

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: __.05.2021 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 1353

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

- Вольский С. И., Скороход Ю. Ю.**
Расчет индуктивности дросселя входного фильтра высоковольтного преобразователя 2
- Герман Л. А.**
Формирование алгоритма совместного расчета систем тягового и внешнего электроснабжения 6
- Щуров Н. И., Дедов С. И.**
Определение токовых нагрузок электромобиля на основе стандартизированного цикла WLTC. 12
- Голубчик Т. В., Куликов А. С.**
Результаты экспериментальных испытаний литий-железо-фосфатного аккумулятора производства компании «Литотех» в низкотемпературных условиях 17
- Дебелов В. В., Каменев В. Ф., Козловский В. Н., Шишков А. Н.**
Метод управления температурными режимами работы нагревателя чувствительного элемента датчика кислорода планарного типа 21
- Дураков Д. Н., Куштан М. И., Лобынцев В. В., Фокин С. Г., Кичко С. А., Поляшов А. А.**
Исследование характеристик бортовых источников питания обитаемых подводных аппаратов 29

ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ

- Пинчуков П. С., Макашева С. И., Мамаев А. Р.**
Оценка надежности перспективных схем подключения микропроцессорных систем релейной защиты тяговой сети переменного тока 35

ДИАГНОСТИКА И ИСПЫТАНИЯ

- Чебоксаров А. Н.**
Создание экспертной диагностической системы электропривода автомобиля 40

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

- Козловский В. Н., Подгорный А. С., Брачнунова У. В., Николаев П. А., Дебелов В. В.**
Экспериментальные исследования помехоустойчивости электронных систем управления двигателем внутреннего сгорания и управления автоматизированной коробкой передач 44

Расчет индуктивности дросселя входного фильтра высоковольтного преобразователя

// The calculation of the inductance of the choke input filter high-voltage converter //

**Вольский С. И., д.т.н., профессор,
МАИ, Москва**

**Скорород Ю. Ю.,
ООО «Трансконвертер», Москва**

В статье представлено решение задачи по определению индуктивности дросселя входного фильтра для силового высоковольтного преобразователя (ВП). Рассмотрены ВП на базе последовательно соединенных силовых входных блоков.

Получены выражения для расчета индуктивности дросселя входного фильтра в зависимости от заданного уровня пульсаций входного потребляемого тока, частоты коммутации силовых транзисторов, алгоритма управления и числа последовательно соединенных силовых входных блоков. Показаны силовые схемы ВП с различным количеством последовательно соединенных силовых входных блоков. Данная статья полезна специалистам, которые занимаются разработкой ВП и, в частности, проектированием бортовых статических преобразователей для подвижного состава с напряжением 3000 В постоянно-тока контактной сети.

Ключевые слова: высоковольтный преобразователь постоянного тока, индуктивность дросселя входного фильтра, пульсации входного потребляемого тока, алгоритм управления, повышающий преобразователь.

В настоящее время к статическим преобразователям, особенно к применяемым на подвижном составе, предъявляют высокие требования к качеству входного потребляемого тока [1, 2]. Одним из основных параметров, определяющих качество входного тока, является уровень амплитуды пульсаций, который зависит от индуктивности дросселя входного фильтра и частоты коммутации силовых ключей силовых входных блоков. При этом значение индуктивности дросселя входного фильтра обычно ограничено массогабаритными показателями и стоимостью ВП, а частота

The article presents a solution to the problem of determining the inductance of the input filter choke for a high-voltage power converter (HV). The HV based on series-connected power input units are considered. Expressions for calculating the inductance of the input filter choke depending on the specified level of ripple input current consumption, the switching frequency of power transistors, the control algorithm and the number of series-connected power input blocks are obtained. Power circuits of the HV with a different number of power input units connected in series are shown. This article is useful for specialists who are engaged in the development of HV, and, in particular, the design of on-board static converters for rolling stock with a voltage of 3000 V DC of the contact network.

Keywords: high-voltage DC converter, input filter choke inductance, input current consumption ripple, control algorithm, boost converter.

коммутации силовых транзисторов сдерживается уровнем динамических потерь.

Особенность высоковольтных преобразователей (ВП) заключается в том, что в этих устройствах при отсутствии требуемого класса по напряжению эффективных высоковольтных силовых транзисторов применяют последовательно соединенные силовые входные блоки [3–6]. В этом случае на уровень амплитуды пульсации входного потребляемого тока влияют также количество последовательно соединенных силовых входных блоков и тип алгоритма управления силовыми транзисторами. При этом в качестве входных блоков обычно применяют повышающие преобразователи, которые по своим физическим свойствам обладают функцией коррекции входного тока [7–10].

В связи с этим для обеспечения в ВП заданного уровня пульсаций входного потребляемого тока возникает задача по определению индуктивности дросселя входного фильтра в зависимости от заданной пульсации входного тока, частоты коммутации силовых транзисторов, типа алгоритма управления и числа последовательно соединенных силовых входных блоков.

Одноуровневая силовая схема

Одноуровневая силовая схема ВП приведена на рис. 1.

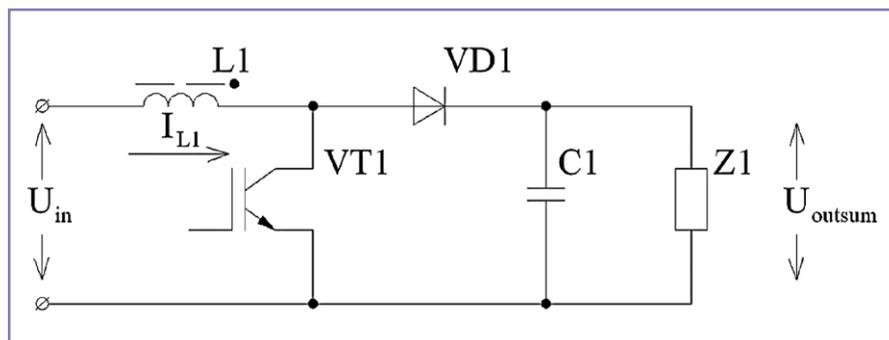


Рис. 1. Одноуровневая силовая схема: L1 – дроссель входного фильтра; VT1, VD1 и C1 – силовые элементы входного блока ВП; Z1 – обобщенная нагрузка входного блока

Представленная силовая схема содержит один входной блок ($N = 1$), который представляет собой повышающий преобразователь. В этом случае выражение для расчета амплитуды пульсаций входного тока имеет вид:

$$I_{m L1 S(n=1)}(U_{in}) = \frac{1}{2 \cdot f_{c S(n=1)} \cdot L1} \cdot (U_{in} - \frac{U_{outsum}^2}{U_{in}}), \quad (1)$$

где $f_{c S(n=1)}$ – частота коммутации силового транзистора VT1;

$L1$ – значение индуктивности дросселя входного фильтра;

U_{in} – значение входного напряжения.

После определения критических точек в (1) было найдено значение входного напряжения, при котором амплитуда пульсаций входного тока достигает максимального значения:

$$U_{in}(I_{m(max) L1 S(n=1)}) = \frac{U_{outsum}}{2}. \quad (2)$$

Соответственно после подстановки (2) в (1) максимальное значение амплитуды пульсации входного тока определяется как:

$$I_{m(max) L1 S(n=1)} = \frac{1}{8} \cdot \frac{U_{outsum}}{f_{c S(n=1)} \cdot L1}. \quad (3)$$

В свою очередь из (3) выведено выражение для определения минимального значения индуктивности дросселя $L1$, при которой обеспечивается условие непревышения заданного уровня максимальной пульсации входного тока:

$$L1 S(n=1) = \frac{U_{outsum}}{8 \cdot f_{c S(n=1)} \cdot I_{m(max) L1 S(n=1)}}. \quad (4)$$

Двухуровневая силовая схема

Двухуровневая силовая схема ВП представлена на рис. 2.

Приведенная силовая схема содержит два силовых входных блока ($N = 2$).

В случае применения более одного последовательно соединенного силового входного блока ($N > 1$) возможно использование двух типов алгоритмов управления силовыми транзисторами: синхронный и асинхронный. При синхронном алгоритме сигнал управления подается на все силовые транзисторы одновременно, а при асинхронном алгоритме силовые транзисторы управляются с фазовым сдвигом ($360 \text{ эл. градусов}/N$).

В качестве примера на рис. 3 и 4 показаны синхронный и асинхронный алгоритмы управления для рассматриваемой двухуровневой силовой схемы, где $t_{R1} = t_{R2}$ – длительности замкнутого состояния транзисторов VT1 и VT2;

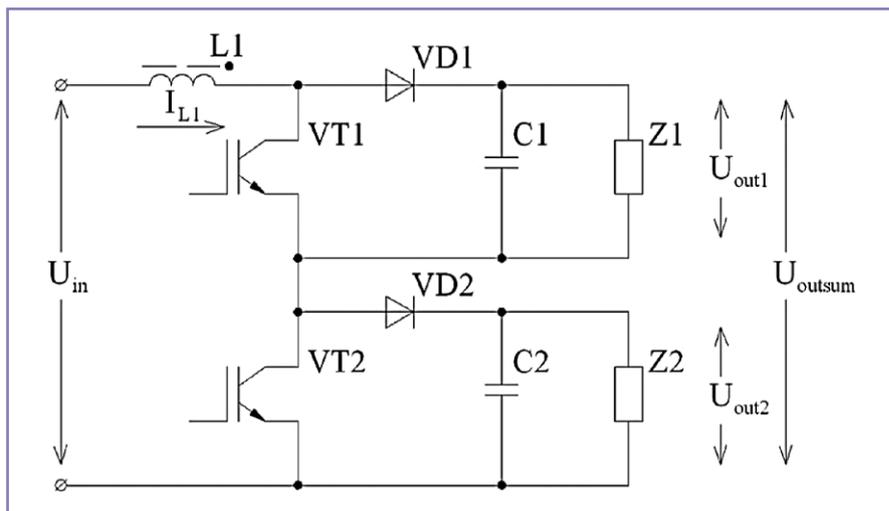


Рис. 2. Многоуровневая силовая схема: VT1, DV1 и C1 – силовые элементы первого входного блока ВП; VT2, DV2 и C2 – силовые элементы второго входного блока ВП; Z1 и Z2 – обобщенные нагрузки первого и второго входных блоков

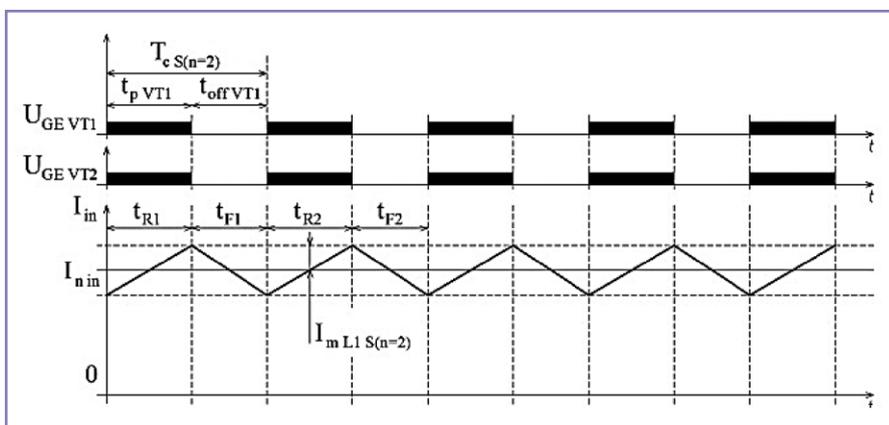


Рис. 3. Синхронный алгоритм управления

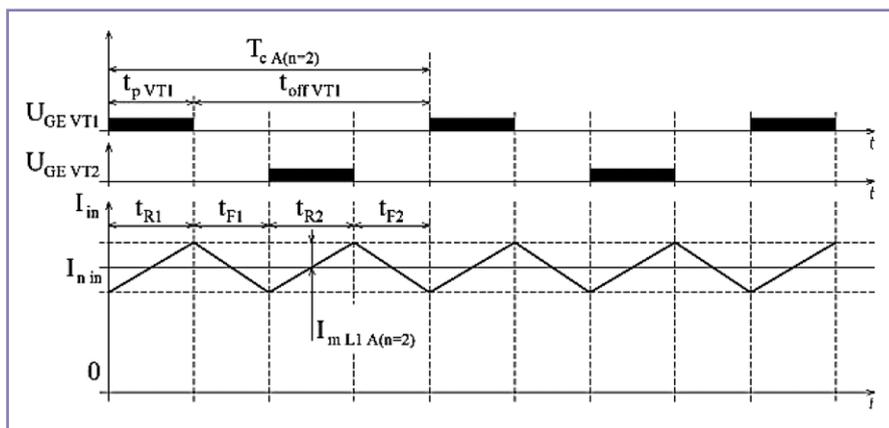


Рис. 4. Асинхронный алгоритм управления

$t_{F1} = t_{F2}$ – длительности разомкнутого состояния транзисторов VT1 и VT2;

U_{GEVT1} и U_{GEVT2} – сигнал управления транзисторами VT1 и VT2;

$I_{m L1 S(n=2)}$ и $I_{m L1 A(n=2)}$ – амплитуда пульсаций входного потребляемого тока при синхронном и асинхронном алгоритмах управления;

$T_{c S(n=2)}$ и $T_{c A(n=2)}$ – период коммутации силовых транзисторов при синхронном и асинхронном алгоритмах управления.

В случае применения в двухуровневой силовой схеме ($N = 2$) синхронного алгоритма управления выражения для расчета амплитуды пульсаций входного потребляемого тока, критических точек,

максимальной амплитуды пульсации входного потребляемого тока и минимального значения индуктивности входного дросселя $L1$ совпадают с (1) – (4), которые выведены для одноуровневой силовой схемы ($N = 1$).

При использовании асинхронного алгоритма управления силовыми транзисторами VT1 и VT2 выражение для расчета амплитуды пульсаций входного потребляемого тока на участке $0 \leq \gamma < 0,5$ имеет вид:

$$I_{m L1 A(n=2)_1}(U_{in}) = (U_{outsum} - U_{in}) \cdot \frac{1-2\gamma}{4 \cdot f_c A(n=2) \cdot L1}, \quad (5)$$

а на участке $0,5 \leq \gamma < 1$:

$$I_{m L1 A(n=2)_2}(U_{in}) = U_{in} \cdot \frac{2\gamma-1}{4 \cdot f_c A(n=2) \cdot L1}. \quad (6)$$

В этих случаях значения входного напряжения, при которых амплитуда пульсаций входного потребляемого тока становится максимальной, определяются следующими выражениями:

$$U_{in}(I_{m(max) L1 A(n=2)_1}) = \frac{3}{4} \cdot U_{outsum} \text{ при } 0 \leq \gamma < 0,5; \quad (7)$$

$$U_{in}(I_{m(max) L1 A(n=2)_2}) = \frac{1}{4} \cdot U_{outsum} \text{ при } 0,5 \leq \gamma < 1. \quad (8)$$

При этом максимальная амплитуда пульсаций входного потребляемого тока вычисляется из выражений:

$$I_{m(max) L1 A(n=2)_1} = \frac{1}{32} \cdot \frac{U_{outsum}}{f_c A(n=2) \cdot L1} \text{ при } 0 \leq \gamma < 0,5; \quad (9)$$

$$I_{m(max) L1 A(n=2)_2} = \frac{1}{32} \cdot \frac{U_{outsum}}{f_c A(n=2) \cdot L1} \text{ при } 0,5 \leq \gamma < 1. \quad (10)$$

Сравнительный анализ (9) и (10) с (4) показывает, что при равных исходных условиях в двухуровневой силовой схеме с асинхронным алгоритмом управления максимальное значение амплитуды пульсаций входного потребляемого тока в 4 раза меньше, чем в аналогичной двухуровневой силовой схеме с синхронным алгоритмом управления.

Из (9) и (10) получено выражение для определения минимальной индуктивности дросселя $L1$, при которой обеспечивается условие непревышения заданного уровня максимальной пульсации входного тока:

$$L1_{A(n=2)} = \frac{U_{outsum}}{32 \cdot f_c A(n=2) \cdot I_{m(max) L1 A(n=2)_1,2}}. \quad (11)$$

Многоуровневая силовая схема

Многоуровневые силовые схемы имеют N силовых входных блоков. При этом выявлено, что при использовании в П многоуровневой силовой схемы диапазоны изменения γ для каждого k -го режима работы определяются неравенством:

$$\frac{k-1}{N} < \gamma \leq \frac{k}{N}, \quad (12)$$

где $k = 1$ – соответствует синхронному алгоритму управления;

$k = 1, 2, \dots, N$ – соответствует асинхронному алгоритму управления.

В обобщенном виде в зависимости от величины входного напряжения выведены выражения для расчета амплитуды пульсаций входного потребляемого тока:

$$I_{m L1 S, A(n=N)_k}(U_{in}) = (N \cdot U_{in} - (N-k) \cdot U_{outsum}) \cdot \frac{N \cdot \gamma - (k-1)}{2 \cdot N^2 \cdot f_c \cdot L1} \text{ при } N \cdot U_{in} > (N-k) \cdot U_{outsum}; \quad (13)$$

$$I_{m L1 S, A(n=N)_k}(U_{in}) = (N-k) \cdot U_{outsum} - N \cdot U_{in} \cdot \frac{k - N \cdot \gamma}{2 \cdot N^2 \cdot f_c \cdot L1} \text{ при } (N-k) \cdot U_{outsum} > N \cdot U_{in}. \quad (14)$$

Анализ полученных выражений показывает, что все многоуровневые силовые схемы с синхронным алгоритмом управления имеют одинаковые зависимости амплитуды пульсаций входного потребляемого тока от входного напряжения. При этом амплитуда пульсаций входного тока в зависимости от входного напряжения имеет один максимум в точке $U_{in} = \frac{1}{2} U_{outsum}$ и принимает нулевые значения в точках $U_{in} = 0$ и $U_{in} = U_{outsum}$.

В многоуровневых силовых схемах с асинхронным алгоритмом управления зависимость амплитуды пульсации входного потребляемого тока от входного напряжения представляет собой параболическую циклоиду, которая имеет N максимальных значений. При этом амплитуда пульсаций входного потребляемого тока принимает максимальные значения при входном напряжении, равном:

$$U_{in}(I_{m(max) L1 A(n=N)_k}) = \frac{2 \cdot N - (2 \cdot k - 1)}{2 \cdot N} \cdot U_{outsum}. \quad (15)$$

В то же время амплитуда пульсаций входного потребляемого тока имеет нулевое значение при входном напряжении:

$$U_{in} = 0; \\ U_{in}(I_{m(min) L1 A(n=N)_k}) = \frac{k}{N} \cdot U_{outsum}. \quad (16)$$

В обобщенном виде максимальное значение амплитуды пульсаций входного тока в силовых схемах с синхронным алгоритмом управления определяется из выражения:

$$I_{m(max) L1 S(n=N)} = \frac{1}{8} \cdot \frac{U_{outsum}}{f_c \cdot L1}, \quad (17)$$

а в силовых схемах с асинхронным алгоритмом управления из выражения:

$$I_{m(max) L1 A(n=N)} = \frac{1}{8 \cdot N^2} \cdot \frac{U_{outsum}}{f_c \cdot L1}. \quad (18)$$

При этом минимальная индуктивность дросселя $L1$, при которой обеспечивается условие непревышения заданного уровня максимальной пульсации входного потребляемого тока, для силовых схем с синхронным алгоритмом управления вычисляется из выражения:

$$L1_{S(n=N)} = \frac{1}{8} \cdot \frac{U_{outsum}}{f_c S(n=N) \cdot I_{m(max) L1 S(n=N)}}, \quad (19)$$

а для силовых схем с асинхронным алгоритмом управления из выражения:

$$L1_{A(n=N)} = \frac{1}{8 \cdot N^2} \cdot \frac{U_{outsum}}{f_c A(n=N) \cdot I_{m(max) L1 A(n=N)}}. \quad (20)$$

Как видно из (17)–(20), при равных условиях многоуровневые силовые схемы с асинхронным алгоритмом управления имеют в N^2 раз меньше амплитуду пульсаций входного потребляемого тока и соответственно в N^2 раз меньше требуемое минимальное значение индуктивности дросселя $L1$ входного фильтра по сравнению с соответствующими по количеству входных блоков силовыми схемами с синхронным алгоритмом управления.

Следует отметить, что частоту коммутации силовых транзисторов входных блоков для всех вышеописанных случаев на предварительном этапе проектирования следует выбирать исходя из допустимых динамических потерь в силовых ключевых приборах [3, 4] с использованием следующего выражения:

$$f_c = \frac{P_{VT}}{\left(\frac{E_{onVT} \cdot I_{onVT} \cdot U_{onVT}}{I_{Cn} \cdot V_{CEonVT}} + \frac{E_{offVT} \cdot I_{offVT} \cdot U_{offVT}}{I_{Cn} \cdot V_{CEoffVT}} \right)}, \quad (21)$$

где P_{VT} – допустимая мощность динамических потерь в силовом транзисторе, определяемая параметрами системы охлаждения силового входного блока;

E_{onVT} и E_{offVT} – справочные величины энергии потерь, которые выделяются при коммутациях в замкнутое и разомкнутое состояние силового транзистора при значениях I_{CnVT} и V_{CEnVT} ;

I_{onVT} и I_{offVT} – значение тока, протекающего через силовой транзистор, во время коммутации в замкнутое и разомкнутое состояние соответственно;

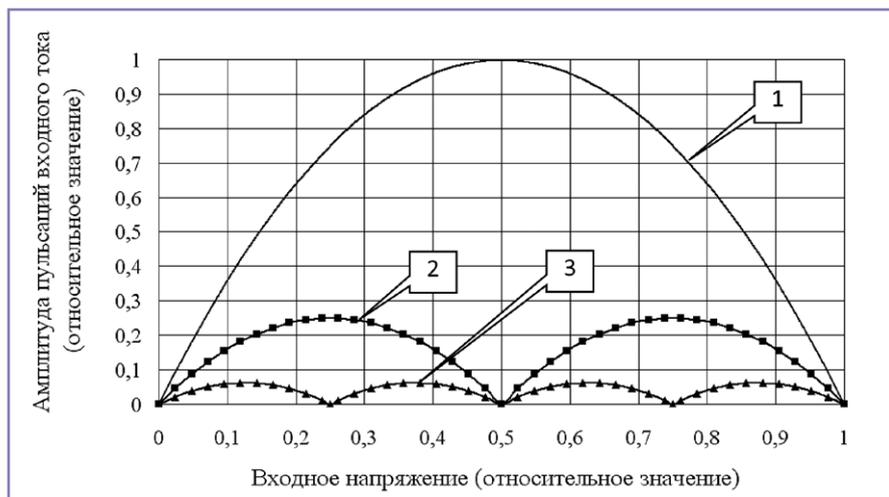


Рис. 5. Зависимость относительного значения амплитуды пульсаций входного тока от входного напряжения устройства

U_{onVT} и U_{offVT} – значение напряжения, которое прикладывается к переходу коллектор-эмиттер силового транзистора, во время коммутации в замкнутое и разомкнутое состояние.

На рис. 5 построены зависимости амплитуды пульсаций входного потребляемого тока относительно выбранной базисной одноуровневой силовой схемы с синхронным алгоритмом управления, где кривая 1 соответствует одноуровневой и многоуровневой силовым схемам с синхронным алгоритмом управления; кривая 2 характеризует двухуровневую ($N = 2$) силовую схему с асинхронным алгоритмом управления; кривая 3 соответствует четырехуровневой ($N = 4$) силовой схеме с асинхронным алгоритмом управления.

Построенные кривые явно показывают преимущество многоуровневых силовых схем с асинхронным алгоритмом управления перед другими силовыми схемами в части снижения амплитуды пульсаций входного потребляемого тока и уменьшения габаритных размеров и массы дросселя $L1$ входного фильтра ВП.

Таким образом, с повышением количества входных блоков ВП и применением асинхронного алгоритма управления амплитуда пульсаций входного потребляемого тока, требуемая индуктивность дросселя входного фильтра снижаются в квадратичной зависимости.

Выводы

Получены обобщенные выражения для расчета минимальной индуктивности дросселя входного фильтра ВП в зависимости от выходного напряжения, допустимой амплитуды пульсации входного

потребляемого тока, количества последовательно соединенных силовых входных блоков и алгоритма управления.

Показано преимущество применения асинхронного алгоритма управления силовыми транзисторами входных блоков ВП по сравнению с синхронным алгоритмом управления. Так, с повышением количества входных блоков ВП и применением асинхронного алгоритма управления амплитуда пульсаций входного потребляемого тока, требуемая индуктивность дросселя входного фильтра снижаются в квадратичной зависимости от количества входных силовых блоков.

Полученные расчетные выражения дают возможность разработчикам проектировать ВП с меньшей массой и габаритами, а также с улучшенными экономическими показателями за счет применения дросселя входного фильтра с меньшей индуктивностью, при учете современных коммутационных характеристик силовых полупроводниковых приборов.

Литература

1. ГОСТ32144–2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
2. ГОСТ33436.3-1-2015 Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Требования и методы испытаний.
3. Милешин В.И., Жикленков Д. Трехуровневый повышающий преобразователь напряжения / Силовая электроника, 2015, № 53, т. 2, с. 59–65.
4. Skorokhod Y., Philin D., Volskiy S. Analysis of high-voltage converters with serial connection units and with Input current correction/ 21st International scientific conference on

Electric power engineering (EPE), Prague, 2020 pp. 133–137.

5. Volskiy S., Skorokhod Y. The analysis and simulation of power circuits for AC high voltage converter/Conference proceedings PEDS-07, Banking, Thailand, 2007, pp. 1741–1747.

6. Скороход Ю.Ю., Вольский С.И. Анализ бортовых высоковольтных преобразователей однофазного переменного тока с повышенным коэффициентом мощности/ Электричество, 2020, № 10, с. 44–51.

7. Зиновьев Г.С. Силовая электроника: Учебник.– Юрайт, 2012. – 671 с.

8. Попков О.З. Основы преобразовательной техники.– МЭИ, 2010. – 200 с.

9. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника.– Техносфера, 2005.– 632 с.

10. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника. – Корона принт, 2010. – 632 с.

