – за счет применения нового метода.

Литература

1. Козловский В.Н., Пьянов М.А. Обеспечение качества процесса диагностирования электрооборудования автомобилей: монография [Текст] / В.Н. Козловский, М.А. Пьянов. – Самара: Издательство СамНЦ РАН, 2014. – 150 с.
2. Панюков Д.И., Козловский В.Н., Слестина Г.Г. Проектирование новых производственных процессов / Стандарты и качество, 2014, № 11.

Козловский Владимир Николаевич

Инженер по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов». В 1999 году окончил Тольяттинский политехнический институт. Доктор технических наук. В 2010 году защитил докторскую диссертацию на тему «Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования автомобилей». Автор более 150 научных работ, в том числе 10 монографий. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета (СамГТУ).

Новикова Анна Петровна

Родилась в 1983 году. В 2005 году окончила СамГТУ по специальности «Инженер-электрик». Опыт работы – 11 лет. В настоящее время работает ассистентом кафедры «ТОЭ» и учится в аспирантуре СамГТУ. Имеет 7 научных работ.

Пьянов Михаил Александрович

Родился в 1981 году. Окончил Тольяттинский государственный университет, инженер по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов». Кандидат технических наук, доцент. В 2006 году защитил кандидатскую диссертацию по теме «Диагностика си-

стемы электрооборудования легковых автомобилей». Опыт работы – 15 лет. В настоящее время работает ведущим инженером службы инжиниринга ПАО «АВТОВАЗ». Автор 45 статей и 2 патентов.

Дебелов Владимир Валентинович

Родился в 1989 году. В 2012 году окончил Тольяттинский государственный университет (ТГУ) по специальности «Промышленная электроника». Кандидат технических наук. В 2016 году защитил диссертацию по теме «Моделирование электротехнических систем управления двигателем легкового автомобиля». Опыт работы – 6 лет. В настоящее время работает ведущим инженером-конструктором ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». Имеет 25 публикаций.

Kozlovskiy Vladimir

Is an engineer, specialization is Car and tractor electric equipment. In 1999 he graduated from Tolyatty Polytechnic Institute. Doctor of engineering. In 2010 he defended a Dphil in the subject Quality and safety assurance of car electric equipment system. He is an author of more than 150 scientific works, including 10 monographs. At present he works as department chairman Theoretic and general electrotechnics at the Samara State Technical University (SamGTU).

Novikova Anna

She was born in 1983. In 2005 she graduated from Samara State Technical University majoring in Electrical engineer. She has 11 years of work experience. At present she works as an assistant of the Theoretical and general electrical engineering department and studies in graduate school SamGTU. She has 7 scientific papers.

Pyanov Mikhail

Was born in 1981. He graduated from Tolyatinskiy State University, he is an engineer with specialization in Electrical equipment of cars and tractors. Candidate of technical sciences, associate professor. In 2006 he defended a master's dissertation in System diagnostics of electrical equipment of passenger cars. His work experience is 17 years. At present he works as a leading engineer of the engineering service of PJSC AVTOVAZ. He has 45 articles and 2 patents.

Debelov Vladimir

Was born in 1989. In 2012 he graduated from Tolyatinskiy State University with specialization in Industrial electronics. Candidate of technical sciences. In 2016 he defended his thesis on Modeling of electrical control systems of the car engine. Experience – 6 years. Currently he works as a leading design engineer of SSC RF FSUE "NAMI". He has 25 publications.

Диагностика технического состояния рулевого привода системы управления воздушного судна по параметрам передаточной функции

// Diagnostics of the technical condition of the steering transmission of the aircraft control system according to the parameters of the transfer function //

Уваров И. А.,
 Попов Ю. В., д. т. н.,
 НИИ Центрального научно-исследовательского института,
 МО, Люберцы

Предложен метод диагностики технического состояния рулевого привода системы управления воздушного судна на основе параметрической идентификации передаточной функции по результатам измерения входного и выходного параметров агрегата, зарегистрированных бортовыми устройствами регистрации на некотором интервале времени.

Особенности определения отказавшего элемента рассмотрены на примере диагностики электрогидравлического рулевого привода.

Ключевые слова: диагностика, метод, рулевой привод, передаточная функция, бортовые устройства регистрации, параметр регуляризации.

A method is proposed for diagnosing the technical condition of the steering transmission of the aircraft control system on the basis of parametric identification of the transfer function by the results of measuring the input and output parameters of the unit registered by the onboard recording devices at a certain time interval. Features of definition of the failed element are considered on an example of diagnostics of the electrohydraulic steering transmission.

Keywords: diagnosis, a method, a steering transmission, transfer function, onboard device registration, the regularization parameter.

В связи со значительным усложнением современных электродистанционных систем управления воздушного судна (ВС) и применением в них сложных исполнительных элементов задача оценки работоспособности (контроля функционирования) рулевых приводов (РП) в настоящее время становится все более актуальной.

Для определения технического состояния РП широкое распространение получили методы функциональной и тестовой диагностики [1].