Вольский Сергей Иосифович

Родился в 1961 году. В 1984 году окончил факультет «Системы автоматического управления приборостроения и электроэнергетики летательных аппаратов» Московского авиационного института. Доктор технических наук, профессор. В 2002 году защитил докторскую диссертацию по преобразовательной технике и электротехническим комплексам. Опыт работы – 41 год. В настоящее время работает профессором кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Московского авиационного института. Имеет более 100 статей и более 20 патентов РФ.

Скороход Юрий Юрьевич

Родился в 1976 году. В 2000 году окончил факультет «Электронная техника» Московского энергетического института. Опыт работы – 21 год. В настоящее время работает начальником конструкторского бюро ООО «Трансконвертер». Имеет 11 статей и 3 патента РФ.

Volsky Sergey

Was born in 1961. In 1984 he graduated from the Faculty of automatic control systems for instrument making and aircraft power engineering of the Moscow Aviation Institute. Doctor of technical sciences, professor. In 2002 he defended his doctoral dissertation on converter technology and electrical engineering complexes. Work experience is 41 years. At present he works as a professor at the Department of electrical power, electromechanical and biotechnical systems of the Moscow Aviation Institute. He has more than 100 articles and more than 20 patents of the Russian Federation.

Skorokhod Yuri

Was born in 1976. In 2000 he graduated from the Faculty of electronic engineering of the Moscow Power Engineering Institute. Work experience is 21 years. At present he works as the head of the design bureau of "Transconverter" LLC. He has 11 articles and 3 patents of the Russian Federation.

Формирование алгоритма совместного расчета систем тягового и внешнего электроснабжения

// Formation of an integrated calculation of traction power supply systems and external power supply systems //

**Герман Л. А., д.т.н., профессор,
Филиал СамГУПС, Нижний Новгород**

В основу разработанной программы совместного расчета систем тягового и внешнего электроснабжения приняты два важных положения теории больших систем электроснабжения: тензорный анализ систем и метод диакоптики. В результате получены компактные выражения расчета уравнивающего тока и затем определены все параметры расчетного режима. Представленная лучевая схема замещения электрифицированного участка является итогом разработки. Заслуга автора в том, что разработана программа расчета системы тягового электроснабжения с учетом влияния режима системы внешнего электроснабжения, которая может быть использована в учебных целях, а также в проектной практике и научно-исследовательских работах. Программа ПАСТ-05К предназначена для расчета мгновенных схем, расчета токов короткого замыкания во всех элементах заданной сети. Программа подкупает простотой ввода исходных данных, их корректировки при изменении расчетного режима, а выход информации формируется в виде матрицы сопротивлений расчетной схемы замещения, графика напряжений узлов, матрицы токов в тяговой сети и потерь мощности в элементах схемы.
Ключевые слова: программа расчета, тензорный анализ, диакоптика, лучевая схема, схема замещения, мгновенная схема, матрица сопротивлений, токи и напряжения узлов.

Матричные методы совместного расчета систем тягового и внешнего электроснабжения

Необходимость совместного расчета систем тягового (СТЭ) и внешнего (СВЭ) электроснабжения при анализе режима тяговой сети железных дорог диктуется существенным влиянием режима работы сетей внешнего электроснабжения на

The program for traction and external power supply systems calculations is based on two main principles of large power supply systems theory: tensor analysis and diakoptics. In the issuance the compact formulas for balancing current calculations were received, then were defined all parameters of design conditions. The development result is the «beam» equivalent of electrified district. The merit of the author is that the program for calculation of the traction power supply system was developed with account taken of external power supply system mode. It may be used for educational purposes as well as in design practice and research work. The program ПАСТ-05К designed to calculate instant circuits, short-circuit currents in all elements of the network. The advantages of the program are the simplicity of inputting initial data and correcting them when changing the design mode. The information output is formed in the form of a resistance matrix of the calculated equivalent circuit, the graph of node voltages, the matrix of currents in the traction network and power losses in the circuit elements.

Keywords: program for calculation, tensor analysis, diakoptics, «beam» equivalent, equivalent, instant circuit, resistance matrix, node currents and voltages.

параметры режима тяговых сетей. Действительно, режим напряжения в тяговой сети зависит от параметров режима СВЭ. Изменение параметров режима СВЭ (отключение ЛЭП, изменение коэффициентов трансформации районных трансформаторов (автотрансформаторов), отключение конденсаторных батарей и т.д.) приводит к существенному изменению, например,

перетоков мощности по тяговой сети. Только взаимосвязанные расчеты, учитывающие режимы СВЭ и СТЭ, дают достоверные результаты расчета, и в частности параметров установок продольной и поперечной емкостной компенсации, а также регулирующих устройств в тяговой сети. Следует указать на большую погрешность традиционных расчетов СТЭ при упрощенном представлении СВЭ, которая может достигать при определении потерь напряжений, потерь мощности и уравнивающих токов соответственно 13...17%, 30...50%, 100...200% и более.

Сложность совместного расчета трехфазных сетей энергосистемы с однофазными тяговыми сетями определяется необходимостью совместить в единой математической модели условно симметричные и несимметричные сети. Трудность расчета усугубляется наличием в системе тягового электроснабжения несимметрии, как поперечной (несимметричные тяговые нагрузки, несимметричные установки продольной и поперечной емкостной компенсации и т.д.), так и продольной (несимметричные установки продольной емкостной компенсации, тяговые сети левого и правого плеча и т.д., а также трансформаторы со схемой соединения «звезда – треугольник», «звезда с нулем – треугольник»), которые разделяют электрическую сеть на две части: с заземленной и изолированной нейтралью. Важно отметить, что существующие методы расчета тягового электроснабжения переменного тока ориентированы в большинстве случаев на питание тяговой сети от трансформатора со схемой соединения Y/Δ . Поэтому при совместном расчете систем СТЭ и СВЭ сделана попытка привести все расчеты к схемам замещения всех элементов «звезда – звезда», что характерно для существующих расчетов в энергосистемах.

Применение фазных координат при рассмотрении несимметричных режимов известно, например, в работах [1–3]. Использование фазных координат

применительно к системе тягового электроснабжения применялось в работах [4–5]. Предлагаемый метод совместного расчета СТЭ и СВЭ с использованием фазных координат в мгновенных схемах решает в настоящее время все практически важные режимные задачи тягового электроснабжения. С использованием этого метода разработана программа РАСТ-05K [6], ее отличительные особенности – сравнительная простота освоения и применения, простота ввода исходных данных.

В указанном методе [6] выделены два основных расчетных блока:

- блок с тензорным методом расчета обеспечил представление всей системы расчета тягового и внешнего электроснабжения в единую систему электроснабжения по схеме «звезда – звезда» [7];
- матрично-топологический метод расчета системы тягового электроснабжения с конденсаторными установками совместно с системой внешнего электроснабжения базируется на идеях диакоптики [8], когда сложные системы исследуются по частям, а их взаимная связь устанавливается уравнениями для граничных узлов или ветвей.

Тензорный метод расчета

Необходимость применения этого метода в совместном расчете систем СТЭ и СВЭ определяется задачей преобразовать схему замещения тяговой сети с линейными токами и напряжениями в схеме «треугольник» в систему с фазными токами и напряжениями в схеме «звезда», что позволяет совместить расчеты в указанных системах.

Задачу преобразования можно решить двояко:

- путем определения тягового тока в каждой фазе трансформатора Y/Δ и в дальнейшем оперировать этим током как новой координатой, а схему трансформатора представить в соединении «звезда», как сделано, например, в учебнике [9];
- путем подачи на трансформатор тяговых токов в схеме соединения «звезда», но схему трансформатора следует преобразовать определенным способом.

Совершенно ясно, что в обоих вариантах полученные эквивалентные схемы замещения должны по потерям напряжения и потерям мощности соответствовать исходным схемам.

Далее будем ориентироваться на второй способ преобразования и для него рассмотрим тензорный метод анализа сети,

разработанный Г. Кроном [7], который базируется на «постулатах первого и второго обобщения», выражающихся в следующем:

1. «Прежде чем исследовать любую сложную систему со многими переменными, необходимо сначала выполнить анализ простой системы с одной (или более) степенью свободы. После этого можно перенести все этапы анализа на сложную систему, заменяя каждую величину соответствующей ей N -матрицей».

2. При необходимости преобразований схемы (например, при переходе от одного способа соединений к другому) «... N -матрицы новой системы могут быть найдены из N -матрицы старой системы с помощью рутинного преобразования... Новая система описывается тем же числом N -матриц и того же типа, что и старая система, но отличается от нее численным значением компонент N -матриц; уравнение новой системы, записанное в N -матрицах, имеет тот же вид, что и уравнения старой системы». О применении тензорного анализа при решении инженерных задач образно сказано Г. Кроном: «Использование тензорного анализа в решении инженерных задач можно сравнить с использованием стального каркаса при возведении небоскребов... Один и тот же стальной каркас можно использовать для изготовления самых разнообразных зданий, изменяя кирпичную кладку и располагая перегородки в соответствии с требованиями и нуждами различных потребителей».

Применительно к проблеме расчетов несимметричных сетей вышесказанное означает, что электрическое состояние несимметричных сетей должно описываться

обычными уравнениями, известными из теории электрических сетей (то есть здесь используется «стальной каркас»). Однако под каждым символом указанного уравнения следует подразумевать некий геометрический объект (то есть «кирпичную кладку») с p -мерной матрицей (точнее, с трехмерной матрицей, соответствующей трехфазной системе координат), называемой в соответствии с [7] тензором.

Первоначальные попытки применения теории тензорного анализа для совместного расчета сетей внешнего электроснабжения с тяговыми сетями показали, что сделать это сложно из-за несовместимости общепринятых методов расчета трехфазных систем (в координатах фазных напряжений) и однофазных тяговых сетей (в координатах линейных напряжений). Таким образом, задача применения тензорного анализа сетей для рассматриваемой проблемы состоит в том, чтобы определить тензор преобразования, с помощью которого на основании известных формул преобразования [7] формируются соответствующие тензоры. Для рассматриваемой задачи необходимо найти тензоры сопротивления трансформатора, питающей сети и т.д. при совместном рассмотрении систем внешнего и тягового электроснабжения при схеме соединения тяговых нагрузок в «звезду».

На тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог переменного тока, где установлены трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда – треугольник», в расчетах используют токи I_A, I_B, I_C и напряжения U_A, U_B, U_C в соединении по схеме «треугольник» (рис. 1а). От этих координатных осей (назовем их

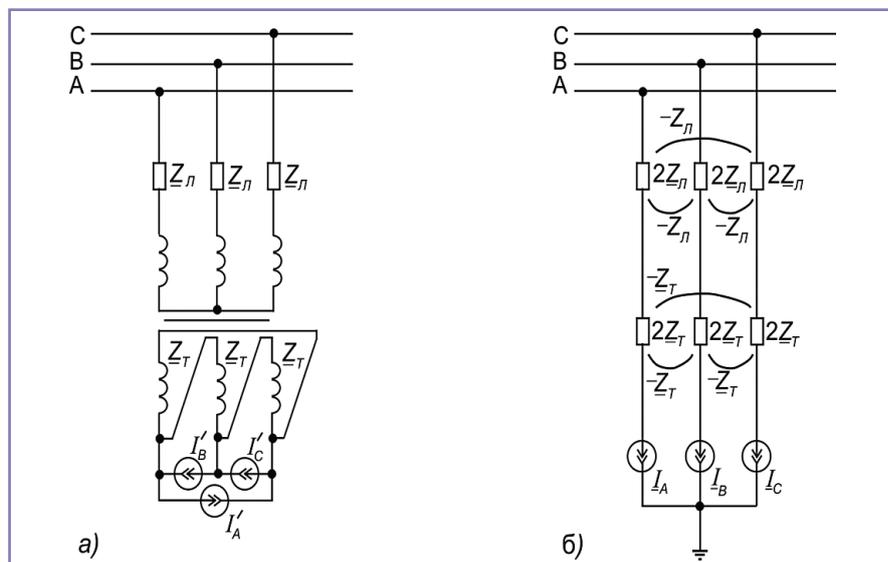


Рис. 1. Схемы замещения тяговой подстанции

в соответствии с [7] старыми осями) следует перейти к новым координатным осям, применяемым в расчетах трехфазных симметричных сетей (фазные токи и напряжения в соединении по схеме «звезда»). Другими словами, вводится так называемый тензор преобразования тока [7], который определяется из соотношений токов в новых и старых координатах (далее все расчетные значения – комплексные числа), и тензор преобразования сопротивления.

Тензор преобразования токов представляет некоторую матрицу преобразования трехфазной системы токов нагрузки тяговой обмотки трансформатора I'_A, I'_B, I'_C (в старых координатах) в «звезду» токов нагрузки I_A, I_B, I_C (в новых координатах). И так, в старой системе координат при соединении тягового трансформатора по схеме Y/Δ к тяговой обмотке подключается система токов I'_A, I'_B, I'_C (рис. 1а), а в новой системе координат при соединении тягового трансформатора по схеме Y/Y к тяговой обмотке подключается трехфазная система тяговых токов I_A, I_B, I_C , соединенных в «звезду» (рис. 1б). В схеме тяговой подстанции с трансформатором Y/Δ (рис. 1а) тяговые токи I'_A, I'_B, I'_C поступают в узлы ввода тяговой обмотки «треугольник» разностными парами, то есть соотношение токов в старых и новых координатах, поступающих к вводу тяговой обмотки трансформатора, будет соответствовать:

$$\begin{bmatrix} I'_A \\ I'_B \\ I'_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_A + 0 - I_C \\ -I_A + I_B + 0 \\ 0 - I_B + I_C \end{bmatrix}. \quad (1)$$

На рис. 2 показаны эти токи.

Тогда тензор преобразования указанного соотношения токов определяется из выражения:

$$\begin{bmatrix} I'_A \\ I'_B \\ I'_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}, \quad (2)$$

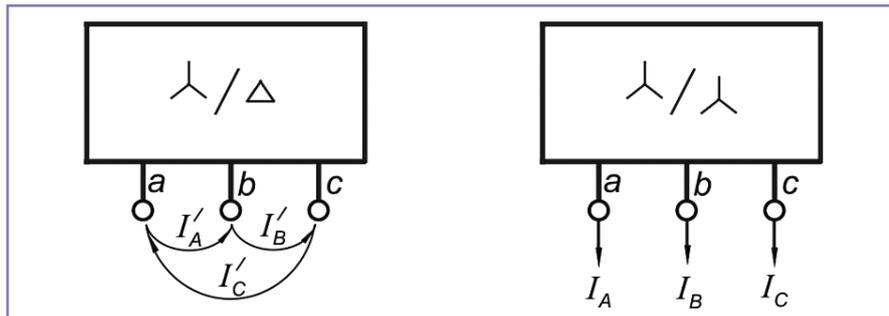


Рис. 2. Подключение тяговой нагрузки к трансформатору

где токи I'_A, I'_B, I'_C представлены в старых координатных осях, а токи I_A, I_B, I_C – в новых координатных осях.

В (2) тензор преобразования тока равен:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Далее, на основании (3) и основного положения тензорного анализа [7] тензор преобразования сопротивления элемента сети равен

$$Z_Y = c_t Z_{\Delta}^{ct} c, \quad (4)$$

где Z_Y и Z_{Δ}^{ct} – тензоры сопротивления в новых (трансформатор по схеме «звезда – звезда» с системой преобразованных тяговых токов по схеме «звезда») и старых (трансформатор по схеме «звезда – треугольник») координатных осях, c_t – транспонированный тензор преобразований. Сопротивление трансформатора в старых осях по схеме Y/Δ (так же, как и для схемы Y/Y) представлено диагональной матрицей с элементами Z_T :

$$Z_{\Delta}^{ct} = \begin{bmatrix} Z_T & & \\ & Z_T & \\ & & Z_T \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Далее определим матрицу сопротивлений питающих линий ВЛ-110 (220) кВ тяговых подстанций. Здесь считаем, что при соединении тягового трансформатора Y/Δ питающая линия 110 (220) кВ работает в схеме соединения «треугольник». Действительно, при расчете трансформатора совместно с питающей линией для расчета параметров на стороне тяговой обмотки обычно сопротивление трансформатора совмещают с сопротивлением линии, а так как сопротивление трансформатора приводят к вторичной обмотке, то есть к «треугольнику», то и линию приводят к соединению «треугольник». В частности, для трехфазной линии 110 (220) кВ тяговой подстанции по ее схеме соединения обмоток трансформатора Y/Δ тензор сопротивления $Z_{л\Delta}$ (это диагональная

матрица сопротивлений фаз $Z_{л}$ линии). Тогда тензор сопротивления трехфазной линии с учетом (4) равен:

$$Z_{лY} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{л} & & \\ & Z_{л} & \\ & & Z_{л} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2Z_{л} & -Z_{л} & -Z_{л} \\ -Z_{л} & 2Z_{л} & -Z_{л} \\ -Z_{л} & -Z_{л} & 2Z_{л} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Преобразования от старых к новым координатным осям можно получить и следующим способом, определяя, например, потерю напряжения в существующей схеме электроснабжения тяговой сети как

$$\Delta U = \begin{bmatrix} \Delta U_A \\ \Delta U_B \\ \Delta U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (2I_A - I_B - I_C) Z_{л} \\ (-I_A + 2I_B - I_C) Z_{л} \\ (-I_A - I_B + 2I_C) Z_{л} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2I_A Z_{л} - I_B Z_{л} - I_C Z_{л} \\ -I_A Z_{л} + 2I_B Z_{л} - I_C Z_{л} \\ -I_A Z_{л} - I_B Z_{л} + 2I_C Z_{л} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2Z_{л} - Z_{л} - Z_{л} \\ -Z_{л} + 2Z_{л} - Z_{л} \\ -Z_{л} - Z_{л} + 2Z_{л} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $Z_{л}$ – сопротивление фазы участка линии.

В (7) видно, что здесь участвует такой же тензор сопротивления трехфазной линии, как и полученный в (6). Точно так же можно получить тензор преобразования сопротивления трансформатора, он получится точно такой же (6). Тензор сопротивления (6) применим для всех трехфазных элементов системы тягового электроснабжения. Таким образом, при переходе на новые координатные оси в системе тягового электроснабжения переменного тока следует:

1. С использованием тензора преобразования рассчитать тензоры сопротивлений трехфазных элементов.

2. Тяговые токи представить в схеме соединения «звезда» и учесть тензоры сопротивления всех элементов схемы.

В результате в схеме замещения с новыми координатными осями тяговые нагрузки будут представлены в схеме «звезда», а сопротивления трансформаторов, участков линий СВЭ и всех остальных элементов СВЭ будут представлены с учетом тензора сопротивления (6).

Теперь отметим важное замечание по расчету сопротивления трансформатора и всех элементов сети. Как было указано, при выводе формул (5), (6) и (7) учитывались трансформатор с тяговой обмоткой «треугольник» и сопротивление линии в схеме «треугольник». Поэтому в новой системе координат следует подставлять сопротивления в схеме «звезда», то есть сопротивления линии и трансформатора

рассчитываются для схемы «звезда», что и указывается в ГОСТ Р 52735–2007.

Лучевая схема замещения электрифицированного участка

Рассмотрим схему замещения электрифицированного участка с несколькими тяговыми подстанциями. Достаточно часто при рассмотрении режима тяговой сети нет необходимости в подробном рассмотрении схемы внешнего электропитания (СВЭ). В этом случае СВЭ представляют многополюсником. Обобщенное уравнение состояния многополюсника в Z-форме можно представить в виде новых координатных осей [10, 11]:

$$U_{3N} = E_{3N} - Z_{3N} I_{3N} \tag{8}$$

где E_{3N} – матрица активных параметров многополюсника (матрица ЭДС);

Z_{3N} – квадратная матрица пассивных параметров многополюсника (размерность $3N \times 3N$, N – число трехфазных узлов);

I_{3N} – вектор узловых токов на границе многополюсника;

N – число трехфазных узлов.

Матрица Z_{3N} формируется из исходной матрицы Z_N (размерность $N \times N$) условно симметричных сетей в старых координатах охватывающей сети, относящейся к электрифицированному участку, и равна:

$$Z_N = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \dots & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & & & & \\ Z_{31} & & & & & \\ \dots & & & & & \\ \dots & & & & & \\ Z_{N1} & \dots & \dots & \dots & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \tag{9}$$

В матрице (9) указаны собственные сопротивления $Z_{11}, Z_{22}, Z_{33}, Z_{NN}$ и взаимные $Z_{12}, Z_{21}, Z_{ij}, Z_{iN}$ и т.д. Преобразуем матрицу

(9) для новых координатных осей с введением тензоров сопротивлений:

собственных узлов

$$[Z_{ii}]_3 = \begin{bmatrix} 2Z_{ii} & -Z_{ii} & -Z_{ii} \\ -Z_{ii} & 2Z_{ii} & -Z_{ii} \\ -Z_{ii} & -Z_{ii} & 2Z_{ii} \end{bmatrix}; \tag{10}$$

взаимных узлов

$$[Z_{ij}]_3 = \begin{bmatrix} 2Z_{ij} & -Z_{ij} & -Z_{ij} \\ -Z_{ij} & 2Z_{ij} & -Z_{ij} \\ -Z_{ij} & -Z_{ij} & 2Z_{ij} \end{bmatrix}. \tag{11}$$

Индекс 3 (три) во всех элементах тензоров сопротивления указывает на их размерность 3×3 . Здесь тензоры $[Z_{ii}]_3$ и $[Z_{ij}]_3$ представляют трехфазные элементы сопротивлений в фазах А, В, С. В процессе преобразования каждый элемент в (9) заменяется на тензор (10) или (11).

Вектор узловых токов размерностью $3N$ имеет вид:

$$I_{3N} = \begin{bmatrix} [I_1]_3 \\ [I_2]_3 \\ [I_3]_3 \\ \vdots \\ [I_i]_3 \\ \vdots \\ [I_N]_3 \end{bmatrix}, \tag{12}$$

где, например,

$$[I_i]_3 = \begin{bmatrix} I_{iA} \\ I_{iB} \\ I_{iC} \end{bmatrix}. \tag{13}$$

Аналогично формируются вектор-матрицы U_{3N} и E_{3N} .

На основании (9) – (13) можно представить схему многополюсника, состоящего из лучей, число которых равно числу его граничных узлов (подузлов). Такую схему

замещения, состоящую из лучей с обобщенными параметрами исходной схемы, будем называть лучевой (рис. 3). Тяговая сеть подключается между смежными подстанциями одной или несколькими ветвями в зависимости от рассматриваемой задачи расчета.

Лучевая схема замещения характеризуется следующими особенностями.

1. Каждая тяговая подстанция представлена тремя лучами с сопротивлениями фаз А, В, С. Матрица собственных сопротивлений $[Z_{ii}]_3$ имеет вид (1.20). В каждый луч включена ЭДС холостого хода соответствующей фазы, схема включения ЭДС – «звезда». С учетом изменения коэффициента трансформации трансформаторов $[E] = [k]^n [E_0]$, где $[E_0]$ – матрица ЭДС источника питания.

2. Сопротивления лучей подстанции имеют между собой взаимные связи. Матрица взаимных сопротивлений $[Z_{jj}]_3$ между подстанциями i, j имеет вид (12).

3. Однофазная тяговая нагрузка подключается к соответствующим одноименным фазам смежных подстанций (в зависимости от ее фазировки) одной или несколькими ветвями.

4. Главное в схеме замещения – токи тяговой и районной нагрузок соединены в «звезду», нулевая точка которой подсоединена к балансирующему узлу БУ проводником с нулевым сопротивлением.

Учет в схеме замещения установок поперечной емкостной компенсации, емкостной проводимости ВЛ и тока намагничивания и потерь в стали трансформатора в зависимости от цели и метода расчета может быть осуществлен путем включения в схему замещения поперечных проводимостей или соответствующих задающих токов. Обычно по опыту расчетов сетей в энергосистемах емкостная

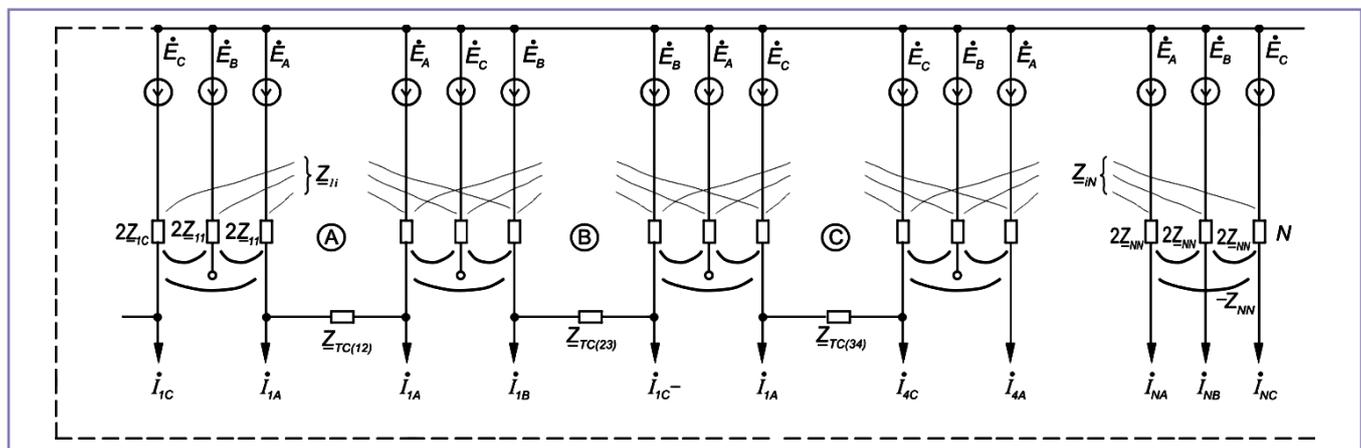


Рис. 3. Лучевая схема замещения

проводимость ЛЭП представляется в схемах замещения симметричной трехфазной реактивной проводимостью jB , подключенной в соответствующем узле ко всем фазам ЛЭП, а также к нулевому проводу (базисному узлу). Токи намагничивания и потери в стали тяговых трансформаторов учитываются либо трехфазными симметричными проводимостями ($G-jB$), либо трехфазной симметричной системой задающих токов (рис. 2). Расчет проводимостей и токов дается, например, в [11]. Указанные проводимости ЛЭП и трансформаторов целесообразно предварительно учесть при расчете матрицы узловых сопротивлений системы внешнего электроснабжения.

Таким образом, матрица узловых сопротивлений в схеме замещения определяется в следующем порядке. Во-первых, известными методами, например, путем наращивания ветвей или обращения матрицы узловых проводимостей и т.д., определяется матрица узловых сопротивлений размерностью $N \times N$, где N – число узлов для схемы прямой последовательности системы внешнего электроснабжения. При этом учитываются поперечные проводимости ЛЭП и трансформаторов. Во-вторых, формируется матрица узловых сопротивлений $[Z]_{3N}$ размерностью $3N \times 3N$ вида (10) и (11) для схемы замещения.

Указанные в лучевых схемах узловые сопротивления в лучах в дальнейшем могут представляться как фиктивные натуральные параметры схемы замещения. Установки поперечной емкостной компенсации (КУ) учитываются или проводимостями, или задающими токами. Особенность КУ в тяговой сети – несимметричное их исполнение, поэтому они представляются однофазными проводимостями или однофазными задающими токами. Несимметричные установки продольной емкостной компенсации вместе с отсасывающими и питающими фидерами в схеме замещения целесообразно выделить в отдельные многополюсники.

Матрица узловых сопротивлений определяется известными способами, например, путем наращивания ветвей или обращения матрицы узловых проводимостей [11]. Сначала формируется матрица размерностью $N \times N$ (где N – число узлов схемы сопротивления прямой последовательности СВЭ), а затем размерностью $3N \times 3N$. Формирование тяговых сетей выполняется по нормативным документам [12].

Формирование уравнения состояния электрической сети при совместном рассмотрении систем СТЭ и СВЭ

Предлагается следующий план формирования указанного уравнения. Определяется падение напряжения на условной границе симметричных трехфазных сетей энергосистемы и несимметричных сетей тягового электроснабжения. Пограничную границу принимаем зажимами тяговых трансформаторов по вводам тяговой обмотки. Падения напряжения на указанных зажимах определяем со стороны СВЭ и со стороны СТЭ. Приравнявая эти падения напряжения, получаем искомое уравнение. Так реализуется метод диакоптики, когда сложные системы исследуются по частям, а их взаимная связь устанавливается уравнениями для граничных узлов или ветвей. Впервые для тяговых сетей это было сделано в [13], однако в статье показан способ использования матричных методов расчета для реализации метода диакоптики в любых схемах тягового электроснабжения с учетом несимметричных сетей.

Далее рассмотрим схему тяговой сети с разнесенными токами между смежными тяговыми подстанциями. Тогда вектор задающих токов для тягового трансформатора будет иметь вид:

$$I^* = I + M I_y, \quad (14)$$

где I^* и I – векторы задающих токов тяговой сети с уравнительным током и без него, размерности столбцовых матриц: I^* и I – $3N \times 1$, M – $3N \times n_y$, I_y – $n_y \times 1$.

В указанном случае при разнесении тяговых токов по узлам подстанций в тяговой сети будет протекать только уравнительный ток I_y . Напряжение на вводе тяговой обмотки равно:

$$U = k^l E_0 - Z_{oY} (I + M I_y), \quad (15)$$

где k^l – диагональная матрица коэффициентов трансформации тяговых трансформаторов, размерность $3N \times 3N$; E_0 – столбцовая матрица ЭДС источников питания, размерность $3N \times 1$; Z_{oY} – матрица сопротивлений преобразованной системы СВЭ со схемой соединения тягового трансформатора Y/Y при отключенной тяговой сети, размерность $3N \times 3N$.

Далее введем матрицу инцидентий M (размерность $3N \times n_y$, где N – число трехфазных узлов, n_y – число ветвей тяговой сети), которая показывает узлы шин 27,5 кВ с подключенной к ним тяговой сетью, то есть узлы с наличием уравнительного тока, и поэтому узел, от которого

выходит уравнительный ток, обозначается как «1», а узел, куда входит уравнительный ток, обозначается «-1». Особенность введенной матрицы соединения ветвей тяговой сети состоит в том, что, во-первых, она отражает в методе диакоптики топологию подсоединения подсхемы (подграфа) с тяговой сетью к подсхеме (подграфу) системы внешнего электроснабжения. Во-вторых, она отражает так называемую фазировку подключения однофазной тяговой сети к тяговым подстанциям. По существу, указанная матрица M характеризует подграф лучевой схемы замещения, состоящий из хорд-ветвей тяговой сети (обычно она является подматрицей первой матрицы инцидентий и обозначается, в частности, M_b [11]). Число столбцов в матрице M соответствует числу ветвей тяговой сети n_y . Применение матрицы соединений M позволило разработать матрично-топологический метод расчета с использованием комплексных матричных выражений для совместного расчета СТЭ и СВЭ. С использованием введенной матрицы соединений M напряжение между вводами тяговых обмоток трансформаторов смежных подстанций (то есть напряжение ветвей тяговой сети) равно:

$$U_B = M^T [k^l E_0 - Z_{oY} (I + M I_y)]. \quad (16)$$

Но эту же разность напряжений можно получить, рассматривая уравнительный ток в тяговой сети:

$$U_B = Z_{TC}^l I_y. \quad (17)$$

Здесь Z_{TC}^l – диагональная матрица сопротивлений тяговой сети. На основании (16) и (17) получим основное уравнение, используемое для совместных расчетов систем тягового и внешнего электроснабжения:

$$U_B = M^T [k^l E_0 - Z_{oY} (I + M I_y)] = Z_{TC}^l I_y. \quad (18)$$

Из (18) получим значение уравнительного тока:

$$I_y = (M^T Z_{oY} M + Z_{TC}^l)^{-1} M^T (k^l E_0 - Z_{oY} I). \quad (19)$$

Как видно, уравнительный ток определяется напряжением на ветви тяговой сети, зависящей в этой задаче от регуляторов трансформаторов тяговых подстанций (то есть от k^l) и нагрузки тяговой сети, и сопротивлением контура уравнительного тока.

Принципиально, с получением формулы (19) решена задача совместного расчета СТЭ и СВЭ. Зная значение уравнительного тока, можно независимо вести расчеты систем тягового и внешнего электроснабжения.

Выводы

1. Алгоритм совместного матричного расчета СТЭ и СВЭ выполнен на основании теории тензорного анализа и теории диакоптики при расчете сложных сетей энергосистем.

2. Разработанный алгоритм расчета позволил разработать программу РАСТ-05К [6] совместного расчета систем тягового и внешнего электроснабжения, что повысило точность расчета параметров режима тяговых сетей.

Литература

1. Лосев А.Б., Чернин А.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем. – М.: Энергоиздат, 1983. – 528 с.
2. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. – Иркутск: Изд. Иркутск. ун-та, 2005. – 273 с.
3. Берман А.П. Расчет несимметричных режимов электрических систем с использованием фазных координат // Электричество, 1985, № 12, с. 7–12.
4. Герман Л.А. Тензорный метод расчета системы электроснабжения железных дорог // Вестник ВНИИЖТ, 1988, № 2, с. 24–26.
5. Герман Л.А. Схема замещения электрифицированного участка железной дороги пере-

менного тока // Электричество, 1988, № 3, с. 71–75.

6. Герман Л.А. Морозов Д.А. Расчет типовых задач тягового электроснабжения переменного тока на ЭВМ. – М.: МИИТ, 2010. – 60 с.

7. Крон Г. Тензорный анализ сетей. – М.: Советское радио, 1973. – 710 с.

8. Крон Г. Исследование сложных систем по частям – диакоптика. – Наука, 1972. – 544 с.

9. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

10. Мельников Н.А. Матричный метод анализа электрических цепей. – М.: Энергия, 1966. – 216 с.

11. Жуков Л.А., Стратан И.П. Установившийся режим сложных электрических сетей и систем. Методы расчета. – М.: Энергия, 1979. – 416 с.

12. Фигурнов Е.П. Релейная защита. Часть 2. – М.: ГОУ УМЦ, 2009. – 604 с.

13. Марквардт Г.Г., Григорьев Н.П., Демин Н.Г. Расчет уравнивающих токов в тяговой сети // Электричество, 1984, № 10, с. 23–25.

Герман Леонид Абрамович

Родился в 1937 году. В 1959 году окончил Московский институт инженеров транспорта (МИИТ) по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик». За-

щитил 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 390 научных трудов, 100 изобретений и патентов. Имеет 2 правительственные награды.

German Leonid

Was born in 1937. He has graduated Moscow Institute of Transport Engineers by specialty "Engineer routes – electrician" (1959). He has defended the dissertation by the theme "Theory and practice of improving treatment system traction below the AC power plants with capacitive compensation". He is a doctor of technical sciences, professor of the Department of engineering and technology of railway transport branch of the Samara state University of Railways in Nizhny Novgorod. He is a corresponding member of the Academy of Transport of the Russian Federation. Author of more than 350 scientific works, 70 inventions and patents. He has 2 government awards.

Определение токовых нагрузок электромобиля на основе стандартизированного цикла WLTC

// Determination of the electric vehicle current loads based on the WLTC //

**Щуров Н. И., д.т.н., профессор,
Дедов С. И.,
ФГБОУ ВО НГТУ, Новосибирск**

В работе рассмотрен тренд развития современного транспорта с учетом снижения цены на электрохимические накопители энергии. Проведен анализ ранее исследованных факторов, влияющих на срок службы аккумуляторной батареи (АБ). Предположено влияние дополнительного фактора, связанного со спецификой режимов работы тягового электропривода: чередование коротких режимов заряда и разряда при движении электротранспортного средства (ЭТС). Для оценки старения литиевого аккумулятора за основу принят ездовой цикл WLTC, в соответствии с которым формировалась нагрузка на блок накопителей электромобиля. В качестве исследуемого образца принят Nissan Leaf с БН энергоемкостью 24 кВт·ч. Рассчитаны токовые диаграммы для одиночной аккумуляторной ячейки, приведены минимальные, средние и максимальные токи, а также длительности режимов тяги, торможения и остановки в различных режимах управления электроподвижного состава. Получены эквивалентные токовые диаграммы, имитирующие нахождение ТС в каждом режиме управления цикла WLTC.

Ключевые слова: электротранспорт, электрохимические накопители энергии, литиевый аккумулятор, ездовые циклы, рекуперация энергии.

Современные тенденции развития автомобильной индустрии направлены на увеличение выпуска транспортных средств, оснащенных гибридной или полностью электрической энергоустановкой. По данным PwC (PricewaterhouseCoopers) в 2018 году в России реализовано 2,38 тыс. электромобилей, из которых более половины доли рынка приходится на марку Nissan (52%) [1]. Согласно аналитическому прогнозу Международного энергетического агентства (МЭА), в 2019 году парк

*The paper considers the development trend of modern transport taking into account the reduction in the price of electrochemical energy storage. The analysis of the previously investigated factors affecting the service life of the storage battery is carried out. The influence of an additional factor associated with the specificity of the traction electric drive operation modes is assumed – the alternation of short charge and discharge modes when an electric vehicle is moving. To assess the aging of the lithium battery, the WLTC driving cycle was taken as a basis, in accordance with which the load on the storage unit of the electric vehicle was formed. A Nissan Leaf with a power supply unit with an energy consumption of 24 kW·h was taken as a test sample. The current diagrams for a single battery cell are calculated, the minimum, average and maximum currents, as well as the durations of the traction, braking and stopping modes in various control modes of the electric rolling stock are given. Equivalent current diagrams have been obtained that simulate the finding of the vehicle in each mode of the WLTC cycle. **Keywords:** electric transport, electrochemical energy storage, lithium battery, driving cycles, energy recovery.*

электромобилей увеличился на 2,1 млн. и достиг 7,2 млн. Также МЭА рассмотрено два сценария развития рынка до 2030 года: Stated policies scenario (сценарий нынешней политики) и Sustainable development scenario (сценарий устойчивого развития). Согласно первому сценарию, годовые продажи электромобилей достигнут 14 млн. в 2025-м и 25 млн. в 2030 году, а мировой парк составит 140 млн. единиц. Сценарий устойчивого развития предполагает, что продажи электромобилей к 2030 году превысят 45 млн. единиц в год, а глобальный парк вырастет до 245 млн. (рис. 1) [2, 3].

Существенный рост продаж обусловлен следующими факторами:

- снижение стоимости блока накопителей (БН) электрической энергии, как правило, представленного модулями, собранными из отдельных литиевых аккумуляторов (ячеек);
- адаптация режимов работы БН под различные климатические условия;
- развитие инфраструктуры зарядных станций;
- поддержка продаж государством.

Согласно анализу стоимость ЛИА составляет до 40% от стоимости электромобиля [4]. Данное соотношение обуславливается обеспечиваемой дальностью автономного хода современных моделей

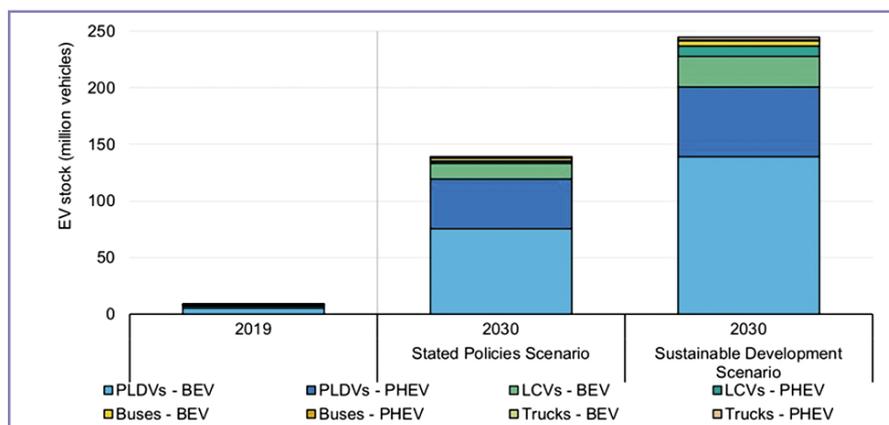


Рис. 1. Аналитический прогноз развития парка электромобилей

500 км и более, поддержанием комфортной температуры салона и расходами на собственные нужды (фары, подсветка и др.). Поэтому ключевым вопросом является определение предпочтительных режимов работы с целью увеличения срока службы БН. На сегодняшний день в достаточной степени исследованы следующие факторы, влияющие на срок службы аккумуляторов:

- токи заряда и разряда;
- глубина разряда;
- диапазон степени заряженности, при котором происходит циклирование аккумулятора;
- температура аккумулятора.

Так, в работе Samveg Saxena и др. по определению срока службы АБ на основе требуемой динамики при движении ЭТС показано, что БН электромобилей удовлетворяют потребностям в перевозке даже после потери 20% от своей изначальной энергоемкости [5]. В исследовании [6] получено, что при полном использовании емкости (DOD = 100%) ресурс АБ составлял 500 циклов, а при DOD = 25% – 1800 циклов. В работе [7] проведены испытания с различными нагрузочными режимами ЛИА и выявлено, что при заряде/разряде током 1С ресурс БН сохраняется в наибольшей степени по сравнению с режимами с токами более 1С. Из вышесказанного можно предположить, что основной целью установки БН значительной энергоемкости является не увеличение дальности хода, а снижение среднего тока нагрузки на ячейку и уменьшение ее глубины разряда для увеличения срока службы.

Отличительной особенностью режимов работы БН электромобиля является неравномерная нагрузка, связанная с дорожными условиями, а также возможность рекуперации части энергии торможения. Поэтому целью исследования стал анализ влияния чередования режимов заряда-разряда различными токами с различной длительностью. В качестве нагрузочного цикла использован всемирный ездовой цикл для легкового транспорта WLTC 3, т.к. он в настоящее время является общепринятым стандартом. Для исследования современных моделей ЭТС принят один из наиболее распространенных электромобилей марки Nissan Leaf с АБ энергоемкостью 24 кВт·ч.

В работе проводится анализ цикла WLTC с позиции возникающих токов нагрузки АБ Nissan Leaf. Оцениваются пиковые нагрузки в режимах тяги

и торможения, средние значения в фазах цикла и количество реверсов потока мощности.

Анализ цикла WLTC

Всемирный цикл испытаний легковых автомобилей (WLTC) – современный стандарт ездового цикла, являющийся частью процедуры WLTP по определению расходов топлива и электроэнергии автомобилей и электромобилей (рис. 2). Он создан на основе статистических данных режимов движения легкового транспорта в разных странах. Цикл представляет собой четыре участка с разными режимами управления ЭТС, первые два из которых (Low и Medium) имитируют движение транспорта в городской среде, а следующие два (High и Extra High) – загородный режим движения.

Наименее динамичным является режим управления Low с соотношением долей времени: 46% – тяга; 26% – выбег; 28% – торможение, а наиболее

динамичным режимом управления – Extra high с минимальной долей остановки и торможения в 2% от общего времени режима.

Фаза Low представляет собой частое чередование коротких режимов тяги и торможения, а фаза Extra High – длительный режим тяги с разгоном до высоких скоростей и последующим резким торможением. В таблице 1 приведены минимальная, средняя и максимальная длительность режима тяги, торможения и остановки.

Расчет нагрузки АБ

В соответствии с принятым в качестве исследуемого образца ЭТС Nissan Leaf в таблице 2 приведены основные параметры, необходимые для построения модели.

Реализуемая сила двигателя зависит от текущего режима движения. Он определяется на основе сравнения ускорения в цикле и ускорения замедления от основного сопротивления движению.

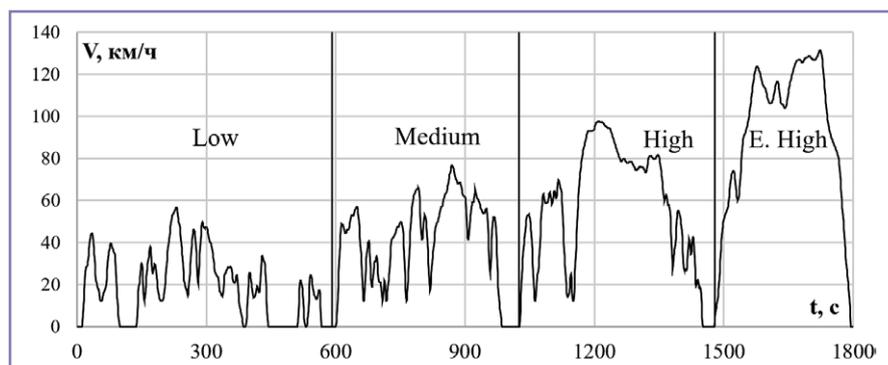


Рис. 2. Цикл WLTC

Таблица 1. Минимальная, максимальная и средняя длительность режимов

Скоростной режим	Тяга, сек.			Торможение, сек.			Остановка, сек.		
	T_{\min}	T_{cp}	T_{\max}	T_{\min}	T_{cp}	T_{\max}	T_{\min}	T_{cp}	T_{\max}
Low	1	8,55	40	1	5,09	15	2	24,2	66
Medium	3	16,29	56	2	6,41	17	33	33	33
High	3	22,47	201	1	5,93	14	26	33	40
E. high	24	66,25	98	3	13,00	29	6	6	6

Таблица 2. Параметры легкового автомобиля

Параметр	Размерность	Величина
Масса ТС	кг	1690
Коэффициент сопротивления воздуха	–	0,4
Площадь передней части	м ²	2
Плотность воздуха	кг/м ³	1,2258
КПД трансмиссии η_t	–	0,96
Коэффициент сопротивления качению [8]	–	0,0076 + 0,000056·
Выходное напряжение аккумулятора	В	375

Выходная мощность двигателя электропривода в режиме тяги и торможения определяется уравнениями:

$$P_{\text{тяги}} = \frac{F_m \cdot V}{3,6 \cdot \eta_{\text{тяги}}}, \text{ Вт} \quad (1)$$

$$P_{\text{торм}} = \frac{B_m \cdot V}{3,6} \cdot \eta_{\text{торм}}, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где F_m и B_m – соответственно, сила, реализуемая двигателем в режиме тяги и торможения (Н); V – скорость транспортного средства (км/ч); $\eta_{\text{тяги}}, \eta_{\text{торм}}$ – КПД тягового привода, учитывающая КПД двигателя и КПД преобразователя в режиме тяги и торможения.

Зная, что выходное напряжение на АБ варьируется в пределах 320–410 В, принято усредненное значение $U_b = 375 \text{ В}$, тогда ток в аккумуляторе:

$$I_b = \frac{P_m}{U_b \cdot \eta_{\text{conv}}}, \text{ А}, \quad (3)$$

где I_b и U_b – ток и напряжение в аккумуляторе.

Аккумулятор состоит из 48 неразборных модулей, соединенных последовательно. В неразборном модуле четыре ячейки, которые соединены в $n_p = 2$ параллельные цепочки.

Следовательно, ток в ячейке

$$I_{sb} = \frac{I_b}{n_p}. \quad (4)$$

Для удобства представления перегрузки введем соотношение:

$$I_{\text{отн}} = \frac{I_{sb}}{I_{1C}}. \quad (5)$$

Полученные диаграммы относительных токов для АБ Nissan Leaf энергоемкости 24 кВт·ч для различных режимов управления цикла WLTC представлены на рисунках 3–6.

Статистическая обработка данных

На рис. 4 представлены гистограммы распределения относительных токов ($I_{\text{отн}}$) одиночной ячейки в режиме тяги и торможения для различной энергоемкости БН, значения имеют дискретность в одну секунду, что соответствует одному событию.

Из анализа гистограмм следует, что в городском режиме движения большую часть времени потребляются малые токи (без превышения значений в 1С в режиме тяги и в 0,5С в режиме торможения). Однако их значения достаточны для обеспечения необходимой динамики разгона и торможения в плотном транспортном потоке, а также для подрегулирования скорости ЭТС.

С увеличением максимальной скорости разгона при движении в городской среде без пробок с более длительным нахождением ЭТС в условиях ненулевой скорости пропорционально увеличивается среднее и максимальное значение токов. Однако пик гистограмм тока тяги и торможения в городском режиме составляет до 0,25С.

При движении в загородном режиме происходит увеличение среднего значения токов тяги и рекуперации и рост максимального значения перегрузки. Так, максимальные токи тяги в режимах High и E. High составляют 2С и 3С соответственно, а токи торможения – 1С и 1,5С.

Изменение максимального тока рекуперации в более тяжелом режиме движения объясняется тем, что при движении с высокой скоростью основной тормозной силой является сопротивление воздушной среды. Поэтому при одинаковых динамических параметрах замедления в режиме E. High требуется меньшая тормозная сила. Следует отметить, что в загородных режимах пик гистограмм приходится на диапазон 0,5С и выше.