При тестовом диагностировании на вход объекта диагностирования подаются специальные тестовые воздействия и по реакции объекта на эти воздействия оценивается его техническое состояние. Тестовые воздействия могут подаваться на основные входы объекта диагностирования, т. е. на входы, используемые при применении объекта по назначению, и на дополнительные входы, используемые при применении объекта по назначению,

При функциональном диагностировании воздействия, поступающие на основные входы объекта, задаются его рабочим алгоритмом функционирования, поэтому они не могут выбираться исходя из условий эффективности организации процесса диагностирования. Эти воздействия называются рабочими.

Однако данные методы зачастую не могут быть применены для оценки технического состояния РП в процессе расследования авиационного происшествия (АП) ввиду либо невозможности обнаружения объектов контроля на месте АП, либо их значительного повреждения.

Для решения этой проблемы необходима разработка новых методов диагностики РП на основе анализа параметрической информации, зарегистрированной бортовыми устройствами регистрации (БУР) ВС. Одним из таковых может быть метод диагностики РП по параметрам передаточной функции, рассмотренный в данной статье.

В основе предложенного метода диагностики лежит статистическая идентификация оптимальной передаточной функции РП по результатам синхронного измерения входного $u(t)$ и выходного $y(t)$ параметров агрегата, зарегистрированных БУР на некотором интервале времени. При этом диагностика агрегата выполняется в два этапа: на первом определяется вид технического состояния исследуемого РП путем определения передаточной функции и оценивания значений ее коэффициентов. В случае определения неработоспособного состояния агрегата на втором этапе выполняется определение (локализация) отказавшего элемента агрегата.

РП может быть аппроксимирован колебательным звеном, тогда его передаточная функция имеет вид [2]

$$W(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 2T\xi p + 1} = \frac{b_1}{p^2 + a_1 p + a_2}, \quad (1)$$

где: $b_1 = \frac{K}{T^2}$, $a_1 = \frac{2\xi}{T}$, $a_2 = \frac{1}{T^2}$;

K – коэффициент усиления (передачи);
 T – постоянная времени;
 ξ – относительный коэффициент затухания.

Передаточную функцию (1) преобразуем в дифференциальное уравнение

$$y''(t) + a_1 y'(t) + a_2 y(t) = b_1 u(t). \quad (2)$$

Уравнение (2) можно преобразовать в разностное уравнение путем замены производных разностями. Первую производную функции $y(t)$ можно аппроксимировать центральной разностной производной

$$\frac{dy(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{y(t+\Delta t) - y(t-\Delta t)}{2\Delta t} \rightarrow$$

$$\rightarrow \Delta y(k) = \frac{y(k+1) - y(k-1)}{2\Delta t}.$$

На практике для приближенного вычисления второй производной функции $y(t)$ используют следующую формулу второй разностной производной:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y(t)}{dt^2} &= \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{y'(t+\Delta t) - y'(t-\Delta t)}{\Delta t} = \\ &= \frac{y(t+\Delta t) - y(t)}{\Delta t} - \frac{y(t) - y(t-\Delta t)}{\Delta t} = \\ &= \frac{y(t+\Delta t) - 2y(t) + y(t-\Delta t)}{\Delta t^2} \rightarrow \\ &\rightarrow \Delta^2 y(k) = \frac{\Delta y'(k+1) - \Delta y'(k-1)}{\Delta t} = \\ &= \frac{y(k+1) - 2y(k) + y(k-1)}{\Delta t^2}. \end{aligned}$$

Из исходного дифференциального уравнения (8) получим уравнение в конечных разностях

$$\begin{aligned} &\frac{y(k+1) - 2y(k) + y(k-1)}{\Delta t^2} + \\ &+ a_1 \frac{y(k+1) - y(k-1)}{2\Delta t} + \\ &+ a_2 y(k) = b_1 u(k), \end{aligned} \quad (3)$$

значения функции указаны в соответствующие моменты времени.

В результате преобразования уравнения (3) и замены $y(k+1) = y_{k+1}$, $y(k) = y_k$, $y(k-1) = y_{k-1}$ получим разностное уравнение 2-го порядка вида

$$y_{k+1} + c_1 y_k + c_2 y_{k-1} = c_3 u_k, \quad (4)$$

где $c_1 = \frac{-4 + 2a_2 \Delta t}{2 + a_1 \Delta t}$; $c_2 = \frac{2 - a_1 \Delta t}{2 + a_1 \Delta t}$;

$$c_3 = \frac{2b_1 \Delta t^2}{2 + a_1 \Delta t}.$$

Уравнение (4) можно рассматривать как линейную статическую модель $y = c_1 z_1 + c_2 z_2 + c_3 z_3$, тогда проблема сводится к решению системы линейных уравнений:

$$\begin{pmatrix} (z_1, z_1) & (z_1, z_2) & (z_1, z_3) \\ (z_2, z_1) & (z_2, z_2) & (z_2, z_3) \\ (z_3, z_1) & (z_3, z_2) & (z_3, z_3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (z_1, y) \\ (z_2, y) \\ (z_3, y) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Систему линейных уравнений можно представить в матричном виде

$$ZC = Y. \quad (6)$$

Матричное уравнение (6) равносильно системе алгебраических уравнений с неизвестными значениями коэффициентов C , которые могут быть определены по методу обращения

$$C = Z^{-1}Y. \quad (7)$$

Однако метод определения коэффициентов C по зарегистрированным параметрам полета по своей природе неустойчив. Это связано с погрешностями исходных данных Z и Y , которые неизбежно возникают в результате регистрации параметров БУР. Таким образом,