Получение эквивалентных токовых диаграмм

На основе обработки данных на рис. 5 представлена зависимость среднего тока

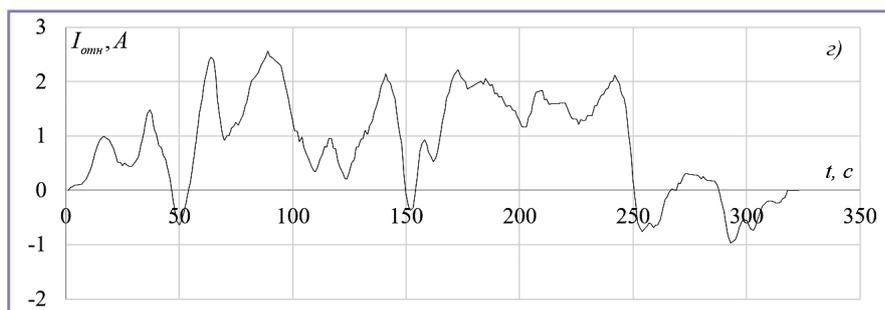
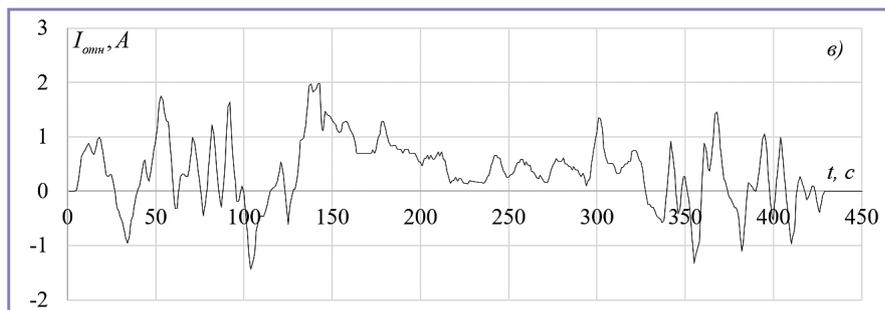
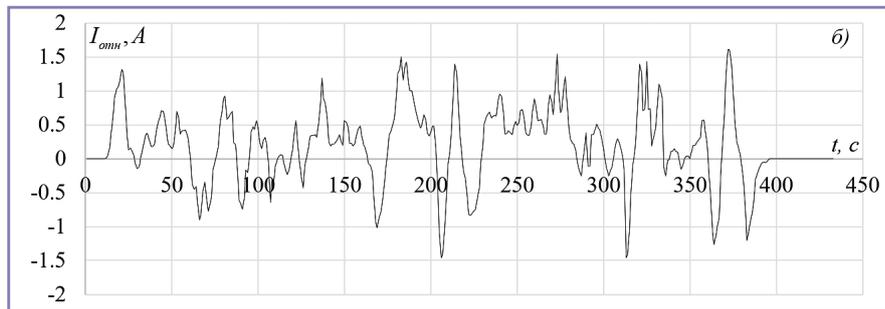
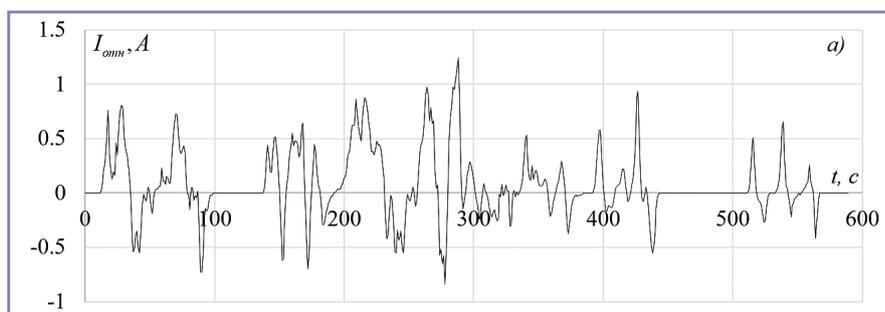


Рис. 3. Диаграммы относительных токов одиночной ячейки: Low (а), Medium (б), High (в), E. High (г)

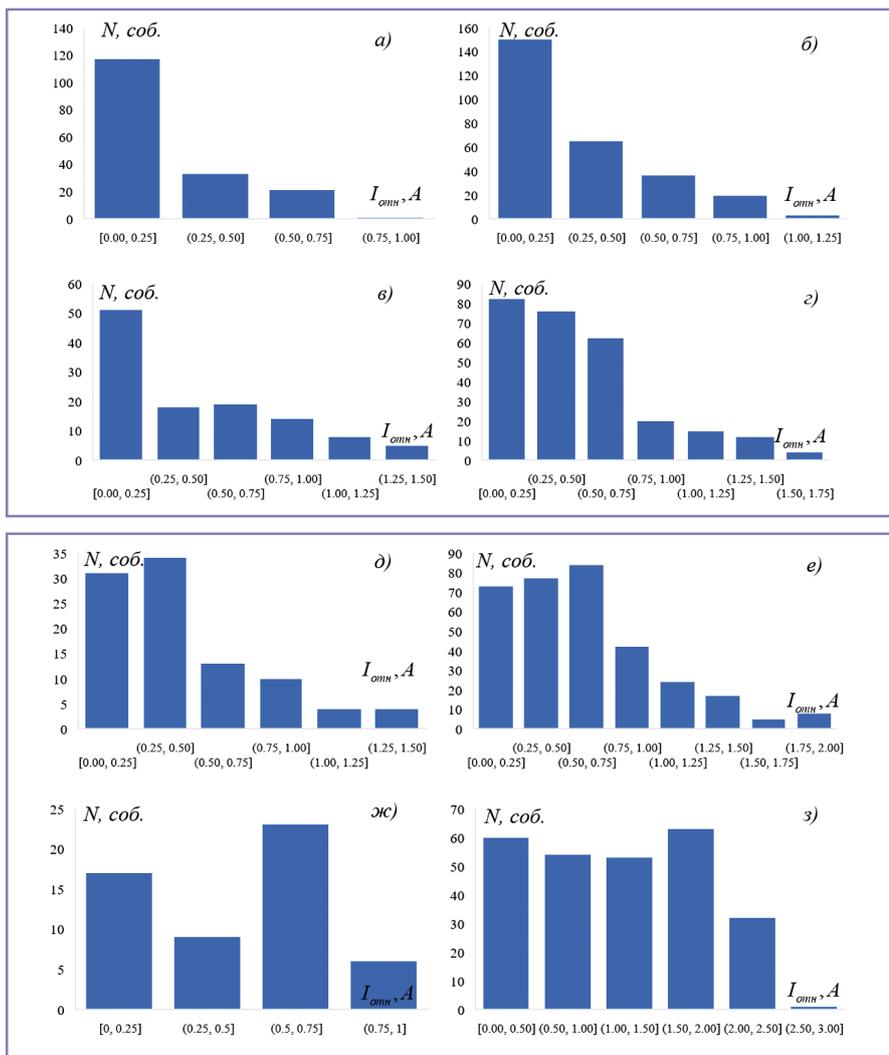


Рис. 4. Гистограммы относительных токов АБ 24 кВт·ч: Low, торможение (а); Low, тяга (б); Medium, торможение (в); Medium, тяга (г); High, торможение (д); High, тяга (е); E. High, торможение (ж); E. High, тяга (з)

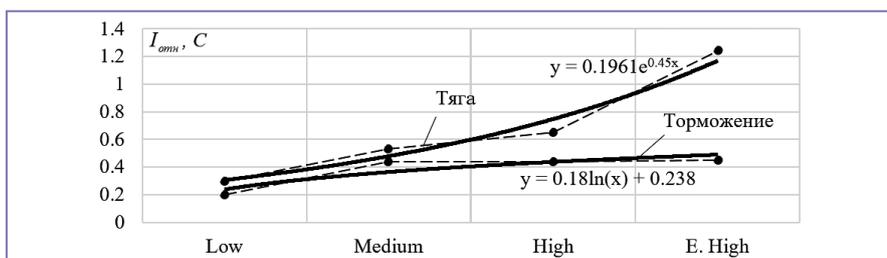


Рис. 5. Зависимость среднего тока от режима управления цикла

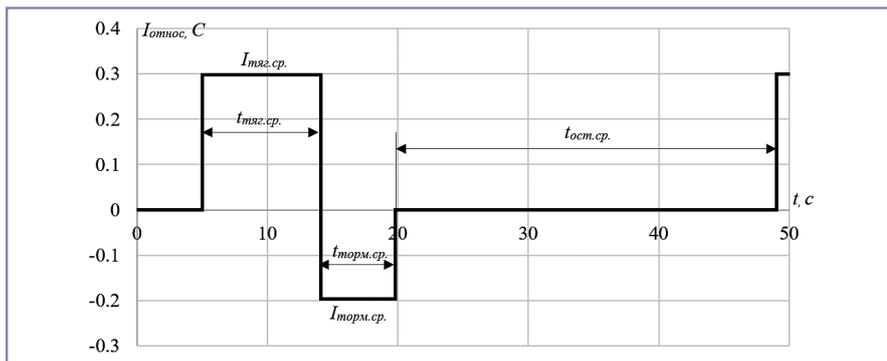


Рис. 6. Эквивалентная токовая диаграмма

в ячейке от режима управления цикла WLTC одиночной ячейки БН Nissan Leaf.

Из рис. 5 следует, что с увеличением динамики движения средний ток тяги в режиме управления увеличивается по экспоненциальному закону, тогда как ток торможения практически не изменяется, начиная с Medium. Это объясняется увеличением затрат энергии на преодоление сопротивления движению в режиме тяги и малой требуемой тормозной силой в режиме торможения при движении в диапазоне высоких скоростей.

На основе анализа тяговых нагрузок WLTC была получена диаграмма, представленная на рис. 6. Параметрами для моделирования являются средние значения токов и средние значения длительностей тяги, торможения и остановки.

Очередность режимов соотносится с режимами ведения ТС на дороге. Однако в случае плотного транспортного потока может происходить попеременное изменение режимов тяги и торможения. Поэтому для установления корреляции между реверсом потока энергии и старением АБ требуется проведение серии экспериментов как с прямым порядком режимов (тяга, торможение, остановка), так и с обратным (торможение, тяга, остановка).

Выводы

В работе получены зависимости средних значений токов тяги и торможения от режимов управления ездового цикла WLTC. С увеличением динамики движения пропорционально увеличивается ток тяги для реализации требуемого ускорения и преодоления основных сил сопротивления. Среднее значение тока торможения по достижению фазы Medium увеличивается незначительно, что объясняется торможением ТС за счет основного сопротивления движению в диапазоне высоких скоростей и снижением количества и длительности циклов торможения.

Получены эквивалентные токовые диаграммы, имитирующие нахождение ТС в разных режимах управления цикла WLTC. Проведение испытаний на аккумуляторных ячейках согласно диаграммам позволит установить зависимость между реверсом потока энергии и старением аккумулятора.

Исследование выполнено при финансовой поддержке НГТУ в рамках научного проекта № С20-17 «Исследование влияния стохастической нагрузки на параметры литиевых аккумуляторов в транспортном комплексе».

Литература

1. Обзор автомобильного рынка России в первом полугодии 2019 года и перспективы развития [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.pwc.ru/ru/materials/pwc-auto-press-briefing-2019.pdf> – Заглавие с экрана. [Overview of the Russian automotive market in the 1st half of 2019 and development prospects] [Electronic resource] – Access: <https://www.pwc.ru/ru/materials/pwc-auto-press-briefing-2019.pdf>
2. Global EV Outlook 2020 [Electronic resource] – Access: <https://www.pwc.ru/ru/materials/pwc-auto-press-briefing-2019.pdf>
3. Bloomberg New Energy Finance 2019 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://bnef.turtl.co/story/neo2019/page/1?teaser=true> – Заглавие с экрана. [Bloomberg New Energy Finance 2019] [Electronic resource] – Access: <https://bnef.turtl.co/story/neo2019/page/1?teaser=true>
4. Shtang A.A., Yaroslavtsev M.V., Dedov S.I., Xiaogang W. Comparison of energy consumption of different types of passenger public transport in russian operational conditions // 20 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2019, Altai Republic, Erlagol, 2019, pp. 705–710.
5. Samveg Saxena, Caroline Le Floch, Jason MacDonald, Scott Moura. Quantifying EV battery end-of-life through analysis of travel needs with vehicle powertrain models // Journal of Power Sources, 2015, 282, pp. 265–276.
6. De vries H., Nguyen T.T., Veld B. O. Increasing the cycle life of lithium ion cells by partial state of charge cycling // J. Microelectronics Reliability, 55 (2015), pp. 2247–2253.
7. Groot J. State-of-health estimation of Li-ion batteries: ageing models, doctoral thesis at the graduate school in energy and environment.– Chalmers University of Technology, 2014.
8. Gillespie Thomas D. Fundamentals of vehicle dynamics. Society of automotive engineers.– Inc, 1992.– 470 p.
9. Zhengyu Chu, Xuning Feng, Minggao Ouyang, Zuofu Wang, Languang Lu, Jianqiu Li, Xuebing Han. Optimal charge current of lithium ion battery // Energy Procedia, 2017, 142, pp. 1867–1873.
10. Medvedev O.S., Wang Q., Popovich A.A. & Novikov P.A. Comparison of conductive additives for high-power applications of Li-ion batteries / Ionics, 2020, 26, pp. 4277–4286.
11. Yaroslavtsev M.V., Shtang A.A., Dedov S.I. Automated calculation of economic feasibility of using various types of passenger public transport in Russian conditions // Journal of physics conference series, 2019, 1333.
12. Takei K., Kumai K., Kobayashi Y., Miyashito H., Terada N., Iwahori T., Tanaka T. Cycle life estimation of lithium secondary battery by extrapolation method and accelerated aging test // J. Power Sources, 2001, pp. 97–98, 697–701.

Щуров Николай Иванович

Родился в 1947 году. В 1970 году окончил Новосибирский электротехнический институт по специальности «Электрический транспорт». Доктор технических наук, профессор. В 2002 году защитил докторскую диссертацию по теме «Методы и средства экономии и повышения эффективности использования энергии в системе городского электрического транспорта». Опыт работы – 32 года. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электротехнические комплексы»

Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Автор 42 научных трудов, 12 патентов. Имеет почетное звание «Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации».

Дедов Сергей Игоревич

Родился в 1994 году. В 2018 году окончил Новосибирский электротехнический институт. Опыт работы – 2 года. В настоящее время работает ассистентом кафедры «Электротехнические комплексы» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Имеет 14 научных трудов.

Shchurov Nikolay

Was born in 1947. In 1970 he graduated from the Novosibirsk Electrotechnical Institute with a degree in Electrical Transport. Doctor of Technical Sciences, Professor. In 2002 he defended his doctoral dissertation on the topic “Methods and means of saving and increasing the efficiency of energy use in the urban electric transport system.” Work experience is 32 years. At present he works as the head of the department “Electrotechnical complexes” of the Novosibirsk State Technical University (NSTU). Author of 42 scientific papers, 12 patents. He has the title of honor “Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation.”

Dedov Sergey

Was born in 1994. In 2018 he graduated from the Novosibirsk Electrotechnical Institute. Work experience is 2 years. At the present time he works as an assistant at the Department of Electrical Engineering Complexes at the Novosibirsk State Technical University (NSTU). He has 14 scientific papers.

Результаты экспериментальных испытаний литий-железо-фосфатного аккумулятора производства компании «Лиотех» в низкотемпературных условиях

// Experimental tests results of lithium-iron-phosphate battery manufactured by LYOTECH under low-temperature conditions //

Голубчик Т. В., к. т. н.,
МАДИ, Москва

Куликов А. С.,
ООО «Лиотех», Москва

В холодных странах эксплуатация электромобильного транспорта затруднена в зимнее время в условиях отрицательных температур. Низкая отрицательная температура окружающей среды увеличивает внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи, замедляя диффузию и уменьшая ионную проводимость электролита, что снижает энергию и мощность батареи. Эти ограничения для литий-ионных аккумуляторов остаются одним из основных барьеров для широкого их применения в энергетических системах и на транспорте, в частности, в России, Европе и других северных регионах. Фактически до сих пор исследования низкотемпературного поведения литий-ионных элементов почти не давали какой-либо соответствующей информации, поскольку они касались только батарей малой емкости. В статье приводятся экспериментальные данные испытаний литий-железо-фосфатного (LiFePO₄) аккумулятора LT-LFP101.2 производства компании «Лиотех» в различных температурных диапазонах. Экспериментальный процесс исследования включал зарядку при температуре окружающей среды, последующее охлаждение аккумулятора в камере и цикл разряда при заданном значении температуры.
Ключевые слова: литий-железо-фосфатный аккумулятор, зарядно-разрядные режимы, низкая температура, внутреннее сопротивление, емкость.

Аккумуляторные системы хранения энергии могут способствовать интеграции возобновляемых источников энергии в энергосистему и эффективному использованию генерируемых активов. В качестве примера можно привести систему хранения энергии в Австралии мощностью 129 МВт·ч, которая работает совместно

At the cold countries, the operation of electric vehicles is difficult in the winter when temperatures are below zero. A low ambient temperature increases the internal resistance of the battery, slowing down diffusion and reducing the ionic conductivity of the electrolyte, which reduces the energy and power of the battery. These limitations for lithium-ion batteries remain one of the main barriers to their widespread use in the energy systems and transport, in Russia, Europe and other northern regions. Until now, research on the low-temperature behavior of lithium-ion cells provided little important information because they were only extended to low-capacity batteries. This article presents the experimental data of testing the lithium-iron-phosphate (LiFePO₄) battery LT-LFP101.2 manufactured by Liotech in various temperature ranges. The experimental research process included charging at ambient temperature, subsequent cooling of the battery in the chamber, and a discharge cycle at a given temperature.
Keywords: lithium iron phosphate battery; charging and discharging modes; low temperature, internal resistance, capacity.

с ветряной электростанцией мощностью 315 МВт [1], а также автономную систему электроснабжения производства компании «Лиотех» АСЭР-16 (рис. 1), которая включает систему накопления энергии. Литий-ионные аккумуляторы в настоящее время широко используются в различных областях (телекоммуникации, транспорт,

велосипеды и скутеры, автомобилестроение, аэрокосмическая промышленность, стационарные системы хранения электроэнергии) и за последние несколько лет завоевали признание, в частности, из-за их высокой плотности энергии – 120–260 Вт·ч/кг – и мощности на единицу массы.

Литий-ионные аккумуляторы обладают рядом преимуществ и получили превосходство над другими типами аккумуляторных технологий, такими как свинцово-кислотные и никель-кадмиевые батареи, в том числе благодаря широкому диапазону безопасных рабочих температур (например, от –10°C до +50°C), низкой скорости саморазряда (до 2% в месяц) и отсутствию эффекта памяти. Но при этом такие аккумуляторные батареи требуют наличия электронной схемы управления, чтобы максимизировать их производительность и повысить безопасность, а также устранить ряд барьеров, связанных с их безопасностью, стоимостью, утилизацией, инфраструктурой и временем зарядки.

В последние годы терморегулирование литий-ионных аккумуляторов было в центре внимания ряда исследований, так как крайне важно обеспечить их работу в оптимальных условиях. В исследованиях основное внимание уделялось высокотемпературным режимам работы. Это обусловлено географическим расположением основного рынка сбыта, где такие аккумуляторные системы более востребованы.

При отрицательных температурах батареи и другие электрохимические системы теряют свои характеристики, следовательно, эксплуатация при низкой температуре является серьезной проблемой в нашей стране или скандинавских странах, где температура зимой резко падает ниже –20°C и сохраняется не менее трех-четырех месяцев. Обзор литературы показывает, что первые исследования по терморегулированию, которые датируются прошлым десятилетием [2], посвящены методам предварительного нагрева аккумуляторной батареи в холодном климате,

включая нагрев активной зоны корпуса аккумулятора.

Быстрая зарядка литий-ионных аккумуляторов при отрицательных температурах может потенциально повредить их и привести к разрушению. В исследованиях [3, 4] было высказано предположение, что потеря производительности в холодных условиях вызвана значительным повышением внутреннего сопротивления, которое имеет тенденцию увеличивать внутреннюю температуру элемента и потенциально разрушать аккумулятор в долгосрочной перспективе.

В настоящей статье представлены результаты экспериментальных исследований и анализ изменения емкости и внутреннего сопротивления литий-ионного аккумулятора LT-LFP101.2 в режиме разряда номинальными токами при отрицательных температурах окружающей среды.

Разрядные характеристики аккумулятора

Существует ряд исследований [5], посвященных моделированию процессов и эквивалентных схем литий-ионной батареи, эффективных с точки зрения основанных на физических принципах вычислений, позволяющих одновременно оценивать краткосрочные и долгосрочные характеристики литий-ионной батареи при проектировании систем накопления и хранения электроэнергии.

Разрядная емкость, являющаяся интегральной характеристикой аккумуляторной батареи, – количество электричества,

отдаваемого батареей при разряде заданным током I за время t_m до определенного значения напряжения:

$$C_p = \int_0^{t_m} I(t) dt. \quad (1)$$

Номинальная разрядная емкость батареи определяется при постоянных токе и температуре. В зависимости от типа батареи и требований стандарта номинальная емкость может определяться в различных режимах. Разрядная характеристика аккумулятора представляет собой зависимость напряжения на клеммах аккумулятора U_6 от времени t при постоянном значении разрядного тока I и температуры батареи T_6 :

$$U_6 = f(t), I = \text{const}; T_6 = \text{const}. \quad (2)$$

Располагая разрядной характеристикой, можно определить время работы батареи t_m при ее разряде до минимально допустимого напряжения.

Так как напряжение аккумуляторной батареи зависит от тока нагрузки, его можно считать функцией двух переменных:

$$U_6 = f(t, I), T_6 = \text{const}. \quad (3)$$

Функциональная связь между разрядным напряжением батареи и независимыми величинами I, t может быть представлена поверхностью в 3-мерном пространстве [6]. Общий вид этой поверхности, характеризующей режимы разряда батареи, представлен на рис. 2.

Каждое сечение поверхности $U_6 = f(t, I)$ плоскостью $I = \text{const}$ дает разрядную характеристику.

Снижение рабочего напряжения и емкости в аккумуляторной батарее можно объяснить повышением внутреннего сопротивления аккумулятора в основном за счет снижения ионной проводимости электролита и замедления электрохимических реакций элемента. Численное моделирование может применяться параллельно с экспериментальным исследованием в качестве гибридного подхода к прогнозированию теплового поведения литий-ионной ячейки в различных тепловых условиях.

Экспериментальное исследование

В настоящий момент кафедра «Электротехника и электрооборудование» МАДИ совместно с компанией «Лиотех» проводят исследования по данной тематике для разработки аккумуляторов нового типа. Данные аккумуляторы разрабатываются для применения на транспортных системах с оптимизированными для работы в условиях отрицательных температур параметрами. На рис. 3 представлена часть стенда, состоящего из блока соединенных аккумуляторных батарей вместе с системой управления. На их базе планируется производство унифицированных накопителей электрической энергии для установки на потребители самого широкого спектра применения – от гибридных электростанций до электромобилей.

Экспериментальное исследование проводилось компанией «Лиотех» для проверки производительности



Рис. 1. Автономная электростанция АСЭР-16 производства компании «Лиотех» с системой накопления энергии

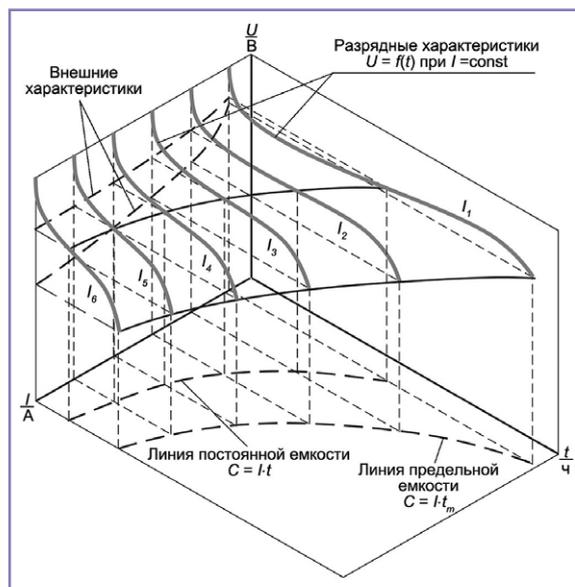


Рис. 2. Поверхность режимов разряда батареи

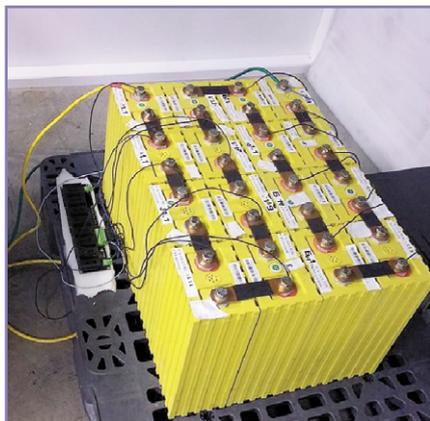


Рис. 3. Стенд исследования характеристик аккумуляторов

литий-железо-фосфатных аккумуляторов ЛИА LT-LFP101.2 напряжением 3,65 В и емкостью 100 А·ч в заданном температурном диапазоне от 0°С до –45°С. В таблице 1 приведены основные параметры аккумуляторов, использованных в эксперименте.

Для воссоздания условий холодного климата использовалась климатическая камера КХТ-74, испытываемые аккумуляторы помещались в камеру для измерения емкости во время заряда/разряда. Рекомендуемое значение тока – 0,2 С для разряда и 0,3 С для заряда.

Программа проведения экспериментального исследования:

Шаг 1. Циклические режимы разряда/заряда аккумулятора по следующему алгоритму:

- разряд постоянным током 0,2 С до напряжения 2,5 В, пауза 20 мин.;
- заряд постоянным током 0,3 С до достижения напряжения 3,65 В;
- заряд при постоянном напряжении 3,65 В до значения тока заряда 0,02 С, пауза 20 мин.;
- фиксирование напряжения разомкнутой цепи (НРЦ) и внутреннего сопротивления;
- повторение 3 раза цикла шага 1.

Таблица 1. Параметры аккумулятора LT-LFP101.2

Параметр	Номинальная емкость, А·ч	Номинальное напряжение, В	Номинальный / максимальный ток разряда, А	Диапазон (мин./макс.) напряжений, В	Диапазон рабочих температур, °С
Значение	100	3,2	0,2С/3С	2,5/3,65	–45 ~ 50

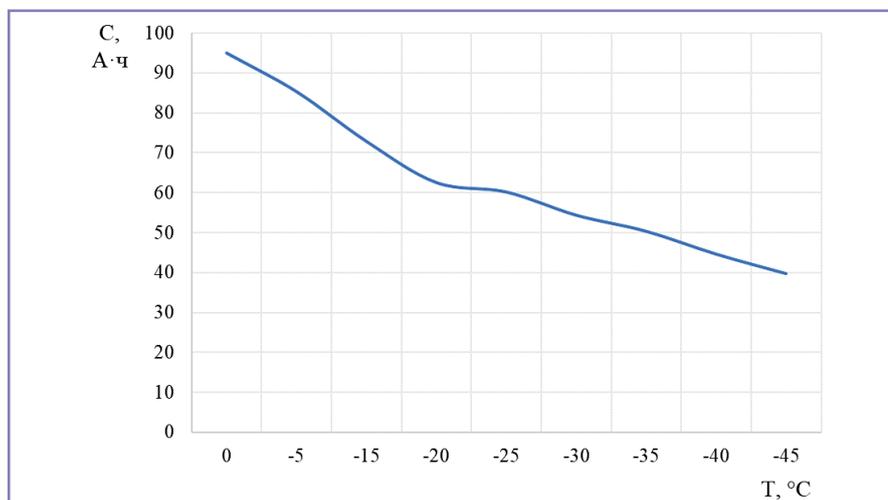


Рис. 4. Зависимость емкости аккумулятора от температуры окружающей среды

Таблица 2. Разница температур корпуса аккумулятора и окружающей среды

Температура в камере, °С	Минимальная температура, °С	Максимальная температура, °С	Разность температур ΔT, °С	DoD, %
0	0	14,4	14,4	95
–5	–5	11,6	6,6	85
–15	–15	6,8	8,2	72
–25	–25	–13,2	11,8	60
–35	–35	–24,2	10,8	50
–45	–45	–38,2	6,8	40

Шаг 2. Литий-ионные аккумуляторы были помещены в климатическую камеру до тех пор, пока они не достигли теплового равновесия между температурой аккумулятора и камеры, соответствующий исследуемому значению алгоритм:

- выдержать в течение 6 часов в камере;
- зафиксировать данные НРЦ и внутреннего сопротивления;
- выдержать в камере 15 мин. при заданной температуре.

Шаг 3. Литий-ионные аккумуляторы были разряжены током 0,3 С от максимального уровня заряда (SOC) до напряжения отключения 2,5 В с фиксацией данных НРЦ и внутреннего сопротивления.

Шаг 4. Литий-ионные аккумуляторы были перемещены на технологический стол:

- после завершения цикла разряда элементы выдерживали до тех пор (не менее 12 часов), пока они не достигли нормальных климатических условий (НКУ);
- каждые 15 минут фиксировались данные температуры на клеммах и корпусе аккумулятора, а после достижения нормальных климатических условий – фиксация НРЦ и внутреннего сопротивления.

На шаге 3 мы можем наблюдать увеличение внутренней температуры ячейки, что указывает на выделение тепла вследствие протекания электрохимической реакции внутри аккумулятора.

Полученные экспериментальные данные представлены в виде графиков. Влияние температуры на степень заряженности литий-ионного аккумулятора при отрицательных температурах показано относительно емкости и представлено на рис. 4. В процессе разряда аккумулятора при отрицательных температурах емкость элемента уменьшается до 85%, 65% и 45% от глубины разряда элемента при –5 °С, –20 °С и –40 °С соответственно.

Судя по графику (рис. 4), аккумулятор обеспечивает значительно меньшую емкость при отрицательных температурах в режиме разрядки по сравнению с таковой при положительной температуре окружающей среды 5 ~ 50 °С, которая в полной мере соответствовала номинальной.

Потеря емкости в основном обусловлена увеличением внутреннего сопротивления, которое вызывает некоторый эффект нагрева элемента во время заряда и разряда [7]. Зависимость изменения

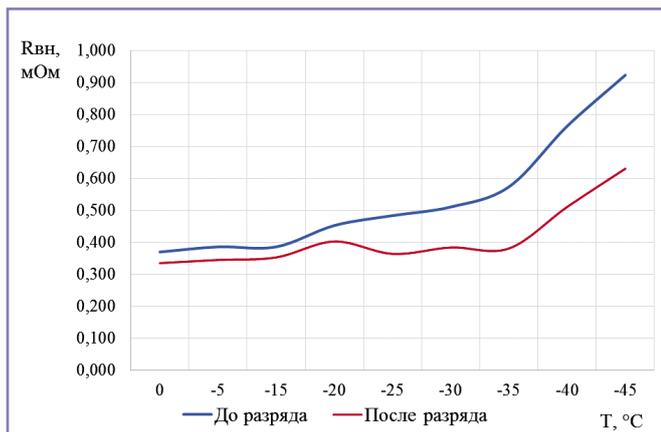


Рис. 5. Зависимость внутреннего сопротивления от температуры

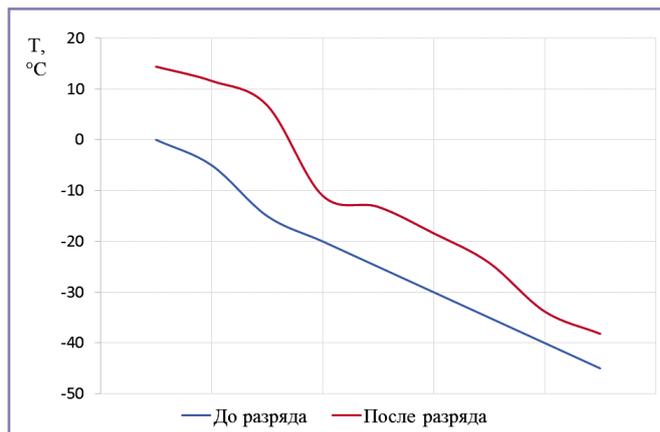


Рис. 6. Зависимость температуры на корпусе аккумулятора

внутреннего сопротивления при отрицательной температуре окружающей среды аккумулятора LT-LFP101.2 до и после разряда представлена на рис. 5.

В таблице 2 и на рис. 6 представлена разница между максимальной и минимальной температурой корпуса аккумулятора.

Учитывая отсутствие датчика температуры внутри аккумулятора, данные хорошо согласуются с эффектом увеличения внутренней температуры ячейки при работе в условиях низких температур.

Продолжительное использование аккумулятора в низкотемпературных режимах потенциально может привести к сокращению его срока службы [8, 9].

Выводы

Экспериментальные данные показывают изменение внутреннего сопротивления и емкости аккумулятора при понижении температуры окружающей среды. С учетом полученных данных, а также наблюдений за поведением аккумуляторов во время испытаний можно прийти к выводу о возможности безопасной эксплуатации литий-железо-фосфатного аккумулятора LT-LFP101.2 компании «Литотех» в условиях холодного климата, а применение системы термостатирования позволит увеличить выходные параметры аккумуляторной батареи и продлить ее срок службы.

Процессы, которые способствуют выделению тепла, включают выделение тепла внутри аккумулятора, омическое тепло, обратимое и необратимое тепло, теплопередачи во внешнюю среду, т.е. тепловую конвекцию и тепловое излучение от внешней поверхности. Дальнейшие исследования следует проводить в замкнутой системе для определения отдаваемой температуры аккумулятора

в окружающую среду в циклических режимах заряда-разряда.

Результаты исследований позволили определить величины пограничных состояний данного типа аккумулятора и будут использованы в научно-исследовательской работе по разработке накопителя электрической энергии с системой термостатирования замкнутого цикла, предназначенной для стабилизации температуры аккумуляторной батареи в условиях длительного охлаждения и режиме ожидания.

Литература

1. <https://www.abc.net.au/news/2017-07-07/what-is-tesla-big-sa-battery-and-how-will-it-work/8688992>, дата обращения 29.10.2020 г.
2. Pesaran A., Vlahinos A., Stuart T. Cooling and preheating of batteries in hybrid electric vehicles // 6th ASME-JSME thermal engineering joint conference, Hawaii, 2003.
3. Ji Y., Zhang Y., Wang C.-Y. Li-Ion cell operation at low temperatures // J. Electrochem. Soc., vol. 160, no. 4, pp. A636–A649, Feb. 2013.
4. Y. Ji and C.Y. Wang. Heating strategies for Li-ion batteries operated from subzero temperatures // Electrochim. Acta, vol. 107, pp. 664–674, Sep. 2013.
5. Li Yang & Vilathgamuwa, Mahinda & Choi, San Shing & Farrell, Troy W. & Tran, Ngoc Tham & Teague, Joseph, 2019. Development of a degradation-conscious physics-based lithium-ion battery model for use in power system planning studies // Applied energy, Elsevier, vol. 248(C), pp. 512–525.
6. Голубчик Т.В. Выбор параметров комбинированной энергетической установки автомобиля с применением математического моделирования: дис... канд. тех. наук.: 05.09.03 / Тимофей Владимирович Голубчик. – Москва, 2009. – 186 с.
7. Warner J.T. The handbook of lithium-ion battery pack design chemistry, components, types and terminology, Elsevier science, Burlington, 2015.
8. Голубчик Т.В. Аккумуляторные батареи и проблемы их применения в электромоби-

лях / Т.В. Голубчик, Б.Н. Сидоров, В.И. Марсов // Электроника и электрооборудование транспорта, 2012, № 1, 32–36.

9. Shabani B., Biju M. Theoretical modelling methods for thermal management of batteries, energies, 8, 2015, 10153–10177.

Голубчик Тимофей Владимирович

Родился в 1984 году. В 2006 году окончил Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) по специальности «Электроэнергетика и электротехника». Кандидат технических наук. В 2009 году защитил диссертацию по теме «Выбор параметров комбинированной энергоустановки с применением математического моделирования». Опыт работы – 15 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Электротехника и электрооборудование» МАДИ. Имеет 36 опубликованных научных трудов, из них 4 патента.

Куликов Алексей Сергеевич

Родился в 1984 году. Окончил МГТУ им. Баумана по специальности «Высокотехнологические плазменные и энергетические установки». В настоящее время работает старшим инженером-конструктором ООО «Литотех».

Golubchik Timofey

Was born in 1984. In 2006 he graduated from the Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) with a degree in Electrical Power Engineering and Electrical Engineering. Candidate of Technical Sciences. In 2009 he defended his thesis on the topic “Choice of parameters of a combined power plant using mathematical modeling”. Work experience is 15 years. At present he works as an associate professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of MADI. He has 36 published scientific works, 4 of them are patents.

Kulikov Alexey

Was born in 1984. He graduated from the Bauman Moscow State Technical University with a degree in High-tech Plasma and Power Plants. At present he works as a senior design engineer at «Liotech» LLC.

Метод управления температурными режимами работы нагревателя чувствительного элемента датчика кислорода планарного типа

// Method of temperature control of the planar type oxygen sensor heater //

Дебелов В. В., к.т.н.,

Каменев В. Ф., д.т.н., профессор,
ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», г. Москва

Козловский В. Н., д.т.н., профессор,
ФГБОУ ВО «СамГТУ», г. Самара

Шишков А. Н., к.т.н., доцент,
ФГБОУ ВО «МПУ», г. Москва

В статье представлены результаты разработки и реализации метода управления температурными режимами нагревателя чувствительного элемента датчика кислорода планарного типа. Работа подготовлена при поддержке гранта Президента РФ НШ-2515.2020.8

Ключевые слова: автомобиль, электро-технические бортовые системы, датчик кислорода, управление температурными режимами.

Для эффективной работы современных нейтрализаторов требуется поддержание определенного стехиометрического состава топливной смеси, поступающей в цилиндры двигателя внутреннего сгорания (ДВС). В условиях сурового климата, высокой влажности или наличия остаточного конденсата в выпускном коллекторе двигателя при пуске ДВС мгновенно определить стехиометрию топливной смеси невозможно. Ввиду специфических условий возникает препятствие для быстрого разогрева и выхода датчика кислорода на рабочую температурную точку, на которой происходит эффективное измерение соотношения воздуха и топлива, поступающего в цилиндры [1–3].

Ввиду наличия эффекта отложенного измерения состава может возникнуть процесс неполного горения топливной смеси, поступающей в цилиндры ДВС. При длительной работе двигателя на обогащенной смеси часть топлива попадает в выхлопную систему и способствует разогреву нейтрализатора. Если процесс смесеобразования неконтролируемый

The article presents the results of the development and implementation of the method for controlling the temperature conditions of the heater of the sensitive element of the planar type oxygen sensor. The work was prepared with the support of the grant of the President of the Russian Federation NSh-2515.2020.8

Keywords: car; electrical onboard systems; oxygen sensor; temperature control.

и избыточный, это может привести к перегреву нейтрализатора выхлопных газов. Также при этом существуют риски невыполнения норм по требованиям токсичности, которые регламентируют содержание вредных веществ в отработанных газах легкового автомобиля [4, 5].

Целью исследования является разработка метода управления температурным режимом нагревателя чувствительного элемента датчика кислорода для обеспечения выполнения норм по токсичности, а также безаварийности и безотказности системы нейтрализации вредных выбросов автомобиля.

Для достижения цели необходимо обеспечить выход на рабочий режим датчика кислорода в максимально короткое время, чтобы в момент пуска двигателя и после стабилизации холостого хода был известен стехиометрический состав топливной смеси. Для этого в работе реализуется стратегия эффективного менеджмента электрической энергии, электронное схемотехническое, а также математическое и программное решения,

которые позволяют подготовить датчик кислорода к выходу на рабочую точку в максимально короткий срок.

При использовании углеводородного топлива температура отработанных газов достаточно высока и не требует высокой мощности нагревателя для эффективного поддержания температуры чувствительной пластины датчика кислорода в заданном диапазоне. В случае применения этанола в качестве топлива температура отработанных газов значительно ниже, и требуется большая мощность нагрева датчика кислорода для вывода его на рабочий режим. В случае применения в качестве топлива сжатого природного газа (КПГ или CNG) ситуация с температурой отработанных газов аналогична этанолу. Для справки: октановое число сжатого природного газа находится в диапазоне 110–125 и при сгорании производит 48 500 кДж/кг, бензина – 76–98 и 44 000 кДж/кг, пропан-бутана – 102–112 и 46 000 кДж/кг. Сжатый природный газ уступает бензину и пропан-бутану в теплоте сгорания стехиометрической смеси и обеспечивает на 6–8% меньшую производительность в двигателях, рассчитанных на 2 вида топлива в сочетании с неэтилированным бензином. Для того чтобы датчик давал стабильные показания во всем диапазоне температур и стехиометрического состава топлива, необходимо поддержание температуры пластины на заданном уровне [6–8].

При этом важной задачей является учет погрешностей по цепям измерения, учет влияния коэффициента старения или отравления датчика на точность определения температурной точки и последующего измерения состава смеси. Наиболее сложна адаптация системы управления к существующему чувствительному элементу и приведение его показаний к достоверным значениям. Данную задачу невозможно было бы

решить без разработки специального метода управления температурными режимами датчика кислорода, который обеспечивает условия эффективной работы пластины сенсора, изготовленного по планарной технологии с интегрированным нагревателем.

Чтобы обеспечить эффективное управление нагревательным элементом, требуется организация системы управления с контуром обратной связи по сопротивлению чувствительного элемента датчика. Сопротивление чувствительного элемента представляет собой функцию зависимости его сопротивления от температуры. По мере прогрева чувствительного элемента его сопротивление уменьшается. Функция зависимости температуры от сопротивления имеет гиперболический характер и представлена на рис. 1 для образца датчика планарного типа. Нагревательный элемент интегрирован в состав сенсорной пластины. На рисунке отмечен диапазон, в котором датчик работает максимально эффективно и исключается перегрев чувствительной пластины с нагревательным элементом.

Температурный рабочий режим датчика соответствует диапазону сопротивлений от 200 до 240 Ом для выбранного образца датчика. При этих условиях датчик наиболее эффективно реагирует на изменение состава топливно-воздушной смеси. Сопротивление отслеживается измерительной цепью и микроконтроллером в интервале времени порядка 3–5 мс. Таким образом, актуальное значение температуры по известному сопротивлению может быть доступно не ранее чем через 5 мс, а с учетом того, что процессы

инерционные, это время может составить от 10 до 20 мс. Именно с такой временной задержкой обновляются данные при расчете коэффициентов регулирования с учетом цепи обратной связи.

Для достижения наилучшей точности сигнала с датчика кислорода температуру чувствительной пластины датчика следует поддерживать в постоянном рабочем диапазоне. Это достигается при различных температурах выхлопных газов с помощью переменного напряжения нагревателя.

Нагревательный элемент датчика не может быть подключен непосредственно к бортовой сети низкого напряжения: в этом случае в нагревательной спирали будет выделяться максимальное количество тепла, что приведет к ее сгоранию или разрушению керамической пластины.

Наилучшим вариантом подключения нагревателя является такой, при котором применяется схема на основе быстродействующего транзисторного ключа. В результате этого электронная схема управления формирует заданную скважность широтно-импульсного модулированного сигнала, а транзисторный ключ подключает нагрузку в виде нагревательного элемента к бортовой сети на заданное время, не позволяя датчику перегреваться и остывать.

Мощность нагревателя должна быть ограничена пороговым значением скважности ШИМ, которое соответствует заданному напряжению датчика кислорода в соответствии с конструкторской документацией. При всех режимах регулирования эффективное напряжение, прикладываемое к нагревателю датчика,

ограничено по уровню и длительности его воздействия.

При комнатной температуре сопротивление нагревательного элемента приблизительно равно 3–4 Ом. По мере того как датчик прогревается, увеличивается и сопротивление нагревательного элемента. Таким образом, когда датчик холодный, ток через нагреватель может достигать значений 8 А на момент включения. Когда датчик прогревается и выходит на рабочий режим, для которого характерно эффективное напряжение величиной 6,5–10,5 В, ток через его нагревательный элемент уменьшается до значений 1,5–2 А.

Поскольку процессы нагревания и охлаждения пластины протекают инерционно, температура датчика не может мгновенно измениться скачком. По этой причине применение ШИМ сигнала с несущими частотами в диапазоне 10–100 Гц будет наиболее эффективным решением. На практике наиболее часто используется значение частоты 10 Гц.

В момент включения токовая характеристика имеет ниспадающий характер с начальными значениями 7–8 А, которые уменьшаются до значений 3–4 А за 1 с. Для управления процессом здесь требуется специальный ключ с защитой по току и теплоотводом, способным рассеять тепло, когда значение тока резко увеличивается. Электронный ключ подбирается, исходя из способности к длительной работе на номинальном токе 3–4 А, при этом он не должен прекращать работу при кратковременных пиках тока до 8 А, а при значениях свыше 8 А должен ограничивать ток на уровне 8 А. Также должно быть обеспечено отключение нагрузки через заданное время. Характер изменения тока в нагрузке от времени представлен на рис. 2.

Измерение сопротивления датчика кислорода посредством формирования импульса тока накачки производится для того, чтобы определить температурный режим работы датчика кислорода. Это является определяющим фактором при достижении точности измерений состава углеводородной смеси по содержанию кислорода в отработанных газах. Система управления обеспечивает быстрое регулирование температуры при изменяющейся температуре отработанных газов.

Чтобы с высокой точностью измерить сопротивление, реализуется электронная схема, которая создает ток накачки заданной величины. При этом используются прецизионные компоненты,

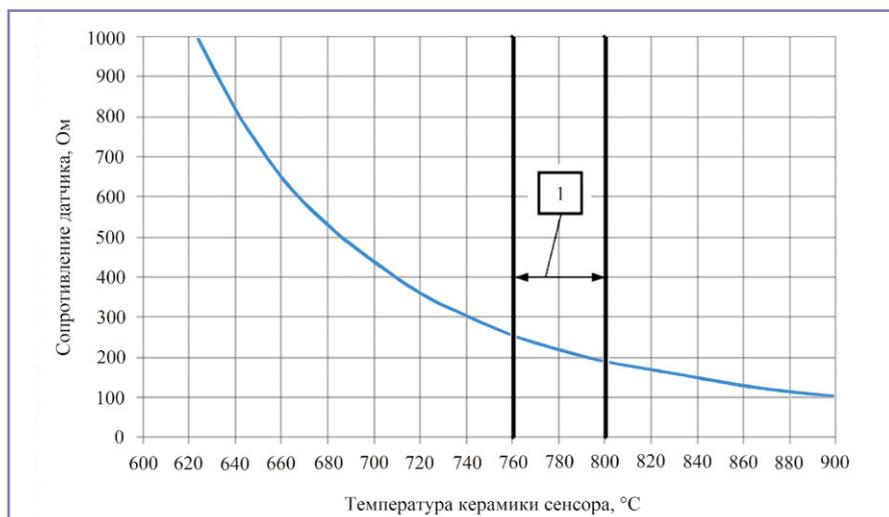


Рис. 1. Зависимость внутреннего сопротивления датчика $R_{i,N}$ от температуры керамического элемента $T_{ceramic}$; 1 – границы рабочего режима регулирования температуры по сопротивлению

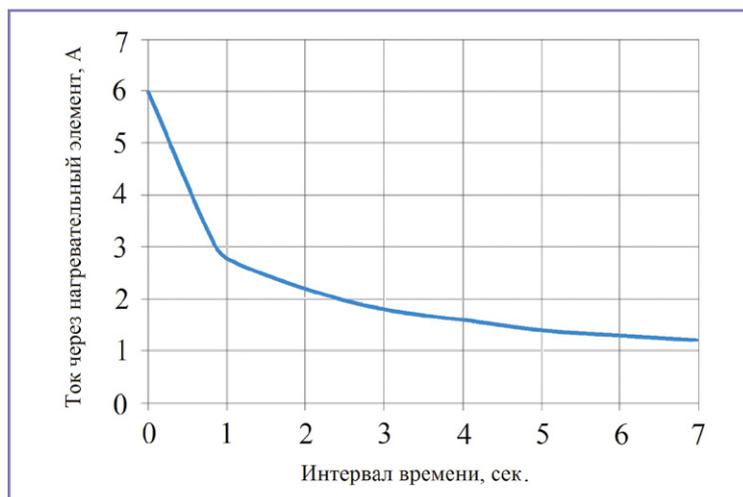


Рис. 2. Изменение тока через нагревательный элемент датчика кислорода по времени

позволяющие получить стабильность тока накачки во всем рабочем диапазоне температур электронного модуля накачки. Ток накачки определяется производителем датчика и имеет величину от 3 до 10 мА. Важным параметром является и длительность импульса тока накачки, которая варьируется в интервале 3–5 мс, что также определяется производителем изделия (рис. 3).

В представленной схеме (рис. 3) референсный ток накачки течет через делитель напряжения R1 и R2 и втекает через резисторы R3 в порт микроконтроллера LSSS (Lambda sensor signal source), который отвечает за ADC преобразование сигнала с датчика. В качестве фильтра используется RC-цепь, состоящая из резистора R5 и конденсатора C2. Конденсатор C1 выполняет функцию входного фильтра. Резистор R4, подключенный к порту микроконтроллера LSSP, обеспечивает пропускание тока с целью измерения внутреннего сопротивления R_i датчика при пульсации тока.

Выполняется измерение разницы напряжения до и после формирования импульса тока накачки. Это позволяет рассчитать сопротивление через датчик при протекании тока известной величины. Для этого разность напряжений до и после импульса тока делят на величину протекающего тока. При этом система управления проектируется таким образом, чтобы процессы прерываний, захвата измерений и подсчета времени выполнялись с наибольшей точностью и быстродействием, чтобы минимизировать ошибку вычислений. Формула расчета сопротивления выглядит следующим образом:

$$R = \frac{V(t2,ms) - V(t1,ms)}{I_{pump}}, \quad (1)$$

где $V(t1, ms)$ – напряжение до формирования импульса тока, $V(t2, ms)$ – напряжение через заданный интервал времени в момент импульса тока накачки, I_{pump} – величина тока накачки, имеющая заданную величину.

После того как второе измерение напряжения выполнено, схема управления отключает токовую накачку и ток накачки уменьшается. При этом длительность времени, через которое допускается проводить накачку и измерение, должна быть такой, чтобы на момент первого измерения напряжения успело стабилизироваться. Длительность этого процесса колеблется в интервале времени 20–50 мс. Поэтому повторные измерения необходимо проводить не чаще чем раз в 100 мс и только на участках кривой напряжения, где градиент сигнала стремится к нулю, чтобы избежать ложного подсчета сопротивления датчика. Амплитуда импульса тока при помощи схемы управления накачкой выбирается таким образом, чтобы ток не превышал величины 0,3–0,6 мА.

С течением времени при активной езде в различных климатических зонах, с использованием топлива различных марок, при наличии примесей в топливной смеси, попадании смазочных масел в камеру сгорания происходит постепенное изнашивание и старение чувствительного элемента датчика кислорода. Это приводит к тому, что при регулировании температурных режимов возникает погрешность определения сопротивления, при этом температуры могут быть на 10–30 °С выше, чем при работе нового датчика. Все это формирует процессы дальнейшего старения и разрушения чувствительного

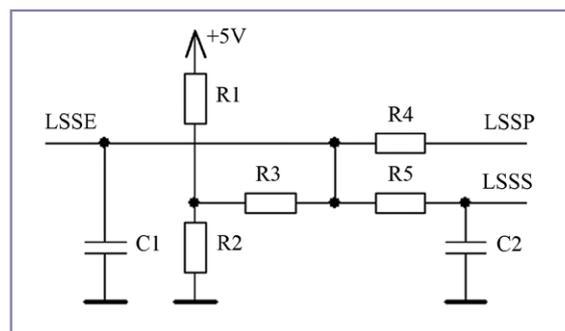


Рис. 3. Схема измерения сигнала с датчика и управления током накачки

элемента, а также нагревательного элемента пластины. Для того чтобы защитить нагревательный элемент, производителем датчика дается рекомендация по параметрам сопротивления, которое соответствует температурному режиму эффективной работы датчика. Отклонение от этого сопротивления и температуры приводит к разрушению чувствительного элемента. Поэтому важно своевременно определить износ или отравление датчика и произвести коррекцию управляющих сигналов, чтобы предотвратить преждевременный выход из строя датчика кислорода [9, 10].

Перегрев датчика ведет к последующему ускоренному старению и разрушению, поэтому существуют меры по восстановлению чувствительного элемента за счет продувки обедненной топливной смесью с большим содержанием кислорода в отработанных газах. Рабочая точка корректируется и за счет вычисления погрешности измерения сопротивления при токе накачки для известного стационарного режима работы (рис. 4).