решение уравнения (7) является задачей некорректно поставленной [3]. Решение системы уравнений (7) будем искать в виде

$$\hat{C} = (aE + Z^T Z)^{-1} \cdot Z^T \cdot Y, \quad (8)$$

где \hat{C} – вектор оценок искоемых коэффициентов решения системы линейных уравнений; E – единичная матрица; a – параметр регуляризации, обеспечивающий достижение решения в случае плохой обусловленности матрицы $Z^T Z$.

После оценки вектора \hat{C} с помощью простых вычислений определяются значения коэффициентов передаточной функции (1).

Так как передаточная функция (1) определяет статические и динамические характеристики агрегата, она является математической моделью состояния РП.

Для определения технического состояния РП необходимо произвести оценку трех параметров, характеризующих состояние элементов привода, которые образуют вектор оцениваемых величин $X = [K, T, \xi]^T$.

Геометрически состояние РП в фиксированный момент времени t можно охарактеризовать некоторой точкой в трехмерном пространстве, соответствующей оконечности вектора $X(t)$ (рис. 1). Эта точка в процессе эксплуатации занимает различные положения, которые в совокупности представляют область S возможных состояний РП. При этом метод контроля технического состояния РП по параметрам передаточной функции предполагает, что работоспособному состоянию агрегата будут соответствовать определенные значения коэффициентов K, T, ξ . То есть на каждый из коэффициентов задаются

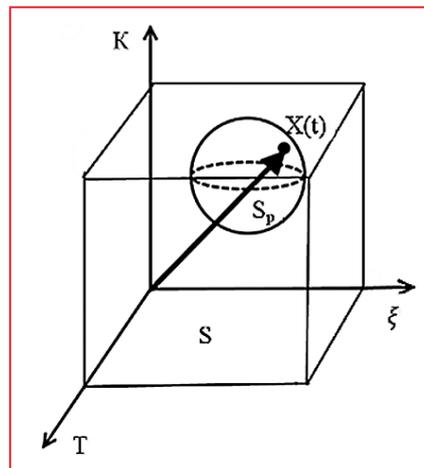


Рис. 1. Статистическая модель контроля технического состояния РП в трехмерном пространстве

допуски, характеризующие минимальное и (или) максимальное значение, соответствующие работоспособному состоянию РП. Тогда работоспособному состоянию РП будет соответствовать определенная область S_p трехмерного пространства значений оцениваемых коэффициентов передаточной функции агрегата ($S_p \in S$), ограниченная поверхностью, положение которой задается значениями допусков на эти величины. До тех пор, пока рабочая точка находится в пределах этой ограниченной области, агрегат считается работоспособным.

Таким образом, имея некоторую статистическую выборку коэффициентов передаточной функции конкретного типа РП, не составляет большого труда определить границы (минимальные и максимальные значения коэффициентов) работоспособного состояния агрегата.

В том случае, если значения коэффициентов передаточной функции исследуемого РП вышли за границы работоспособного состояния, т.е. агрегат находится в неработоспособном состоянии, необходима дальнейшая диагностика с целью определения (локализации) отказавшего элемента или детали.

Для решения данной задачи необходимо установить взаимосвязь значений коэффициентов передаточной функции (1) с динамическими свойствами основных элементов РП и определить диагностические признаки основных видов неисправностей, возможных в процессе эксплуатации агрегата.

Определение диагностических признаков отказов рассмотрим на примере трехкаскадного электрогидравлического рулевого привода (ЭГРП) с распределителем типа «сопло – заслонка». Он может быть представлен состоящим из трех последовательно соединенных звеньев: усилителя с электромеханическим преобразователем, распределителя типа «сопло – заслонка» и золотника, управляющего силовым цилиндром [4]. В соответствии с этим передаточная функция ЭГРП будет

$$W_y(p) = \frac{W_u(p) W_\varphi(p) W_z(p)}{1 + k_{OC} W_u(p) W_\varphi(p) W_z(p)}. \quad (9)$$

В рабочем диапазоне углов отклонения заслонки $\varphi = 2 \dots 3$ град. электромеханический преобразователь (с усилителем) представляет собой колебательное звено. Однако при малой частоте входного сигнала его можно принять усилительным