Чувствительный элемент датчика кислорода имеет постоянный контакт с газообразным веществом – продуктом горения углеводородных смесей. При этом температура отработанных газов может быть различной: при холодном двигателе она может быть ниже нуля в момент пуска, а на прогревом двигателя может варьироваться от 350 °С до 700 °С. Наибольший интерес представляет случай, когда двигатель и нейтрализатор прогреты, т.к. на холодном нейтрализаторе бифункциональная работа невозможна. Отработанные газы не позволяют обеспечить стабильную работу датчика кислорода в условиях отсутствия регулировки температуры нагревательного элемента, интегрированного в чувствительную пластину. Поэтому малейшие изменения температуры отработанных газов приводят к изменению состояния

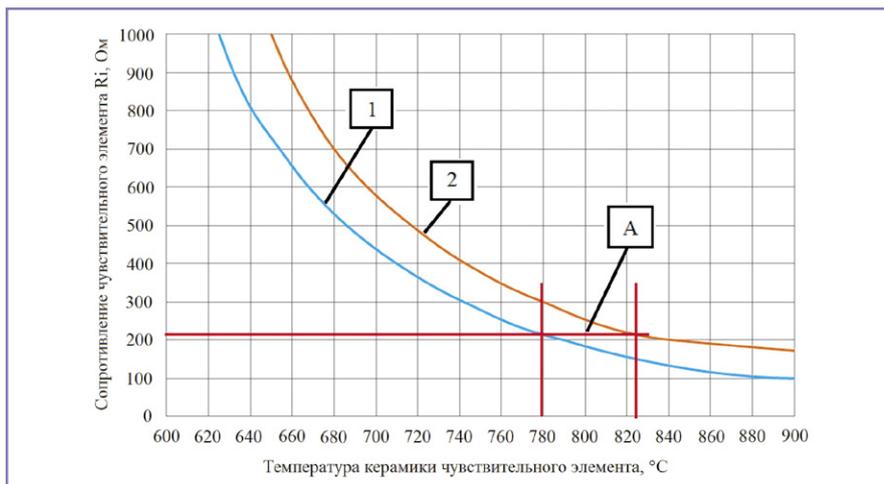


Рис. 4. Рабочий режим чувствительного элемента: 1 – график для нового датчика кислорода, 2 – график для состаренного датчика кислорода, А – диапазон температуры при регулировке по заданному сопротивлению при исправном чувствительном элементе и в процессе старения датчика

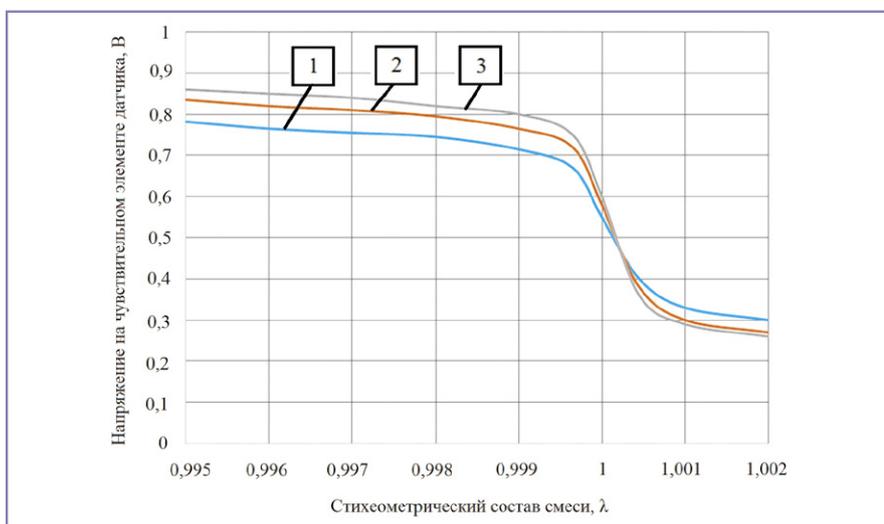


Рис. 5. Сигнал с датчика кислорода при постоянном питании нагревательного элемента напряжением 7,5 В и различной температуре отработанных газов, где кривые напряжения: 1 – $T_{газа} = 700^{\circ}\text{C}$; 2 – $T_{газа} = 500^{\circ}\text{C}$; 3 – $T_{газа} = 350^{\circ}\text{C}$

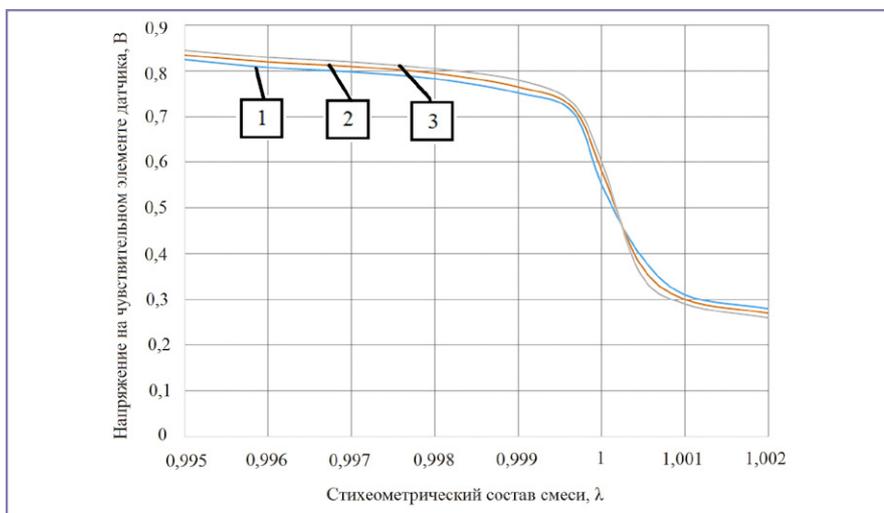


Рис. 6. Сигнал с датчика кислорода при регулировке температуры нагревательного элемента с обратной связью по сопротивлению и различной температуре отработанных газов, где: 1 – $T_{газа} = 700^{\circ}\text{C}$; 2 – $T_{газа} = 500^{\circ}\text{C}$; 3 – $T_{газа} = 350^{\circ}\text{C}$

сопротивления чувствительного элемента датчика и, как следствие, к росту погрешности измерения состава смеси. Наибольшая погрешность наблюдается при $0,995 < \lambda < 1,00$ и среднем эффективном напряжении питания нагревателя датчика $U \leq 7,5$ В (рис. 5, 6).

При использовании ШИМ регулирования температуры нагревателя по сопротивлению есть ряд преимуществ: при $0,995 < \lambda < 1,00$ и $U \leq 7,5$ В нагревателя наблюдается стабильность выходного сигнала датчика кислорода; при температурах выхлопных газов от 300°C до 700°C – отсутствие искажений кривой сигнала датчика, малая погрешность в измерении состава смеси ввиду идентичности температурного режима датчика кислорода

При прогреве чувствительной пластины датчика кислорода происходит рост сопротивления нагревательного элемента по линейному закону изменения. Это должно обуславливать специфику метода управления и математическую модель управления нагревом датчика, которая реализует метод. В процессе нагрева чувствительной пластины ограничивается мощность нагрева для того, чтобы предотвратить разрушение пластины в результате возникающего локального расширения. Мощность нагрева датчика, исходя из закона Ома, описывается соотношением:

$$P_{наг} = U_{нагр} \cdot I_{нагр} \quad (2)$$

Если учесть, что U питания прикладывается непостоянно, а с заданной скважностью сигнала, то $U_{пит}$ будет описываться соотношением:

$$U_{нагр} = \sqrt{\frac{t_{н}}{T}} \cdot U_{пит} \quad (3)$$

Отсюда следует, что мощность нагрева описывается соотношением:

$$P_{наг} = \sqrt{\frac{t_{н}}{T}} \cdot U_{пит} \cdot I_{нагр} \quad (4)$$

Следовательно, для того чтобы при низкой температуре ограничить мощность при постоянном напряжении питания и известном токе, требуется ограничить ширину импульсов следования управляющего ШИМ сигнала (рис. 7, таблица 1).

Силовой управляющий ключ выбирают, исходя из следующих условий: напряжение прямого включения (2–3) $U_{пит.макс}$; частота сигнала переключения $f = 2 \times (f_{упр})$; максимальный ток на протяжении 30 с $I = 1,5 \times I_{(-40^{\circ}\text{C})}$; максимальная мощность рассеивания $P = 1,2 \times U_{пит.макс} \times I_{(-40^{\circ}\text{C})}$; защита от $I_{кз}$ при протекании I_{max} в течение 0,5–1,5 сек.

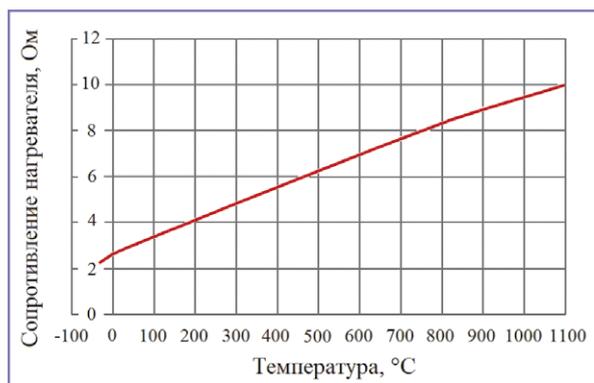


Рис. 7. Зависимость сопротивления нагревателя от температуры

Таким образом, характеристика нагревательного элемента определяет требования к силовым цепям. Излишнего быстродействия силового ключа на практике не требуется, т.к. процесс нагрева и охлаждения является инерционным и температура нагревательной пластины не изменяется скачком. Поэтому в качестве несущей частоты используют сигнал частотой 100 Гц с шагом дискретизации, равным 1% по скважности. Также эффективное напряжение питания ограничивается по длительности и амплитуде за счет регулировки скважности сигнала. Это необходимо для предотвращения перегорания чувствительного элемента на высоких температурах. При низкой температуре мощность ограничивается на уровне $P = U \times I = 2 \text{ В} \times 6 \text{ А} = 12 \text{ Вт}$. При этом стоит заметить, что при нагреве будет происходить постепенное уменьшение отдаваемой мощности ввиду увеличения сопротивления, и после того, как точка росы будет пройдена, мощность нагрева увеличивается повторно, что обеспечивает защиту компонента.

Рассмотрим требования к мощности нагрева чувствительного элемента. Мощность нагревателя датчика кислорода выбирается производителем датчиков по ключевым критериям, которые в последующем определяют стратегию управления нагревательным элементом датчика. При напряжении питания $U \approx 2 \text{ В}$ происходит испарение влаги и начальный разогрев. При этом мощность ограничивается значениями 6–12 Вт. При такой мощности нагрева сопротивление чувствительного элемента датчика начинает медленно снижаться и достигает нескольких десятков тысяч Ом.

При напряжении питания нагревателя $U \approx 10,5 \text{ В}$ происходит разогрев датчика и вывод его на рабочий режим. При этом мощность нагрева в начальный момент

Таблица 1. Типовые характеристики нагревательного элемента датчика кислорода планарного типа при различных температурах окружающей среды

Номер п.п./характеристика	Сопротивление нагревателя, Ом	Температура окружающей среды, °C	Ток через нагревательный элемент, А	Напряжение питания, В
1	2	-40	6	13
2	3	20	4,3	13
3	8	750	1,6	13

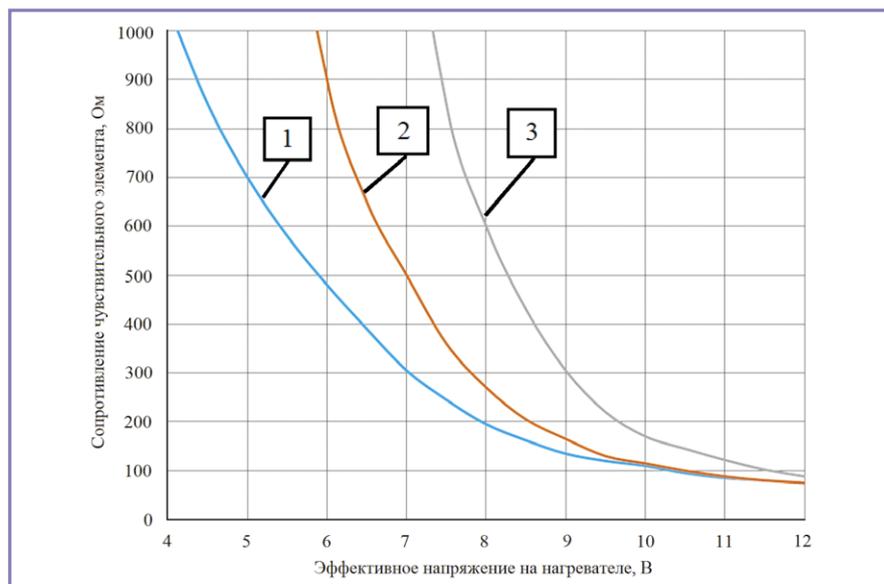


Рис. 8. Зависимость сопротивления чувствительного элемента от величины прикладываемого к нагревательному элементу напряжения при различных температурах отработанных газов при регулировке температуры датчика с обратной связью, где: 1 – $T_{\text{газа}} = 700^\circ\text{C}$; 2 – $T_{\text{газа}} = 500^\circ\text{C}$; 3 – $T_{\text{газа}} = 350^\circ\text{C}$

растет, а затем падает из-за уменьшения сопротивления нагревателя. Таким образом, в начальный момент времени мощность нагрева может составлять $P = 10,5 \text{ В} \times 4,5 \text{ А} = 47,25 \text{ Вт}$, но это значение за короткий промежуток времени падает до значения $P = 1,6 \text{ А} \times 10,5 \text{ В} = 16,8 \text{ Вт}$. Поэтому в начальный момент времени при прогреве датчика силовой ключ рассеивает больше тепла, но за короткий промежуток времени $t = 1\text{--}3 \text{ с}$ мощность, выделяемая на ключе, уменьшается и датчик выходит на режим с номинальным потреблением.

При управлении нагревателем датчика имеется некоторый запас по напряжению питания, который позволяет производить более быструю и точную регулировку температуры посредством ШИМ-сигнала в случае снижения температуры пластины. Это объясняется тем, что рабочая точка по напряжению питания расположена в интервале от 7 до

9 В, а точка максимальной мощности – на уровне 12 В и более, что позволяет даже при разряженном аккумуляторе обеспечить точность управления температурным режимом работы (рис. 8).

Для того чтобы вывести датчик на рабочий режим, при котором обеспечивается постоянство температуры чувствительного элемента, требуется выполнить несколько стадий прогрева, которые также являются необходимыми для защиты чувствительного элемента и нагревателя от разрушения (рис. 9).

Рассмотрим более подробно факторы, определяющие значение уставок при изменяющихся внешних условиях, представленные в таблице 2. К таким факторам относятся: температура выхлопных газов и величина массового расхода воздуха во впускном коллекторе и, как следствие, отработанных газов в выпускном коллекторе. Как видно из таблицы 2, большой расход воздуха при низких температурах

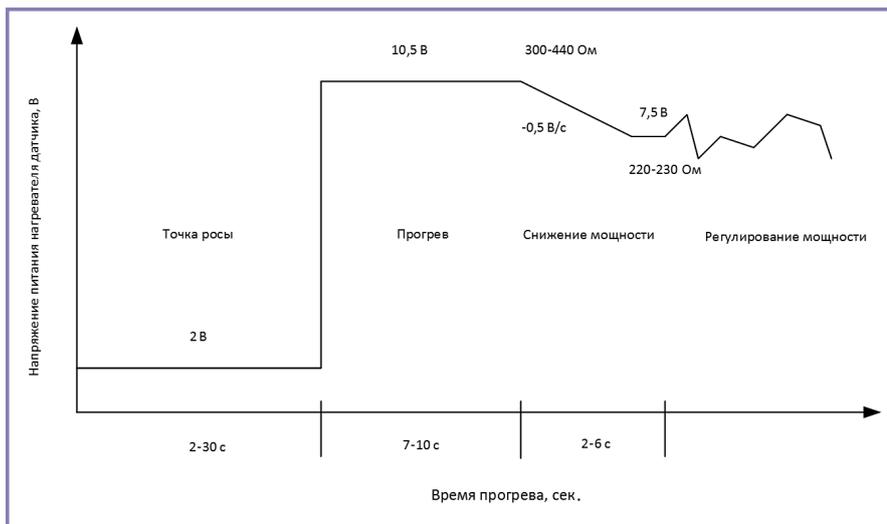


Рис. 9. Стратегия управления нагревом датчика кислорода

требует большего напряжения для питания нагревателя, а большая температура и малый расход выхлопных газов в выпускном коллекторе требуют меньшего нагрева датчика.

В связи с тем, что ускорение вывода датчика кислорода на рабочий режим обеспечивает улучшение процесса регулирования состава смеси, быстрый его прогрев будет способствовать

улучшению состава топливной смеси, и в результате продукты горения будут полностью разлагаться на составляющие, а в последующем окисляться и восстанавливаться в нейтрализаторе, что приведет к снижению токсичности по требованиям Евро-5, Евро-6.

На рис. 10 представлен график сигнала датчика кислорода, где нагреватель не интегрирован в пластину с чувствительным элементом, и, как следствие, прогрев и выход на режим происходят значительно дольше. Также для сравнения на рис. 10 представлен график, который показывает ранний выход на режим регулирования и достижение уставки по температуре для комбинированного нагревательного элемента. Ранний выход на режим позволяет более эффективно производить измерения состава смеси и управлять топливоподачей, чтобы попасть в окно бифункциональности нейтрализатора.

Получается, что датчики кислорода с интегрированным нагревателем позволяют получить более стабильный сигнал лямбда от датчика в начале ездового цикла. Другим преимуществом быстрого прогрева является раннее регулирование лямбда во время фазы прогрева нейтрализатора, кроме того, возможны диагностика и защита нейтрализатора от перегрева и разрушения. Дополнительно появляется возможность прогреть нейтрализатор с пониженным уровнем содержанием CO_2 в выхлопе при сохранении ездовых качеств.

При прогреве датчика необходимо руководствоваться требованиями европейского и американского ездовых циклов для оценки токсичности. Глядя на временную диаграмму, можно прийти к выводу, что датчик кислорода с интегрированным нагревателем обеспечивает прогрев до начала движения, что позволяет более полно сжигать топливо и снизить CO_2 (рис. 11).

В результате проведенного исследования можно сделать ряд выводов:

1. Датчик кислорода планарного типа с интегрированным нагревателем является наиболее быстродействующим и стабильным компонентом, который прогревается за наиболее короткий интервал времени и позволяет на раннем этапе выдавать достоверный сигнал лямбда о составе топливной смеси 3–5 с.

2. При регулировании температуры необходимо использовать сигнал ШИМ для изменения эффективного напряжения

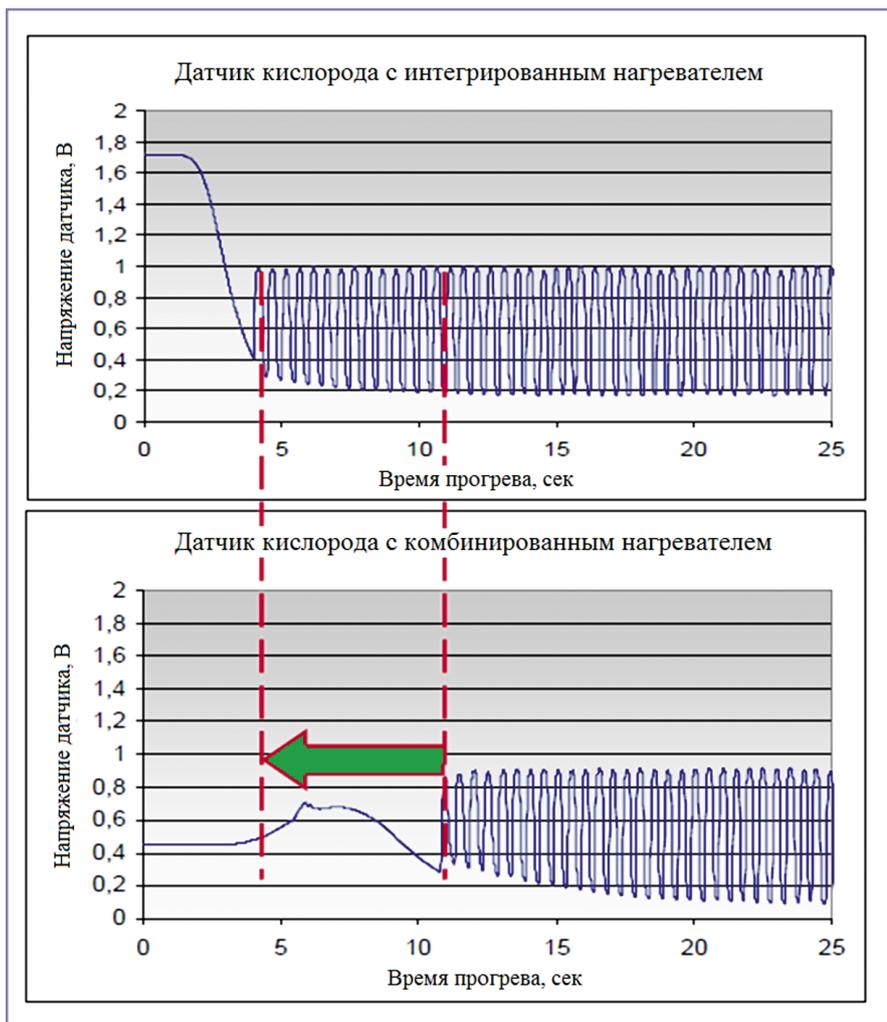


Рис. 10. График формирования сигнала двух типов датчиков кислорода: при прогреве и выходе на рабочий режим

Таблица 2. Порог эффективного напряжения питания нагревательного элемента датчика кислорода при изменяющихся внешних условиях

Температура выхлопных газов, °С	Поток выхлопных газов, кг/ч						
	6	12	28	48	96	192	384
250	7,6	7,7	7,8	8,4	8,4	9,0	9,3
350	7,6	7,6	7,7	8,4	8,4	9,0	9,2
450	7,5	7,6	7,7	7,6	8,2	8,8	8,9
550	7,5	7,5	7,7	7,7	8,0	8,2	8,7
650	7,4	7,5	7,7	7,7	7,7	7,8	8,2
750	7,2	7,3	7,4	7,4	7,4	7,5	7,9
850	6,5	6,6	6,7	6,7	6,7	6,7	6,6
900	4,5	4,6	4,7	4,8	4,8	4,8	4,7
950	0	0	0	0	0	0	0

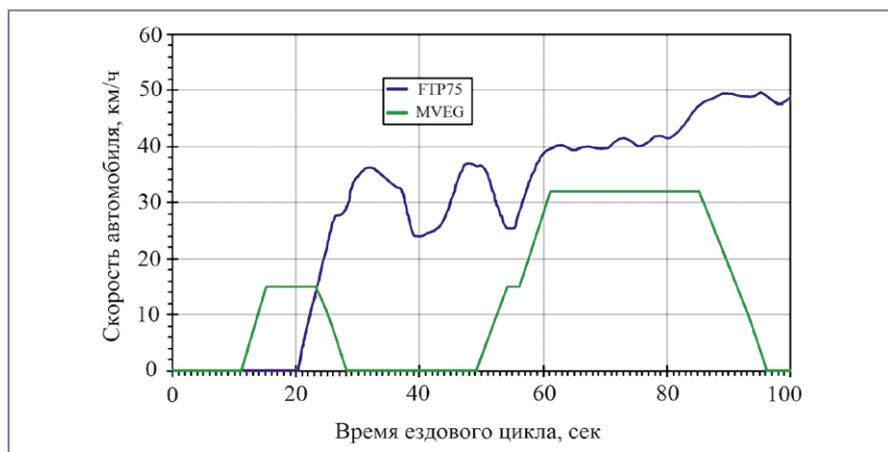


Рис. 11. Ездовые циклы для оценки токсичности: FTP75 – американский ездовой цикл (городской цикл вождения); MVEG – европейский ездовой цикл (новый европейский ездовой цикл)

с несущей частотой 10–100 Гц и величиной шага по скажности сигнала не более 1%.

3. Необходимо контролировать уровень эффективного напряжения, и оно не должно превышать заданную величину 10,5 В за интервал времени 7–10 с.

4. Необходимо обеспечить защиту датчика кислорода от перерегулирования или перегрева.

5. При снижении мощности нагрева необходимо контролировать момент достижения уставки по сопротивлению своевременного перехода в режим регулирования температуры по сопротивлению.

6. При регулировании максимальная уставка эффективного напряжения должна быть ограничена, исходя из данных таблицы 2 с учетом допуска 2–2,5 В, при этом также должен быть ограничен верхний уровень напряжения 10,5 В.

7. Чтобы датчик не был испорчен в начальный момент времени, необходимо обеспечить цикл прохождения точки росы, когда жидкость полностью испаряется с керамической пластины и отсутствуют водяные пары.

Литература

1. Дебелов В.В., Ендачев Д.В., Каменев В.Ф., Козловский В.Н. Актуализация проблемы разработки электронной системы управления нагревателем датчика кислорода автомобильного двигателя внутреннего сгорания // Электроника и электрооборудование транспорта, 2019, № 2, с. 2–4.
2. Дебелов В.В., Ендачев Д.В., Каменев В.Ф., Козловский В.Н. Разработка и реализация электронной системы управления нагревателем датчика кислорода автомобильного двигателя внутреннего сгорания // Электроника и электрооборудование транспорта, 2019, № 3, с. 2–5.
3. Козловский В.Н., Дебелов В.В. Электротехнический комплекс управления двигателем легкового автомобиля. – Самара, 2015.
4. Дебелов В.В., Козловский В.Н., Пьянов М.А., Строганов В.И. Моделирование и разработка электротехнического комплекса управления автомобилем в режимах «Старт» и «Стоп» // Грузовик, 2015, № 5, с. 15–20.
5. Козловский В.Н., Дебелов В.В., Пьянов М.А., Иванов В.В. Перспективы развития электротехнических и электронных систем управления двигателем автомобиля // Грузовик, 2015, № 8, с. 2–7.

6. Дебелов В.В., Козловский В.Н., Пьянов М.А., Строганов В.И. Концепция создания электротехнической и электронной системы управления «Start-stop» легкового автомобиля // Электроника и электрооборудование транспорта, 2015, № 1, с. 2–6.

7. Дебелов В.В., Козловский В.Н., Ютт В.Е. Электронная система управления автомобиля «Start-stop» // Электроника и электрооборудование транспорта, 2014, № 2, с. 6–9.

8. Ерохов В.И. Особенности кислородного датчика системы управления транспортных двигателей // Транспорт на альтернативном топливе, 2013, № 6 (36), с. 17–26.

9. Ерохов В.И. Системы впрыска бензиновых двигателей: конструкция, расчет, диагностика. Учеб. для вузов. – М.: Горячая линия, 2011. – 567 с.

10. Ютт В.Е. Электрооборудование автомобилей. Учебник для студентов автомобильных специальностей высших учебных заведений // Москва, 2009. Сер. Учебник для высших учебных заведений. Специальность (4-е изд., перераб. и доп.).

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 – 8 лет. В настоящее время работает заведующим отделом математического моделирования систем управления кузовной электроникой и комфорта ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». Имеет 45 публикаций, из них 25 в изданиях ВАК, 1 монографию, 3 статьи в международных базах Scopus и Web of Science.

Каменев Владимир Федорович

Родился в 1941 году. В 1967 году окончил Московский автомеханический институт по специальности «Инженер-механик». Доктор технических наук, профессор. Защитил диссертацию по теме «Научные основы и пути совершенствования токсических характеристик автомобильных двигателей с искровым зажиганием». Опыт работы – 55 лет. В настоящее время является ведущим экспертом Экспертного совета ФГУП «НАМИ», действительным членом Академии проблем качества РФ, членом Российской ассоциации автомобильных инженеров, экспертом России в КВТ ЕЭК ООН по проблемам экологической безопасности, членом SAE. Имеет 180 публикаций в рецензируемых журналах, 4 монографии, более 25 патентов на изобретение в России, США, Германии, Японии.

Козловский Владимир Николаевич

Родился в 1976 году. В 1999 году окончил Тольяттинский политехнический институт по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов». В 2010 году защитил докторскую диссертацию на тему «Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования автомобилей». Опыт работы – 20 лет. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета (СамГТУ). Автор 330 научных работ, из них более 280 в изданиях ВАК, 20 монографий, 27 статей в международных базах Scopus и Web of Science.