звеном $\varphi = K_{\varphi}^u u_{вх}$, откуда передаточная функция первого каскада усиления будет

$$W_{\varphi}^u(p) = K_{\varphi}^u. \quad (10)$$

Передаточная функция второго каскада – распределителя типа «сопло – заслонка», управляющего золотником, будет

$$W_{\frac{z}{\varphi}}(p) = \frac{k_{C3}}{T_{C3}p + 1}, \quad (11)$$

где постоянная времени и коэффициент усиления, соответственно, определяются следующими выражениями:

$$T_{C3} = \frac{F_3^2}{c_{ПП}k_Q^{\Delta p}}, \quad k_{C3} = \frac{F_3^2 k_Q^{\varphi}}{c_{ПП}k_Q^{\Delta p}}.$$

Таким образом, второй каскад усиления – инерционное звено, параметры которого определяются жесткостью центрирующих пружин $c_{ПП}$, площадью поперечного сечения золотника F_3 , коэффициентами расхода по давлению и по отклонению заслонки k_Q^{φ} .

Управляющий золотник с силовым цилиндром, образующие третий каскад усиления, представляют собой простейший привод с разомкнутой обратной связью и передаточной функцией

$$W_{\frac{y}{z}}(p) = \frac{k_{РП}}{p}. \quad (12)$$

Подставив передаточные функции звеньев в (9), после преобразования получим передаточную функцию ЭГРП

$$W_{\frac{y}{u_{вх}}}(p) = \frac{1/k_{OC}}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}, \quad (13)$$

где $\xi = \frac{1}{2\sqrt{T_{C3}k_{OC}k_{\varphi}^u k_{C3}k_{РП}}}$

$$T = \sqrt{\frac{T_{C3}}{k_{OC}k_{\varphi}^u k_{C3}k_{РП}}}$$

k_{φ}^u – коэффициент поворота заслонки по входному напряжению;

T_{C3} – постоянная времени распределителя «сопло – заслонка»;

k_{C3} – коэффициент усиления распределителя «сопло – заслонка»;

$k_{РП}$ – коэффициент усиления по скорости.

Приравняв уравнение (1) к (13), получим систему уравнений (14), решив которую определим связь параметров передаточной функции РП с параметрами передаточных функций его элементов:

$$\begin{cases} K = \frac{1}{k_{OC}}, \\ \xi = \frac{1}{2\sqrt{T_{C3}k_{OC}k_{\varphi}^u k_{C3}k_{РП}}}, \\ T = \sqrt{\frac{T_{C3}}{k_{OC}k_{\varphi}^u k_{C3}k_{РП}}} \end{cases} \quad (14)$$

Упростим систему уравнений путем замены $k_{\varphi}^u k_{C3} k_{РП} = x$ и $T_{C3} = y$, получим систему следующего вида:

$$\begin{cases} k_{OC} = \frac{1}{K}, \\ \xi = \frac{1}{2\sqrt{k_{OC}xy}}, \\ T = \sqrt{\frac{y}{k_{OC}x}} \end{cases} \quad (15)$$

Решив систему уравнений методом подстановки, получим следующее решение системы:

$$\begin{cases} k_{OC} = \frac{1}{K}, \\ x = \sqrt{\frac{K^2}{4\xi^2 T^2}}, \\ y = \frac{T}{2\xi} \end{cases} \quad (16)$$

Выполнив обратную замену $k_{\varphi}^u k_{C3} k_{РП} = x$ и $T_{C3} = y$, получим искомую взаимосвязь параметров в виде системы уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} k_{\varphi}^u k_{C3} k_{РП} = \sqrt{\frac{K^2}{4\xi^2 T^2}}, \\ T_{C3} = \frac{T}{2\xi} \end{cases} \quad (17)$$

Анализ системы уравнения (17) показывает, что одно из уравнений системы содержит в себе три неизвестных ($k_{\varphi}^u, k_{C3}, k_{РП}$). Для решения данного уравнения необходимо двум неизвестным задать произвольные значения.

Так, в нашем случае для диагностики ЭГРП важным и «трудно определяемым» является коэффициент усиления распределителя типа «сопло – заслонка» k_{C3} . При этом остальные два коэффициента k_{φ}^u и $k_{РП}$ легко находятся путем замеров, выполняемых на самолете-аналог.

Таким образом, коэффициенты передаточных функций конструктивных элементов ЭГРП ($k_{\varphi}^u, k_{C3}, k_{РП}, T_{C3}$) определяются внутренними (конструктивными) параметрами элементов агрегата, что дает возможность их использования в качестве диагностических (контролируемых) параметров. При этом данные параметры имеют взаимную зависимость с параметрами передаточной функции исследуемого агрегата в целом и позволяют использовать уравнение (17) в качестве диагностической модели ЭГРП.

Для моделирования состояний ЭГРП необходимо иметь описание аварийных состояний, приводящих к потере работоспособного состояния. Первичных неисправностей может быть бесконечное множество. Для выбора диагностических признаков все возможные неисправности ЭГРП можно объединить в следующие основные группы [5, 6]:

- негерметичность различных участков РП;
- частичное перекрытие (засорение) участков;
- изменение характеристик упругих элементов;
- заедание или схватывание подвижных элементов;
- смещение «электрического» нуля канала;
- ложный управляющий сигнал;
- отсутствие сигнала обратной связи.

Выполненное моделирование неисправностей ЭГРП показало, что выбранные контролируемые параметры $k_{\varphi}^u, k_{C3}, k_{РП}, T_{C3}$ чувствительны ко всем основным неисправностям агрегата (таблица 1), а количество контролируемых параметров (признаков) достаточно для постановки достоверного диагноза.

Таблица 1. Таблица чувствительности диагностических (контролируемых) параметров к основным группам неисправностей

№ п/п	Группы неисправностей ЭГРП	Контролируемые параметры			
		K_{φ}^u	T_{C3}	K_{C3}	$K_{КР}$
1	Негерметичность различных участков РП	0	1	1	1
2	Частичное перекрытие (засорение) участков	0	1	1	1
3	Изменение характеристик упругих элементов	1	1	1	1
4	Заедание или схватывание подвижных элементов	0	1	1	1
5	Смещение «электрического» нуля канала	0	0	1	1
6	Ложный управляющий сигнал	1	1	1	1
7	Отсутствие сигнала обратной связи	0	0	0	1

Примечание: в таблице обозначено: 1 – качественное изменение значения контролируемого параметра при наличии неисправности; 0 – отсутствие качественного изменения значения контролируемого параметра при наличии неисправности

Таким образом, в статье предложен метод технической диагностики РП системы управления ВС по параметрам его передаточной функции (1), полученной путем статистической идентификации с применением регуляризирующего оператора результатов измерения входного и выходного параметров агрегата, зарегистрированных БУР на некотором интервале времени. При этом диагностика агрегата выполняется в два этапа: на первом этапе определяется вид технического состояния исследуемого РП путем оценивания величин вектора $X = [K, T, \xi]^T$ и отнесения их к работоспособному или неработоспособному состоянию агрегата.

Для определения (локализации) отказавшего элемента агрегата на втором этапе диагностики установлена взаимосвязь значений коэффициентов передаточной функции (1) с динамическими свойствами основных элементов РП в виде уравнения (17) и определены, на примере ЭГРП, диагностические признаки основных видов неисправностей, возможных в процессе эксплуатации агрегата.

Литература

1. Алексеева Т.В., Бабанская В.Д., Башта Т.М. Техническая диагностика гидравлических приводов. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
2. Крымов В.Г., Рабинович Л.В., Стеблецов В.Г. Исполнительные устройства систем управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 285 с.
4. Воробьев В.В., Киселева А.М., Поляков В.В. Системы управления летательных аппаратов. – М: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 203 с.
5. Сырицын Т.А. Надежность гидро- и пневмопривода. – М.: Машиностроение, 1981. – 216 с.
6. Уваров И.А. Нарушение расходной характеристики рабочей жидкости электрического гидроусилителя – причина отказа рулевого привода дистанционной системы управления самолета // Сборник трудов Общества независимых расследователей авиационных происшествий, 2017, № 29, с. 336-341.

Уваров Иван Александрович

Родился в 1986 году. В 2008 году окончил Ставропольское высшее военное авиационное инженерное училище по специальности «Инженер-механик». Опыт работы – 10 лет. В настоящее время работает старшим научным сотрудником Научно-исследовательского центра (г. Люберцы) Центрального научно-исследовательского института Минобороны России. Имеет 10 публикаций.

Попов Юрий Васильевич

Родился в 1954 году. В 1977 году окончил Киевское высшее инженерное авиационное военное училище по специальности «Автоматическое электро- и приборное оборудование пилотируемых летательных аппаратов», в 1987 году – Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова по специальности «Прикладная математика». Доктор технических наук, имеет научное звание старшего научного сотрудника. В 2005 году защитил диссертацию по теме «Теоретические и методические основы сохранности информации бортовых устройств регистрации при авиационных происшествиях». Опыт работы – 39 лет. В настоящее время работает старшим научным сотрудником в Научно-исследовательском институте (г. Люберцы) Центрального научно-исследовательского института ВВС МО. Имеет более 290 научных трудов, 15 авторских свидетельств и патентов.

цию по теме «Теоретические и методические основы сохранности информации бортовых устройств регистрации при авиационных происшествиях». Опыт работы – 39 лет. В настоящее время работает старшим научным сотрудником в Научно-исследовательском институте (г. Люберцы) Центрального научно-исследовательского института ВВС МО. Имеет более 290 научных трудов, 15 авторских свидетельств и патентов.

Uvarov Ivan

Was born in 1986. In 2008 graduated from Stavropol Air Force Engineering Academy with Mechanical Engineer degree. Has 10-year working experience. At the present he is a senior research associate at a Research Centre (Lyubertsy) of the Central research institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation. He has 10 publications.