Шишков Александр Николаевич

Родился в 1982 году. В 2004 году окончил Южно-Уральский государственный университет по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». Кандидат технических наук, доцент. В 2007 году защитил диссертацию на тему «Асинхронный электропривод крановых механизмов с дроссельным регулированием скорости». Опыт работы – 15 лет. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Электрооборудование и промышленная электроника» Московского политехнического университета. Имеет 100 научных работ, из них 40 в изданиях ВАК, 1 монографию, 7 учебных пособий, 8 статей в международных базах Scopus и Web of Science, 7 патентов на изобретение.

Debelov Vladimir

Was born in 1989. In 2012 he graduated from Tolyatty State University with a degree in Industrial electronics. Candidate of technical sciences. In 2016 he defended his thesis on Modeling of electrical control systems of the car engine. Work experience is 8 years. At present he works as a Head of the Department of Mathematical Modeling of Body Electronics and Comfort Control Systems of SSC RF FSUE NAMI. He is the author of 45 scientific works, of which more than 25 are in the editions of the Higher attestation commission, 1 monograph, 3 articles in the international Scopus and Web of Science databases.

Kamenev Vladimir

He was born in 1941. In 1967 he graduated from the Moscow Automechanical Institute with a degree in "Mechanical engineering". Doctor of technical sciences, professor. He defended his thesis on "Scientific basis and ways to improve the toxic characteristics of automotive engines with spark ignition". Experience – 55 years. Currently he is a leading expert of the Expert council of FSUE "NAMI", a full member of the Academy of quality problems of the Russian Federation, a member of the Russian Association of automotive engineers, an expert of Russia in the UNECE ITC on environmental safety, a member of SAE. He has 180 publications in peer-reviewed journals, 4 monographs, more than 25 patents for inventions in Russia, USA, Germany and Japan.

Kozlovskiy Vladimir

Was born in 1976. In 1999 he graduated from the Togliatti Polytechnic Institute with a degree in Electrical equipment for cars and tractors. Doctor of technical sciences. In 2010 he defended his doctoral dissertation on the topic "Ensuring the quality and reliability of the electrical system of cars". Work experience is 20 years. At present he works as the head of the Department theoretical and general electrical engineering of Samara State Technical University (SamSTU). He is the author of 330 scientific works, of which more than 280 are in the editions of the Higher attestation commission, 20 monographs, 27 articles in the international Scopus and Web of Science databases.

Shishkov Alexander

Was born in 1982. In 2004 he graduated from the South Ural State University with a degree in Electric Drive and Automation of Industrial Installations and Technological Complexes. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. In 2007 he defended his thesis on "Asynchronous electric drive of crane mechanisms with throttle speed control". Work experience is 15 years. At present he is the head of the Department of Electrical Equipment and Industrial Electronics of the Moscow Polytechnic University. He has 100 scientific papers, 40 of them in the editions of the Higher Attestation Commission, 1 monograph, 7 textbooks, 8 articles in the international bases of Scopus and Web of Science, 7 patents for inventions.

Исследование характеристик бортовых источников питания обитаемых подводных аппаратов

// The investigation of aboard supply sources characteristics of inhabited underwater vehicles //

Дураков Д. Н., Куштан М. И., Лобынцев В. В., к.т.н.,
НИЦ «Курчатовский институт», Москва

Фокин С. Г., Кичко С. А., Поляшов А. А.,
Центр подводных исследований
Русского географического общества, Санкт-Петербург

Техническая готовность глубоководной техники, совокупно определяемая фактическим состоянием ее систем и узлов, является важнейшим аспектом безопасности проведения работ на различных глубинах. Энергоемкость бортовых источников питания определяет не только продолжительность кампании и автономность ОПА, но и возможность выполнения различных подводных технических работ с применением дополнительного оборудования. По этой причине регулярное проведение профилактических мероприятий относительно бортовых источников питания имеет высокий приоритет. В данной работе исследованы временные диаграммы разряда и заряда отдельных секций аккумуляторных батарей обитаемых подводных аппаратов, проведена оценка их технического состояния. **Ключевые слова:** техническая готовность, бортовые источники питания, глубоководная техника, энергоемкость, подводный аппарат.

Эксплуатация глубоководной техники предъявляет высокие требования к обслуживающему персоналу в части подготовки и проверки работоспособности систем, узлов и агрегатов перед

The technical willingness of deep-water vehicles, collectively determined by the actual state of its systems and components, is the most important aspect of the safety of operations at various depths. The power capacity of aboard power sources determines not only the duration of the campaign and the autonomy of inhabited underwater vehicles, but also the ability to perform various underwater technical work with the use of additional equipment. For this reason, regular preventive measures regarding aboard power supplies have a high priority. In this paper, time diagrams of discharge and charge the individual sections of inhabited underwater vehicles batteries are studied, and their technical condition is evaluated. **Keywords:** technical willingness, aboard supply sources, deep-water equipment, power capacity.

погружением обитаемого подводного аппарата, выполняющего широкий спектр потенциально опасных технических работ на расчетных глубинах погружения. Сердцем обитаемого подводного аппарата

является вторичный химический источник тока – перезаряжаемая аккумуляторная батарея с заданными параметрами номинального напряжения и энергоемкости [1].

В обитаемых подводных аппаратах используются различные химические источники тока, однако в последнее время предпочтение отдается батареям литиевой электрохимической системы в угоду их более высокой удельной энергоемкости в расчете как на литр занимаемого объема, так и на килограмм массы. Ресурс аккумуляторных батарей, измеряемый числом циклов заряд/разряд, конечен, вследствие чего с течением времени в процессе их эксплуатации наблюдается снижение энергоемкости. О разбалансе элементов литий-ионных аккумуляторных батарей по напряжению говорить не приходится ввиду установки электронных систем балансировки, одновременно следящих за уровнем напряжения заряда, однако имеет место разбаланс токов.

Аккумуляторные батареи трех исследованных обитаемых подводных аппаратов производства компании U-Boat Worx (Нидерланды) типа C-Explorer 3.11 (2014 г.в.), C-Quester 3.5 (2012 г.в.) и C-Explorer 5.8 (2013 г.в.) [2–4], интенсивно эксплуатируемых Центром подводных исследований Русского географического общества (рис. 1), секционированы и согласно паспортным данным имеют два уровня номинального напряжения: 130 В с энергоемкостью секции 7,056 кВт·ч и 24 В с энергоемкостью секции



а)



б)



в)

Рис. 1. Обитаемые подводные аппараты: C-Explorer 3.11 (а), C-Quester 3.5 (б) и C-Explorer 5.8 (в)

2,744 кВт·ч. Верхняя и нижняя уставки по напряжению для батареи с номинальным напряжением 130 В составляют соответственно 152 В и 119 В, а для батареи с номинальным напряжением 24 В соответственно 29,5 В и 23 В. Электрически секции (tube) соединяются по схеме двух узлов через полумостовое устройство диодной защиты, которое в аналоговом режиме уравнивает секции по напряжению при питании бортовых потребителей.

Снятие разрядных характеристик предварительно дозаряженных секций аккумуляторных батарей проводилось с использованием балластного сопротивления, имеющего принудительное воздушное охлаждение, диапазон регулирования 9,72–0,28 Ом и максимальную рассеиваемую тепловую мощность 220 кВт. В ходе проведения экспериментов регистрирующей станцией Yokogawa DX2030 в едином масштабе времени снимались показания напряжения и тока в нагрузку (рис. 2) от каждой секции в отдельности, которые

поочередно отсоединялись от полумостового устройства диодной защиты. Температура секций аккумуляторных батарей контролировалась по показаниям системы управления аппарата и не превысила 30°C.

В ходе разряда 24 В секции № 3, имевшей сравнительно наименьший процент заряда, наблюдались колебания напряжения и тока с последующим их выравниванием, связанные с изменением электрохимического баланса внутри элементов. Изменение напряжения на клеммах секций аккумуляторных батарей при отключении нагрузки происходит практически скачкообразно без его значительного увеличения с течением времени, что говорит о стойкости полимерного электролита и невозможности частичного восстановления уровня заряда за счет его разложения. В целом секции № 3 и 4 (как 130 В, так и 24 В) аккумуляторных батарей имели сравнительно меньший уровень запасенной энергии. Интегральные характеристики секций по результатам

обработки разрядных кривых по рис. 2 приведены в таблице 1, где W_n – энергия, выделившаяся в нагрузку, кВт·ч; W_{in} – энергия источника питания, кВт·ч; W_{in} – энергия потерь внутри аккумуляторной батареи и в подводящих кабелях, Вт·ч; Δ_0 – остаточная энергоемкость на конец процесса разряда, %; P – остаточный ресурс, %, который рассчитывался согласно выражению

$$P = \frac{W_n}{W_0} \cdot 100\% + \Delta_0, \quad (1)$$

где W_0 – энергоемкость аккумуляторной батареи по паспорту аппарата.

По завершении снятия разрядных характеристик секций аккумуляторных батарей последние были подключены к полумостовому устройству диодной защиты для синхронного заряда. Ввиду того что включить Yokogawa DX2030 в цепь заряда не представлялось возможным, регистрация параметров (рис. 3–5) проводилась по показаниям бортового компьютера. Несмотря на то что параметры остаточной емкости батарей на конец

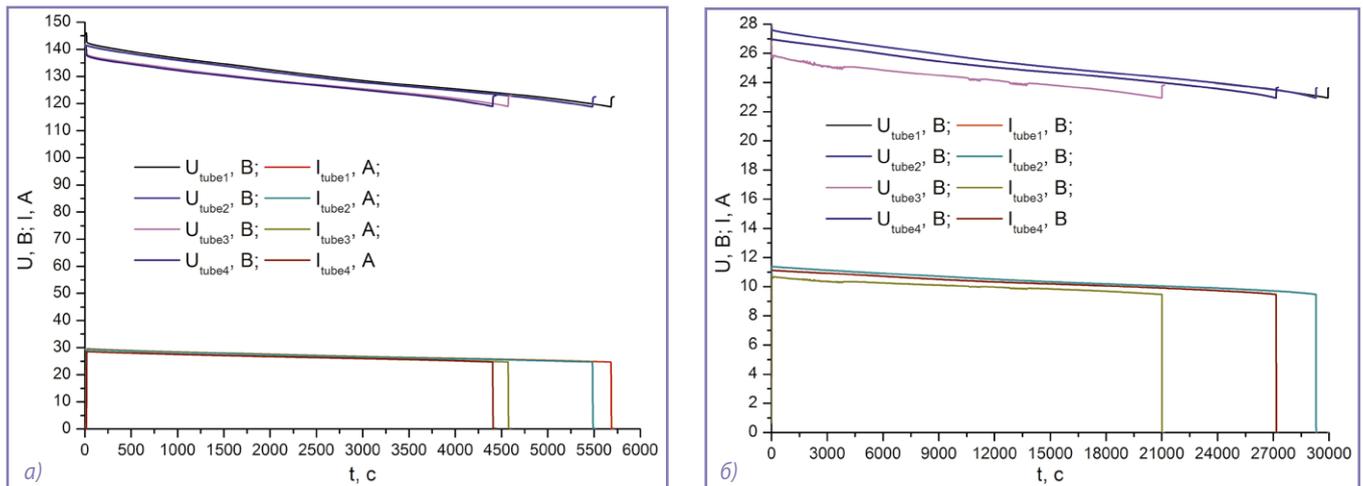


Рис. 2. Разрядные кривые напряжения и тока секций 130 В (а) и 24 В (б) аккумуляторных батарей обитаемого подводного аппарата C-Explorer 3.11

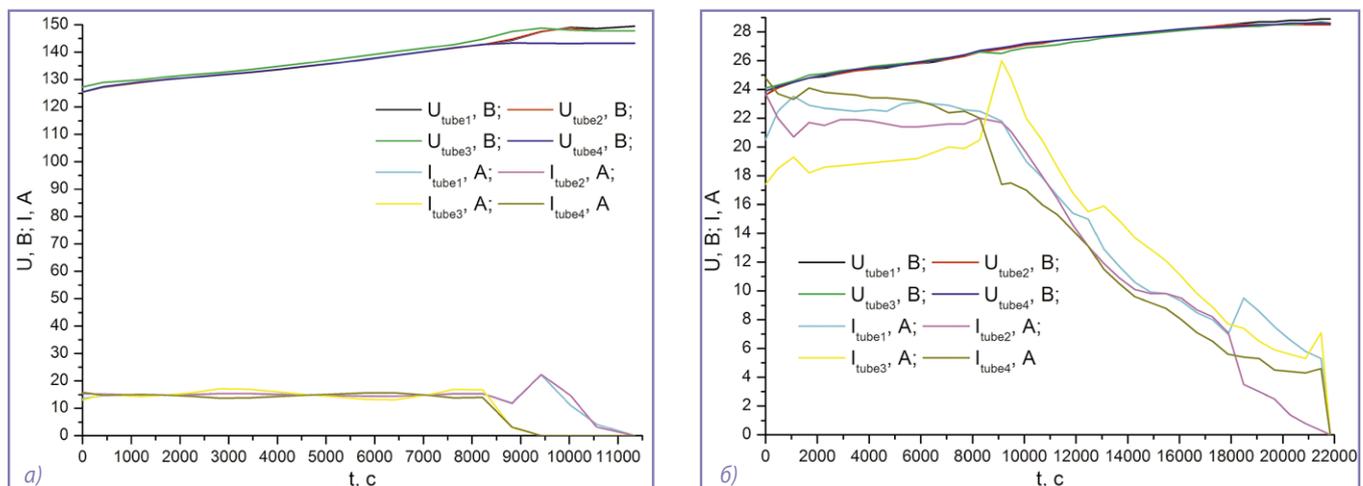


Рис. 3. Кривые напряжения и тока заряда секций аккумуляторных батарей 130 В (а) и 24 В (б) обитаемого подводного аппарата C-Explorer 3.11

Таблица 1. Интегральные характеристики секций по результатам обработки разрядных кривых

№ секции	U, В	R _н , Ом	W _н , кВт·ч	W _н , кВт·ч	W _н , Вт·ч	Э _н , %	P, %
1	130	4,87	5,56	5,58	67,50	19	98,39
2			5,31	5,38	64,80	18	94,20
3			4,32	4,36	47,00	16	77,84
4			4,15	4,20	50,09	14	73,53
1	24	2,47	2,25	2,36	112,29	10	95,95
2			2,14	2,18	41,50	16	95,56
3			1,43	1,45	27,65	10	62,98
4			1,94	1,98	37,68	14	86,09

разряда оставались отличными от нуля, на этапе заряда система управления обнулила эти показания для трех из четырех секций 24 В батареи, вдвое снизив их для всех секций батареи с номинальным напряжением 130 В (рис. 4).

Как видно из рис. 3, блоки полупроводникового зарядного устройства работают синхронно, будучи связаны только по первичной сети. Этим объясняется бросковое изменение зарядных токов в смежных блоках при отключении секций аккумуляторных батарей по достижении верхнего предела напряжения заряда и/или снижении зарядного тока до нулевых значений.

Из рис. 4 видно, что секции № 3 и 4 аккумуляторной батареи с номинальным напряжением 130 В отключились по минимальному значению тока заряда на 8820 с, приняв отличный от 100-процентного уровень электрической энергии. Повторное подключение этих секций на заряд не привело к их дозаряду, равно как не произошло перебалансировки секций относительно остаточной емкости на момент начала заряда. Вместе с тем повторное включение на заряд секции 2-й батареи с номинальным напряжением 24 В, отключившейся на 18480 с, привело

к ее дозаряду и перебалансировке системы контроля уровня заряда батарей с выравниванием энергоемкости секций с учетом остаточной энергоемкости на момент начала заряда. Температура секций аккумуляторных батарей в процессе заряда (рис. 5), несмотря на значительный разброс, не превысила 35°C, что существенно ниже уставки по температуре предупредительной сигнализации, составляющей 50°C.

Интегральные характеристики секций по результатам обработки зарядных кривых на рис. 3, помимо остаточной емкости на момент начала заряда, включая тепловыделение внутри элементов секций аккумуляторных батарей, приведены в таблице 2.

Полученные значения хорошо согласуются в процентном отношении с показаниями бортового компьютера C-Explorer 3.11 для секций батареи 130 В по порядку соответственно: 100, 99, 85, 82 и для секций батареи 24 В по порядку соответственно: 94, 94, 96, 97.

Исследование характеристик аккумуляторных батарей обитаемого подводного аппарата C-Quester 3.5 после их дозаряда началось со снятия по отдельности разрядных кривых двух секций с номинальным напряжением 24 В, показавших значительный разброс интегральных показателей, приведенных в таблице 3. При этом разрядные характеристики обеих

Таблица 2. Интегральные характеристики секций по результатам обработки зарядных кривых

U, В	№ секции	1	2	3	4
130	W, кВт·ч	6,511	6,510	5,872	5,080
	%	92,28	92,27	83,22	72,00
24	W, кВт·ч	2,633	2,356	2,531	2,497
	%	95,95	85,86	92,24	91,00

Таблица 3. Характеристики аккумуляторных батарей обитаемого подводного аппарата C-Quester 3.5

№ секции	U, В	R _н , Ом	W _н , кВт·ч	W _н , кВт·ч	W _н , Вт·ч	Э _н , %	P, %
1	130	4,87	5,97	6,09	118,9	13	99,35
2			5,97	6,07	105,8	13	99,10
1	24	2,47	2,27	2,31	44,23	8	92,22
2			1,64	1,67	30,26	14	74,98

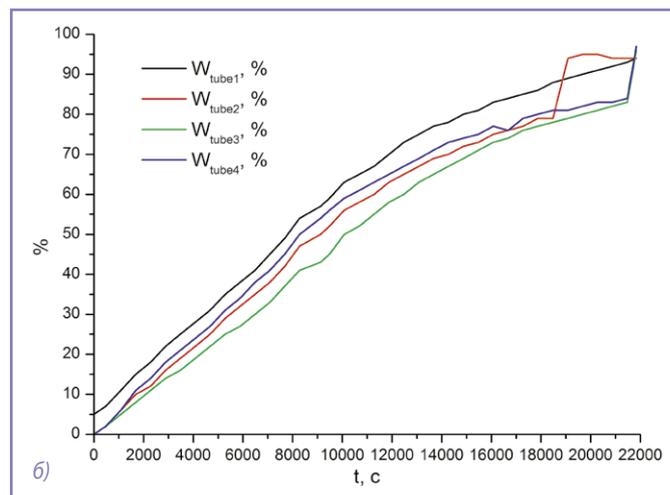
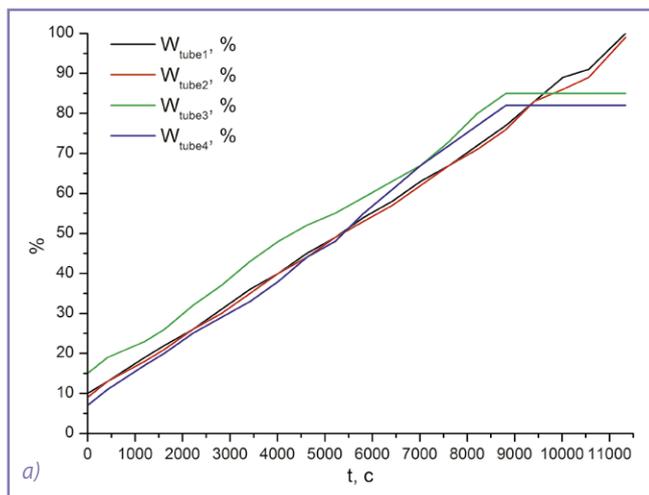


Рис. 4. Зависимости энергии заряда секций аккумуляторных батарей 130 В (а) и 24 В (б) обитаемого подводного аппарата C-Explorer 3.11

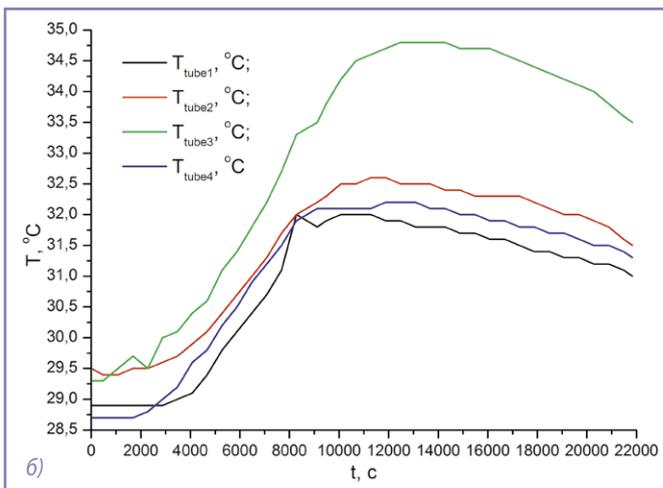
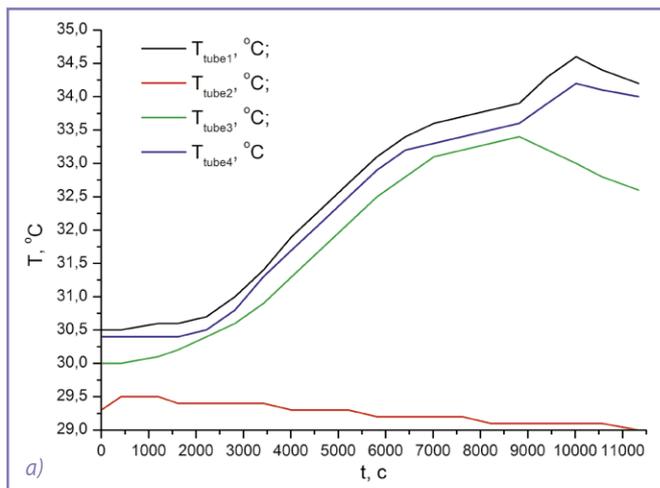


Рис. 5. Зависимости изменения температуры секций аккумуляторных батарей 130 В (а) и 24 В (б) обитаемого подводного аппарата C-Explorer 3.11 в ходе заряда

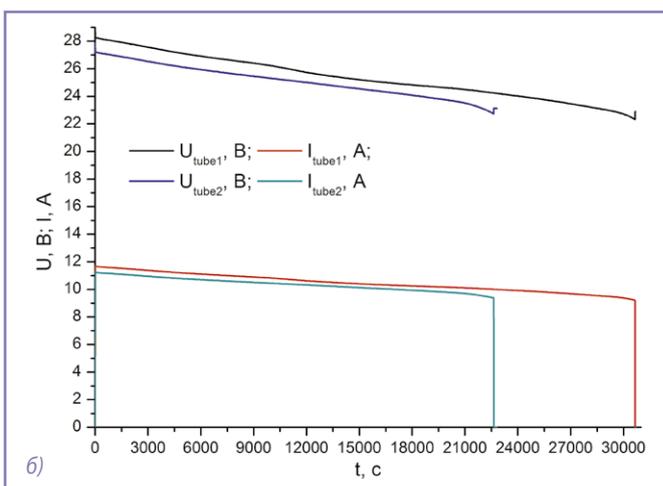
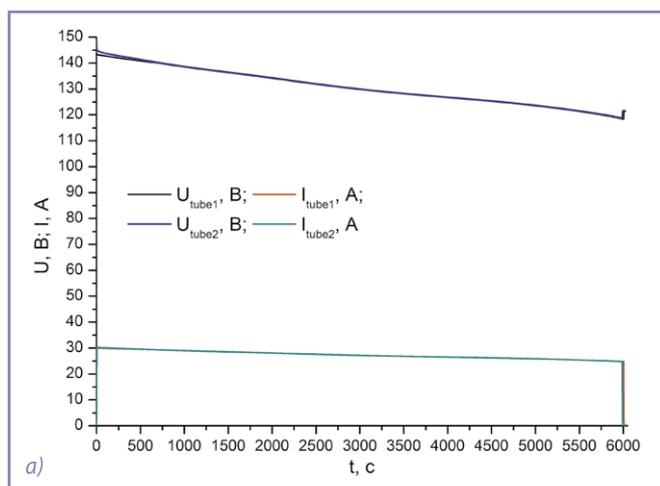


Рис. 6. Разрядные кривые напряжения и тока секций 130 В (слева) и 24 В (справа) аккумуляторных батарей обитаемого подводного аппарата C-Quester 3.5

секций батареи с номинальным напряжением 130 В продемонстрировали превосходную синхронность (рис. 6) и хорошее согласие интегральных показателей, свидетельствующих о достойном уровне их технического состояния. Параметры температуры секций в ходе разряда по показаниям бортового компьютера не превысили 30°C, что говорит об относительно невысоком уровне объемных тепловыделений внутри элементов.

Кривые заряда 130 В аккумуляторных батарей не снимались по причине необходимости консервации аппарата на длительное хранение при уровне их заряда 50%, а также превосходного технического состояния. Вместе с тем синхронный заряд обеих секций 24 В аккумуляторных батарей был проведен в полном объеме ввиду необходимости периодической проверки систем обитаемого подводного аппарата.

Как видно из рис. 7, отключение второй секции 24 В батареи произошло

спустя 14 580 с заряда на уровне запасенной энергии 81% (рис. 8а), а при ее повторном подключении дозаряда не последовало. Вместе с тем отключение первой секции произошло по истечении 22 620 с заряда на уровне запасенной энергии 100% без превышения допустимой температуры (рис. 8б). Синхронный заряд обеих секций аккумуляторной батареи не обеспечил выравнивания их энергоемкости, что в силу особенностей бортовой схемы электропитания, допускающей перекрестную работу секций, накладывает на пилота дополнительные требования в ходе

выполнения подводно-технических работ по контролю положения соответствующего переключателя и уровня заряда секций.