Popov Yuri

He was born in 1954. In 1977 he graduated from Kiev Higher Engineering Aviation Military School majoring in Automatic, electrical and instrumental equipment of piloted aircraft and in 1987 he graduated Moscow State University majoring in Applied mathematics. He is doctor of engineering, he has academic rank of senior researcher. In 2005 he defended the thesis, the topic of thesis is Theoretical and methodical bases of information safety onboard devices of registration at aviation incidents. He has 39 years of work experience. At present he works as Senior Researcher at Scientific Research Institute (Lubertsy) of Central Research Institute of Air Defense. He has more than 290 scientific papers, 15 certificates of authorship and patents.

Перечень статей, опубликованных в журнале «Электроника и электрооборудование транспорта» в 2018 году

№ п/п	Название раздела, статьи	Авторы	№ журнала	Страницы
Раздел «ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ»				
1	Эволюция мотивов использования электромобилей	Яковлев В.Ф.	3	2-5
2	Повышение энергетической эффективности производственной деятельности ОАО «РЖД» за счет внедрения новых технических и технологических решений	Прокофьева Е.С., Шилер В.В., Шилер А.В.	6	2-4
Раздел «ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ДИАГНОСТИКИ, СВЯЗИ»				
3	Моделирование работы электронного устройства управления рекуперативным магнитным амортизатором в системе Simulink	Сарбаев В.И., Гармаш Ю.В., Крюков А.Н., Блинникова Л.Г.	4	2-5
Раздел «ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ»				
4	Резервные вторичные источники электропитания переменного тока со звеном постоянного напряжения для транспортных и стационарных электроэнергетических комплексов	Резников С.Б., Харченко И.А., Корнилов А.Б., Савостьянов В.В., Томилин М.М., Храмцов К.Н.	1	2-7
5	Анализ токораспределения в тяговых сетях переменного тока при их двухстороннем питании и учете сопротивления системы внешнего электроснабжения	Косарев А.Б., Косарев Б.И.	1	8-13
6	Подход к формированию рейтинга работы машиниста с использованием различных метрик сравнения	Сидоренко Г.А., Кулагин М.А.	1	14-17
7	Нормативные основы экономии электрической энергии в строительстве	Гречишников В.А., Сорокина А.В., Соловьёв В.В., Гавриленков А.А., Демидов С.С.	1	18-21
8	Экспериментальные исследования электрического тормоза электропоезда с асинхронным тяговым приводом в режиме автоматического торможения	Александров А.В.	1	22-25
9	Исследование синхронных электродвигателей с постоянными магнитами и асинхронным пуском	Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Бекузин В.И., Айгузина В.В.	1	26-30
10	Энергоэффективное двухзонное регулирование электропривода с прямым управлением моментом асинхронных двигателей	Федяева Г.А., Иньков Ю.М., Конохов Д.В., Тарасов А.Н.	1	31-36
11	Экспериментальное определение потерь во вспомогательном электроприводе при различных формах напряжения питания	Шаров В.А., Корольков В.А., Ляшенко А.С., Самко Е.Б., Власов Д.И.	1	37-40
12	Автотрансформаторно-выпрямительные устройства в системах электроснабжения летательных аппаратов. Неравномерные топологические структуры	Коняхин С.В., Коняхин В.С.	2	2-7
13	Моделирование основных процессов электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой	Строганов В.И., Козловский В.Н., Шакурский М.В., Зятров А.В.	2	8-13

№ п/п	Название раздела, статьи	Авторы	№ журнала	Страницы
14	Импульсные перенапряжения в рельсовом пути при стекании с него токов молнии	Косарев А.Б., Косарев Б.И.	2	14-18
15	Зарядная инфраструктура для электромобилей в условиях существующей энергетической системы: проблемы и пути решения	Бузыкканов Н.С., Сидоров К.М.	2	19-25
16	Экспериментальная проверка расчета параметров индуктивности сглаживающего реактора фильтр-устройства с полностью замкнутым магнитным потоком	Лобынцев В.В.	2	26-29
17	Релейная защита нейтральных вставок тяговых сетей переменного тока	Быкадоров А.Л., Жуков А.В.	2	30-34
18	Совместный расчет систем тягового и внешнего электроснабжения для режимов тяговой нагрузки и короткого замыкания	Серебряков А.С., Герман Л.А., Осокин В.Л., Субханвердиев К.С.	3	6-12
19	Исследование компенсаторов реактивной мощности в тяговой сети переменного тока с двухступенчатой коммутацией конденсаторов гибридными аппаратами	Власьевский С.В., Климаш С.В., Климаш В.С.	3	13-16
20	Расчет статических электрических и магнитных полей различной геометрии	Горский А.Н., Сергеенков Н.А.	3	17-22
21	Интегральный критерий для оценки безотказности электроэнергетических объектов метрополитена с использованием модифицированного топологического метода	Шевлюгин М.В., Чекан Г.В.	3	23-27
22	Расчет оптимального количества технологического оборудования для станции технического обслуживания автомобилей	Чебоксаров А.Н.	3	28-31
23	Ускоренный запуск электромашинных преобразователей аварийных источников бесперебойного питания	Вышков Ю.Д., Резников С.Б., Харченко И.А.	4	6-8
24	Трехключевой режим коммутации пятифазного преобразователя. Обобщенный вектор напряжения пятифазной системы при трехключевой коммутации	Терешкин В.М., Гришин Д.А., Макулов И.А.	4	9-15
25	Оценка влияния характеристик релейной защиты на величину ущерба от КЗ в судовых электроэнергетических системах	Малышкин С.Б., Бочкарев В.Н.	4	16-18
26	Автотрансформаторно-выпрямительные устройства в системах электроснабжения летательных аппаратов. Трехфазный уравнивательный трансформатор. Часть 1	Коняхин С.Ф., Коняхин В.С.	4	19-23
27	Исследование статических полей с помощью программного комплекса ELCUT	Горский А.Н., Сергеенков Н.А.	4	24-28
28	Бесконтактный тахогенератор постоянного тока с четырехсекционной обмоткой	Гридин В.М.	5	2-4
29	Исследование теплового состояния выпрямителя автомобильного генератора	Пузаков А.В., Осаулко Я.Ю.	5	5-
30	Сопоставительный анализ схемотехнических решений трехфазных преобразователей AC/DC	Сорокин Д.А., Вольский С.И.	5	10-15
31	Трехфазный преобразователь частоты с несимметричной схемой инвертора	Гельвер Ф.А.	5	16-20
32	Регулируемые фильтрокомпенсирующие установки в тяговой сети переменного тока. Часть 1	Герман Л.А.	5	21-25
33	Накопители энергии как средство повышения энергетической эффективности тягового подвижного состава	Евстафьев А.М., Никитин В.В.	5	26-29
34	Особенности расчета магнитного поля электрических машин	Глуценко М.Д., Горюнов И.О.	6	5-8
35	Кепстральный анализ диагностических параметров электромеханических систем электропоезда переменного тока серии ЭР9Т	Баташов С.И., Менщиков И.А.	6	9-12

№ п/п	Название раздела, статьи	Авторы	№ журнала	Страницы
36	Моделирование процессов отключения токов короткого замыкания в тяговой сети постоянного тока с использованием нового реактора сглаживающего фильтр-устройства РЖФА-6500	Дураков Д.Н., Лобынцев В.В., Устинов В.С., Бадёр М.П., Шорников Э.Н., Бурсук В.И.	6	13-18
37	Импульсные перенапряжения на заземляющем устройстве тяговой подстанции постоянного тока и технические решения по их ограничению	Косарев А.Б., Косарев Б.И.	6	19-23
38	Требования к современным системам диспетчерской централизации Московского метрополитена	Богданов В.С., Ярославцев А.Ю., Новиков В.Г., Сафронов А.И.	6	24-26
39	Модель системы тягового электроснабжения с распределенной генерацией энергии на основе ветровых электроустановок	Шевлюгин М.В., Королев А.А., Цыколенко А.А., Жуматова А.А.	6	27-31
40	Ложные срабатывания защиты кабеля питающих линий в системе тягового электроснабжения метрополитенов	Гречишников В.А., Куров Н.Д., Голицына А.Е.	6	32-34
41	Регулируемые фильтрокомпенсирующие установки в тяговой сети переменного тока. Часть 2	Герман Л.А.	6	35-39
Раздел «МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА»				
42	Исследование работы асинхронного двигателя по упрощенной схеме двойного питания	Доманов В.И., Доманов А.В., Мурзаков Д.Г.	2	35-37
43	Исследование режима постоянства выходной мощности тягового вентильно-индукторного электропривода	Красовский А.Б., Соловьев В.А., Соболев В.А., Горбунова Е.С.	3	32-37
44	Работа системы управления асинхронного двигателя с вычислителем момента	Доманов В.И., Доманов А.В., Альтахер Аббас А. Карим	3	38-40
45	Оценка режимов функционирования тягового электродвигателя электропоезда ЭР-9Т типа РТ-51М с помощью параметров распознавания технического состояния	Менщиков И.А., Баташов С.И.	3	41-43
46	Разработка и исследование наблюдателя скорости с адаптером сопротивления статора для системы векторного управления магнитоэлектрического двигателя	Исмагилов Ф.Р., Каримов В.И., Вавилов В.Е.	3	44-47
47	Сравнение расчетных сил тяги по сцеплению электровозов переменного тока с асинхронным и коллекторным приводом	Власьевский С.В., Мальшева О.А., Мельниченко О.В.	5	30-36
48	Устройство измерения частоты вращения тягового вентильного двигателя	Соловьев В.А., Красовский А.Б., Соловьева В.В., Соболев В.А.	5	37-42
49	Формирование задания на потокоцепление ротора в системе векторного управления асинхронным двигателем	Иньков Ю.М., Космодамианский А.С., Пугачев А.А.	6	43-47
Раздел «ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, ДАТЧИКИ»				
50	Технология изготовления герметичной конструкции МЭМС-устройств	Бабкин С.И., Беляев Я.В., Лебедев С.В., Яковлев О.Ю.	1	41-43
51	Измерение добротности полупроводниковых варикапов в схеме с автоматизированным алгоритмом	Сурайкин А.И., Кокулов С.Г.	2	38-41

№ п/п	Название раздела, статьи	Авторы	№ журнала	Страницы
Раздел «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ»				
52	Влияние технологии производства якорей на надежность автомобильных стартеров	Ютт В.Е., Соколов Л.А., Морозов В.В.	4	29-34
53	Диффузионная термохимическая обработка поверхности алмаза	Дерябкин А.В.	4	35-37
Раздел «ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ»				
54	Надежность электрооборудования автомобиля Lada Kalina в гарантийный период эксплуатации	Денисов И.В., Смирнов А.А.	1	44-47
55	Анализ эксплуатационных дефектов ключевых элементов электрооборудования автомобилей	Козловский В.Н., Киреев К.В., Строганов В.И.	2	42-44
Раздел «ДИАГНОСТИКА И ИСПЫТАНИЯ»				
56	Особенности эксплуатации и диагностирования дизельных генераторов, работающих на биотопливе	Люминарская Е.С., Селиванов К.В.	2	45-47
57	Проблемы и перспективы развития электротехнических и электронных систем диагностики работоспособности комплекса и элементов электрооборудования автомобилей в производстве и эксплуатации	Козловский В.Н., Петровский С.В., Новикова А.П., Пьянов М.А.	4	38-43
58	Основные аспекты разработки электротехнического производственного комплекса диагностики работоспособности электрооборудования автомобилей	Козловский В.Н., Киреев К.В., Пьянов М.А., Клейменов С.И.	5	43-47
РАЗДЕЛ «ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ»				
59	Обеспечение электромагнитной совместимости перспективных систем электрической тяги с устройствами железнодорожной автоматики	Иньков Ю.М., Розенберг Е.Н., Фадейкин Т.Н., Шухина Е.Е.	4	44-47
60	Обеспечение электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения с питающими электросетями многопульсовыми выпрямителями	Бадёр М.П., Лобынцев В.В., Сидоров Н.Б.	6	43-47

Сведения об авторах

**К.т.н.,
Коняхин Сергей Федорович**
+7-495- 980-65-00

Чернышева Юлия Владимировна
+7-921-9217027 -

**К.т.н., доцент
Терешкин Владимир Михайлович**
+7-917-775-32-41

**Д.т.н., профессор
Серебряков Александр Сергеевич**
+7-906-355-65-64

**К.т.н.
Власов Андрей Иванович**
+7-833-258-25-86

Белоусов Игорь Владимирович
+7-905-275-42-8

**К.т.н., профессор
Баженов Юрий Васильевич**
+7-910-770-55-64

**Д.т.н.
Козловский Владимир Николаевич**
+7-917-978-83-56

Уваров Иван Александрович
+7-977-901-15-42

ТРЕБОВАНИЯ К РЕКЛАМНЫМ И АВТОРСКИМ МАТЕРИАЛАМ

Рекламные материалы принимаются в форматах «.cdr», «.eps» или «.tif» (300 dpi). Цветовая модель – CMYK. Все шрифты должны быть переведены в кривые.

Авторские материалы. Текст статьи в формате «.doc» (Microsoft Word). Обязательно наличие аннотации, ключевых слов и списка используемой литературы. Название статьи, аннотация и ключевые слова должны быть переведены на английский язык. Все рисунки в форматах «.cdr» или «.eps», фотографии – в формате «.tif» (300 dpi). Каждый рисунок или фотография должны быть представлены отдельным файлом.

СТОИМОСТЬ ГОДОВОЙ ПОДПИСКИ:

(6 номеров) – **6 000 руб.**, в т.ч. НДС 18%

Оформить подписку можно:

– через редакцию – необходимо направить по факсу или электронной почте заявку с указанием банковских реквизитов, наименования организации (фирмы), точного почтового адреса и количества комплектов журнала.

Тел./факс: (495) 500-40-20 e-mail: npptez@mail.ru;

– через ОАО «Агентство Роспечать» – по Каталогу изданий органов научно-технической информации 2018 г., индекс 59990.

СТОИМОСТЬ РЕКЛАМЫ:

2-я и 3-я страницы обложки – 24 000 рублей;

4-я страница обложки – 30 000 рублей;

одна страница внутри журнала – 12 000 рублей.

Печатные материалы, используемые в журнале, являются собственностью редакции.

При перепечатке ссылка на журнал обязательна.

Полученные материалы не возвращаются.

Редакция оставляет за собой право корректорской и редакторской правки публикаций без согласования с авторами.

Журнал распространяется через редакцию по адресной рассылке, через ОАО «Агентство Роспечать», на специализированных выставках и симпозиумах.