Интегральные характеристики секций по результатам обработки зарядных

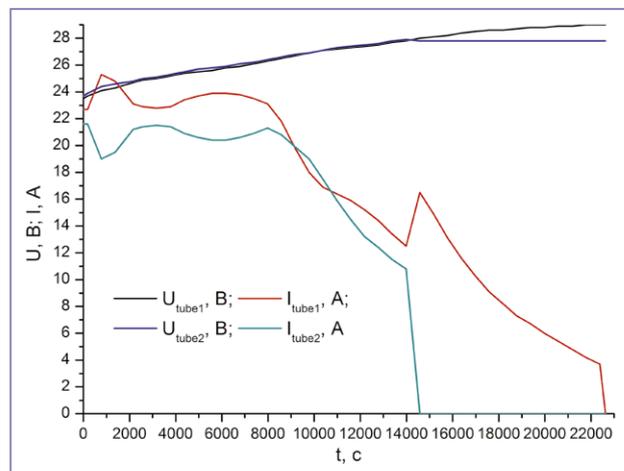


Рис. 7. Кривые напряжения и тока заряда секций аккумуляторных батарей 24 В обитаемого подводного аппарата C-Quester 3.5

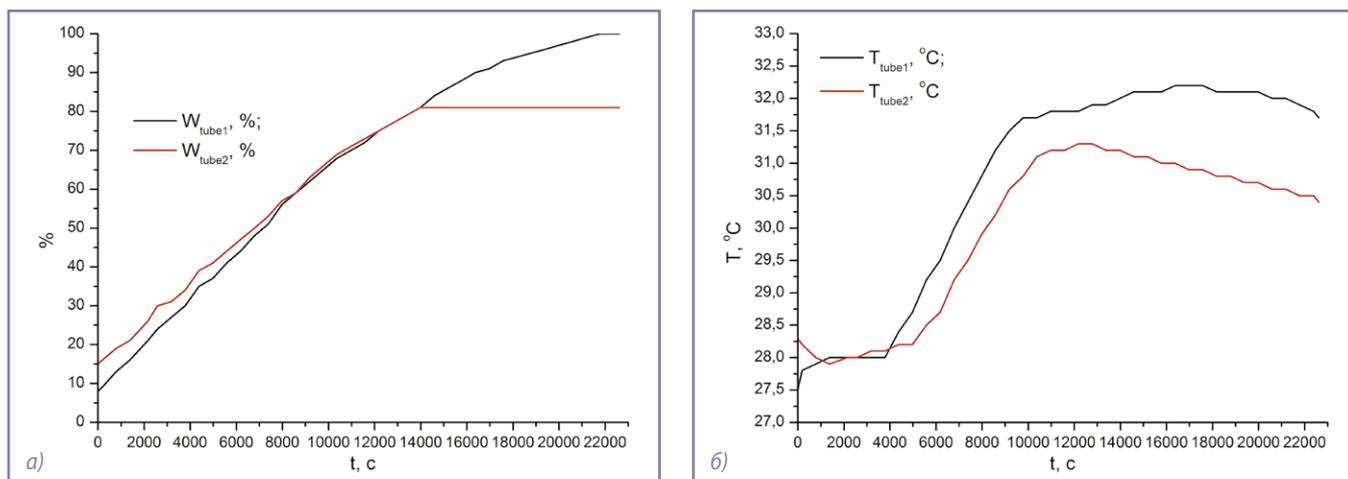


Рис. 8. Зависимости изменения энергии заряда (а) и температуры секций 24 В аккумуляторной батареи (б) обитаемого подводного аппарата C-Quester 3.5 в ходе заряда

кривых на рис. 7, помимо остаточной емкости на момент начала заряда, включая тепловыделение внутри элементов первой и второй секций 24 В аккумуляторной батареи, составили соответственно 2,737 кВт·ч и 1,893 кВт·ч, в процентном выражении – 99,74% и 68,99%. Если учесть остаточную емкость на момент заряда за вычетом тепловыделения внутри элементов секций аккумуляторной батареи, то полученные данные хорошо согласуются с показаниями бортового компьютера.

Наиболее интересным для изучения характеристик бортовых источников питания оказался обитаемый подводный аппарат C-Explorer 5.8, длительный время простоя без использования и технического обслуживания. Если два других обитаемых подводных аппарата с определенной периодичностью в навигационный период выполняют погружения, то влияние времени и отсутствие профилактических циклов заряда/разряда на техническое состояние аккумуляторных

батарей C-Explorer 5.8 предстояло выяснить.

Следует отметить, что разряд секций 24 В аккумуляторных батарей с целью сокращения времени выполнялся удвоенным током, в отличие от двух других обитаемых подводных аппаратов. По этой причине уровень восстанавливающегося напряжения на клеммах секций при отключении нагрузки оказался практически вдвое выше (рис. 9б), а их температура не превысила 27°C.

Отдельного внимания заслуживают секции аккумуляторной батареи номинальным напряжением 130 В. В частности, первая секция показала нулевой уровень заряда, что может быть обусловлено наличием поврежденных модулей, основной причиной выхода из строя которых являются множественные локальные короткие замыкания электродов ввиду повреждения сепаратора. Вместе с тем выявить поврежденные модули первой секции без полной ее разборки не представлялось

возможным. Оставшиеся секции из дозаряженного состояния в процессе разряда (рис. 9а) показали вполне удовлетворительные параметры энергоемкости и остаточного ресурса, однако их отключение бортовой системой управления произошло по недостижению нижнего порога срабатывания в 119 В: № 2–125,16 В; № 3–125,27 В; № 4–132,11 В. Данное обстоятельство при ненулевых токах разряда, а также достаточно высокой остаточной емкости (таблица 4) свидетельствует о неправильной работе бортовой системы управления, преждевременно отключающей работоспособные секции. Кроме того, неправильная работа бортовой системы управления может быть одной из причин выхода из строя первой секции.

Нестабильная работа бортовой системы управления обитаемого подводного аппарата C-Explorer 5.8 не позволила выполнить синхронный заряд секций аккумуляторных батарей и определить его интегральные параметры. Вместе с тем

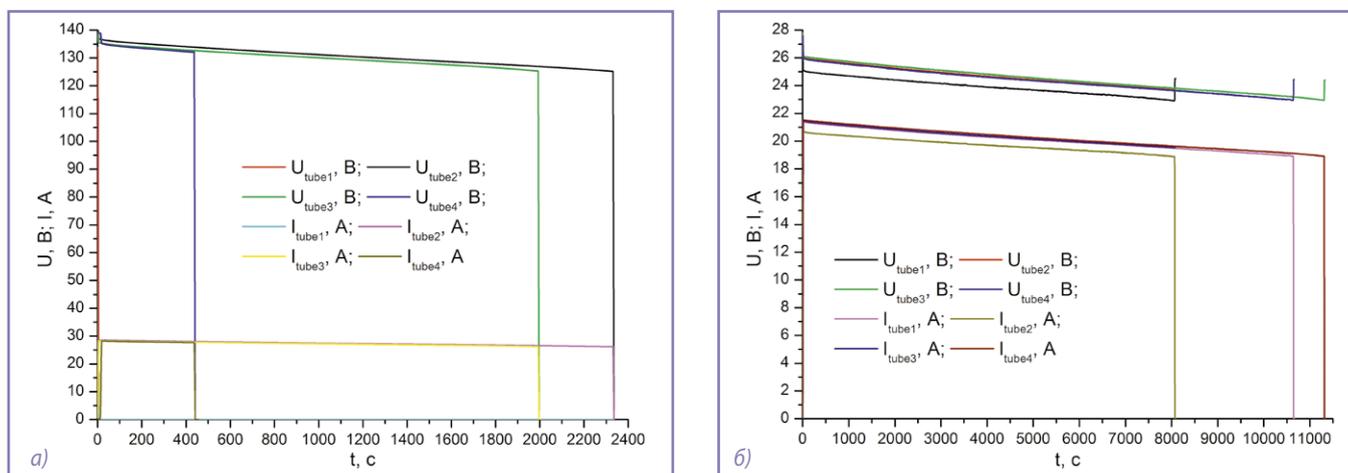


Рис. 9. Разрядные кривые напряжения и тока секций 130 В (а) и 24 В (б) аккумуляторных батарей обитаемого подводного аппарата C-Explorer 5.8

Таблица 4. Характеристики аккумуляторной батареи напряжением 130 В

№ секции	U, В	R _н , Ом	W _н , кВт·ч	W _н , кВт·ч	W _н , Вт·ч	Э _с , %	P, %
1	130	4,87	0	0	0	0	0
2			2,314	2,359	45,4	47	80,43
3			1,964	2,004	39,09	41	69,39
4			0,452	0,461	8,91	61	67,54
1	24	1,24	1,059	1,083	23,64	20	59,46
2			1,132	1,158	25,63	15	57,19
3			1,550	1,585	35,05	22	79,76
4			1,445	1,478	32,64	22	75,85

проведенные измерения позволили выявить неисправные элементы, а также определить наиболее вероятные причины их повреждения.

Выводы

В ходе исследования характеристик бортовых источников питания обитаемых подводных аппаратов отмечены характерные режимы работы литий-ионных аккумуляторных батарей в пределах уставок по верхнему и нижнему уровням напряжения, обеспечивающих их эксплуатацию в пределах пропорциональности, то есть на линейном участке изменения напряжения в процессе разряда. Выполненный комплекс измерений показал, что энергоёмкость аккумуляторных батарей не используется на 100% даже при полном их разряде, что, в свою очередь, говорит о необходимости введения лечебных циклов. Отмечена высокая надёжность защиты входящих в секции аккумуляторных батарей отдельных блоков, в положительном полюсе каждого из которых установлена засыпная плавкая вставка, обеспечивающая бездуговое отключение цепи короткого замыкания. В целом проведенный комплекс исследований обеспечил приобретение бесценного опыта работы с обитаемыми подводными аппаратами, их узлами и системами.

Литература

1. Кедринский И.А., Дмитренко В.Е., Поваров Ю.М., Грудянов И.И. Химические источники тока с литиевыми электродами. – Красноярск: Изд. Краснояр. ун-та, 1983. – 247 с.
2. Maintenance manual C-Explorer 3 Submersible, 2014, p. 516.
3. Описание систем ОПА C-Quester 3, 2016, p. 43.
4. Maintenance manual C-Explorer 5 Submersible, 2014, p. 279.

Дураков Дмитрий Николаевич

Родился в 1989 году. В 2012 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Электроснабжение электрических железных дорог». Опыт работы – 7 лет. В настоящее время работает инженером-исследователем в НИЦ

«Курчатовский институт». Имеет 6 научных публикаций.

Куштан Максимилиан Игоревич

Родился в 1993 году. Опыт работы – 3 года. В настоящее время работает механиком экспериментальных стендов НИЦ «Курчатовский институт» и является студентом РУТ (МИИТ). Имеет 1 научную публикацию.

Лобынцев Владимир Васильевич

Родился в 1980 году. В 2003 году окончил Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) по специальности «Электроснабжение электрических железных дорог». Кандидат технических наук. В 2009 году защитил диссертацию по теме «Сверхпроводниковые ограничители токов короткого замыкания для систем тягового электроснабжения». Опыт работы – 23 года. В настоящее время работает начальником лаборатории НИЦ «Курчатовский институт», доцентом кафедры «Электроэнергетика транспорта» РУТ (МИИТ). Имеет 57 научных публикаций, 2 монографии, 3 патента на изобретение, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Фокин Сергей Георгиевич

Окончил экономический факультет Санкт-Петербургского государственного университета. В 2011 году получил диплом программы Executive MBA на базе Института подготовки специалистов оборонно-промышленного комплекса и инфраструктурных отраслей НИУ ВШЭ по направлению «Управление реформируемым предприятием ОПК». Опыт работы – 10 лет. В настоящее время работает исполнительным директором Центра подводных исследований Русского географического общества – заместителем начальника Экспедиционного центра Министерства обороны Российской Федерации. Имеет 1 научную публикацию.

Кичко Степан Александрович

Родился в 1988 году. В 2012 году окончил Балтийский государственный технический университет им. Д.Ф. Устинова «Военмех» по специальности «Боеприпасы и средства поражения». Опыт работы – 11 лет. В настоящее время работает начальником проектно-инженерного отдела Центра подводных исследований Русского географического общества. Имеет 1 патент, 1 программу для ЭВМ, 2 технологии (ноу-хау).

Поляшов Александр Александрович

Родился в 1986 году. В 2009 году окончил Балтийский государственный технический университет им. Д.Ф. Устинова «Военмех» по специальности «Информационно-измерительная

техника и технологии». Опыт работы – 12 лет. В настоящее время работает ведущим инженером проектно-инженерного отдела Центра подводных исследований Русского географического общества. Имеет 1 научную публикацию, 2 патента, 2 программы для ЭВМ, 2 технологии (ноу-хау).

Durakov Dmitry

He was born in 1989. In 2012 he graduated from the Moscow State University of Transport (MIIT) majoring in “Electrical power supply of electric railways”. He has 7 years of work experience. At present he works as research engineer at the National research center “Kurchatov Institute”. He has 6 scientific publications.

Kushtan Maksimilian

Was born in 1993. Has 3 years of working experience. At present he is a mechanic of experimental stands of NRC “Kurchatov Institute” and a student at Russian University of Transport (MIIT). He has 1 scientific publication.

Lobyntsev Vladimir

He was born in 1980. In 2003 he graduated from the Moscow State University of Transport (MIIT) majoring in “Electrical power supply of electric railways”. He is candidate of technical sciences. In 2009 he defended his thesis on “Superconductive fault current limiters for traction energy systems”. He has 23 years of work experience. At present he works as the head of the laboratory of NRC “Kurchatov Institute”, as associate professor in Electric power of transport department at Russian University of Transport (MIIT). He has 57 scientific publications, 2 monographs, 3 patents for invention, 1 certificate of registration for software application.

Fokin Sergey

He graduated from the faculty of economics of St. Petersburg State University. In 2011 he received an Executive MBA program diploma on the base of the Institute for the training of specialists of the military-industrial complex and infrastructure industries of the Higher school of economics in the management of the reformed enterprise of the defense industrial complex department. Work experience is 10 years. At present he works as the executive director of the Center for underwater research of the Russian geographical society – deputy head of the Expedition center of the Ministry of defense of the Russian Federation. He has 1 scientific publication.

Kichko Stepan

Was born in 1988. In 2012 he graduated from the Baltic State Technical University named after D.F. Ustinov “Voennmekh” with a degree in “Ammunition and means of destruction”. Work experience is 11 years. At present he is the head of the design and engineering department of the Center for underwater research of the Russian geographical society. He has 1 patent, 1 computer program, 2 technologies (know-how).

Polyashov Alexander

Was born in 1986. In 2009 he graduated from the Baltic State Technical University named after D.F. Ustinov “Voennmekh” with a degree in “Information-measuring equipment and technologies”. Work experience is 12 years. At present he works as a leading engineer in the design and engineering department of the Center for underwater research of the Russian geographical society. He has 1 scientific publication, 2 patents, 2 computer programs, 2 technologies (know-how).

Оценка надежности перспективных схем подключения микропроцессорных систем релейной защиты тяговой сети переменного тока

// Reliability estimation of perspective microprocessor relay protection connecting schemes for AC traction network //

Пинчуков П. С., к.т.н., доцент,
Макашева С. И., к.т.н., доцент,
Мамаев А. Р.,
ДВГУПС, Хабаровск

В работе исследуются численные показатели надежности работы микропроцессорных устройств релейной защиты при различных схемах организации локальной вычислительной сети (ЛВС) в системе электроснабжения железных дорог. Актуальность исследования обусловлена активной модернизацией энергетического комплекса за счет внедрения информационных технологий в системах управления технологическими процессами. В связи с отсутствием в настоящее время в железнодорожном комплексе нашей страны нормативной базы для оценки надежности цифровых систем релейной защиты и автоматики в данной работе были использованы схемы подключения и требования технологического проектирования для электроэнергетических цифровых подстанций, что позволило адаптировать их исполнение для тяговых подстанций переменного тока железнодорожного транспорта и впервые произвести сравнение показателей надежности новых и существующей (традиционной) схем. Приводятся пошаговые примеры составления топологических схем замещения по надежности, выполнены моделирование и анализ деревьев отказов с учетом показателей надежности элементов на примере действующей тяговой подстанции.

Ключевые слова: надежность, цифровая подстанция, релейная защита, дерево отказов.

Курс на цифровизацию экономики и промышленности является приоритетным в стратегии развития Российской Федерации, причем особое внимание уделяется вопросам развития энергетической инфраструктуры как одному из условий экономического роста [1]. Спрос на цифровые технологии в энергетическом

The paper studies numerical indicators of reliability of microprocessor relay protection devices for various schemes of local area network (LAN) organization at the AC railway power supply system. The relevance of the research is due to the active modernization of the energy complex through the introduction of information and digital technologies in process control systems. Due to the current lack of a regulatory framework for assessing the reliability of digital relay protection and automation systems in Russian railways, this paper uses connection schemes and technological design requirements for digital power substations, which allows adapting their design for AC railway traction substations and comparing the reliability indicators of new and existing (traditional) schemes, which is a scientific novelty. Step-by-step examples of drawing up topological replacement schemes for reliability are given, modeling and fault tree analysis are performed, taking into account the reliability indicators of elements on the example of an existing traction substation.
Keywords: reliability, digital substation, relay protection, fault tree.

секторе обусловлен сложностью и масштабностью технологических процессов и высокими потребностями в моделировании [2]. Однако внедрение цифровых технологий в электроэнергетических системах осложнено целым рядом практических проблем, например, недостатком опыта работы с новыми устройствами

и системами, отсутствием оценки надежности работы цифровых систем, необходимостью расчета и оценки каждого предлагаемого варианта развития цифровых систем с учетом особенностей конкретных объектов инфраструктуры [3]. В частности, эти аспекты характерны и для систем релейной защиты и автоматики (РЗА), предназначенных для обеспечения бесперебойной работы энергосистемы и потому требующих повышенного внимания. На этот факт указывают и результаты опросов представителей электросетевых предприятий, выделивших обеспечение безопасности и диагностику состояния оборудования как приоритетные задачи в рамках цифровой трансформации [4].

Целью данной работы является практическая оценка показателей надежности РЗА при модернизации трансформаторных подстанций и переходе на цифровые технологии с учетом требований к технологическому проектированию цифровых подстанций. Переход на сложные телекоммуникационные системы может быть сопряжен с ухудшением показателей надежности электроустановок, как показано в расчетах, приводимых в [5–8]. Об этом же свидетельствует статистика отказов Объединенной энергетической системы (ОЭС) Востока за 2019 год, согласно которой на отказы микропроцессорных устройств РЗА приходится четверть, а на ошибки персонала (в том числе связанные с вводом в эксплуатацию новых устройств и систем) – около половины всех аварийных событий [6].

Перспективам внедрения цифровых систем РЗА в железнодорожном тяговом электроснабжении при проектировании цифровых тяговых подстанций необходимо уделить особое внимание, поскольку имеется специфика, связанная с работой тяговой сети и исполнения ее защиты, значительно отличающейся от защиты присоединений обычных трансформаторных подстанций. Дело в том, что применяемые в настоящее время стандарты [9] и руководящие указания [10] не предполагают

применения элементной базы, позволяющей осуществить передачу данных в соответствии со стандартами МЭК для цифровых подстанций. Применяемые протоколы ModBus TCP/IP и АСУТП тяговых подстанций могут предполагать наличие развернутой локальной сети Ethernet и послужить основой для последующей модернизации, однако единой практики их применения в нашей стране до сих пор не сформировалось. В связи с этим решение задачи модернизации тяговых подстанций становится строго индивидуальным и в случае применения МЭК 61850 будет производиться без опоры на существующую инфраструктуру. Это значит, что актуальным вопросом исследования становится оценка возможных способов внедрения новых стандартов для последующей их технико-экономической оценки и выбора оптимального проектного решения.

Применение стандарта МЭК 61850 предполагает использование единых протоколов передачи цифровых сообщений для управления различными подсистемами подстанции. Задачи телемеханики, релейной защиты, автоматики и автоматизированной системы управления технологическим процессом, регистрации аварийных событий, мониторинга состояния оборудования, учета и контроля качества электроэнергии решаются многофункциональными цифровыми устройствами, объединенными в единую сеть с центральным сервером подстанции последовательными каналами связи. Возможность реализации одним микропроцессорным устройством нескольких функций обеспечивает гибкость системы, а единая информационная сеть между такими устройствами позволяет без потерь распределить по подстанции функциональную нагрузку.

При использовании шины процесса (Process Bus по МЭК 61850-1) все сигналы, включая мгновенные значения токов и напряжений, оцифровываются непосредственно в аппарате полевого уровня подстанции и передаются устройствам защиты и автоматики в виде цифрового потока данных по общей информационной сети. Этим обусловлена зависимость надежности систем РЗА цифровой подстанции от работы ЛВС. Для обеспечения надежности ЛВС установлены требования к протоколам передачи данных и топологии сети подключения устройств к шине процесса. Требования к времени восстановления работы коммуникационных сетей для компонентов цифровой подстанции указаны

в стандарте МЭК 61850-5. Так, за время восстановления устройств, подключенных к шине процесса и передающих цифровые сигналы по протоколу Sampled Values, может быть потеряно не более двух последовательных пакетов; восстановление связи должно быть осуществлено без задержки – бесшовно. Для обеспечения бесшовности восстановления используются протоколы резервирования сетевых систем, закрепленные в МЭК 62439-3: параллельного резервирования (Parallel Redundancy Protocol, PRP) и бесшовного резервирования среды высокой готовности (High Availability Seamless Redundancy, HSR). Эти протоколы соответствуют действующим Требованиям к технологическому проектированию цифровых подстанций [11]. Однако не все существующие на трансформаторных подстанциях топологии сетей совместимы с новыми стандартами, что осложняется наличием множества несовместимых проприетарных протоколов передачи аналоговой и цифровой информации.

До цифровизации подстанций надежность информационных сетей обычно обеспечивалась относительно простыми схемами резервирования. Так, во многих странах промышленным стандартом является архитектура RSTP (Rapid Spanning Tree Protocol, быстрый протокол разворачивающегося дерева), относящаяся к схемам динамического резервирования. Группы устройств объединены в участки сети через собственные коммутирующие устройства, соединяющиеся с центральным сервером. Коммутирующие устройства таких групп соединены между собой, за счет чего при отказе кабельной линии между одной из групп устройств и сервером трафик

перенаправляется через оставшиеся связи между коммутаторами. Такая схема проста и широко распространена, однако даже в случае оптимизации топологии не позволяет без задержки восстановить работу подключаемых устройств.

Также популярна схема статического резервирования, осуществляемая за счет дублирования каналов связи между устройством полевого уровня и терминалом РЗА. При отказе одного из подключений СС устройства (в данном случае измерительные трансформаторы тока ТА и напряжения TV) продолжают обмен информацией с блоками релейной защиты RL по оставшемуся медному проводу. Для обеспечения надежности для цепей управления используются независимые источники оперативного тока GB. Топология этой схемы отражена на рис. 1 и будет использована для дальнейшего анализа как наиболее распространенная.

Протокол параллельного резервирования основывается на параллельной работе двух независимых сетей и дублировании информационных сообщений в сетях. Каждый пакет, отправляемый устройством, дублируется и одновременно передается по обеим сетям. В нормальном режиме до принимающего устройства доходят оба пакета данных, но не одновременно из-за различающихся скоростей передачи в независимых сетях. Принимающее устройство отбрасывает последний полученный пакет в нормальном режиме или принимает единственный пакет в случае отказа одной из сетей, за счет чего возможна бесшовная передача данных.

Такому протоколу соответствует схема «двойная звезда», представляющая собой радиальную структуру с сетевыми

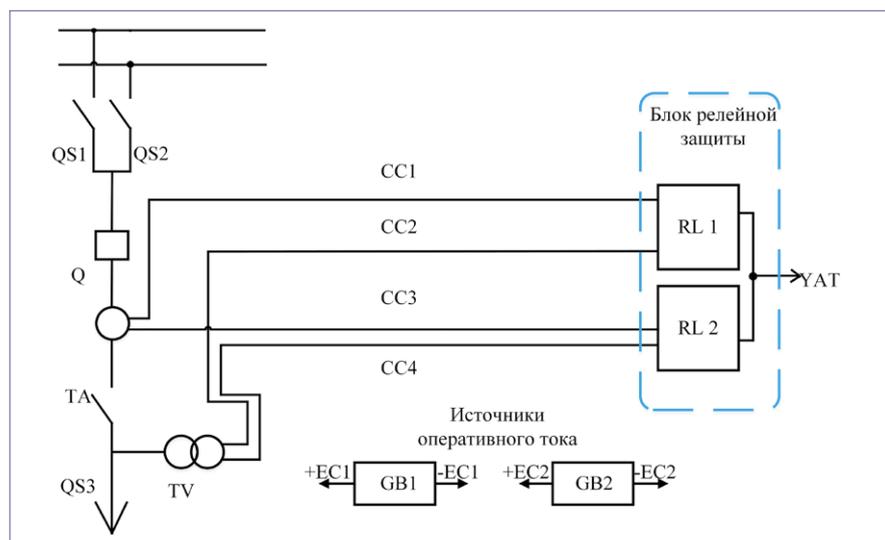


Рис. 1. Традиционная схема ЛВС

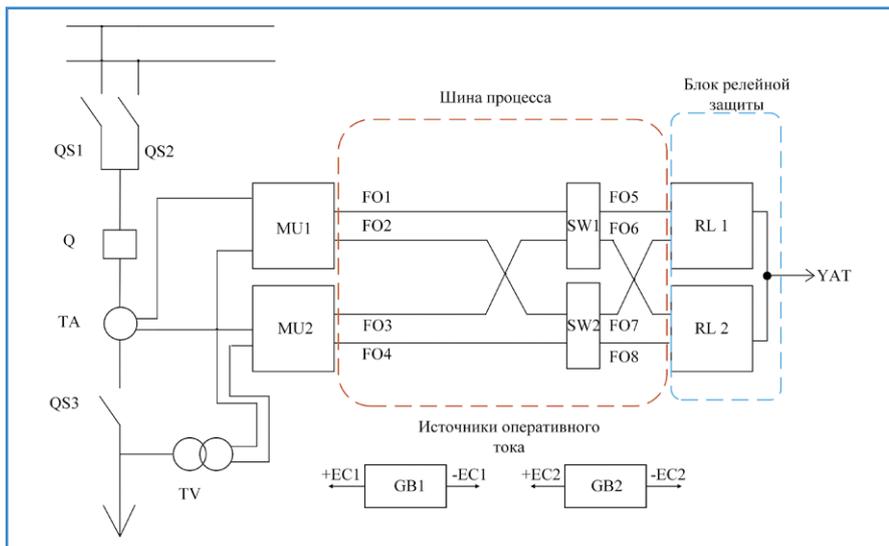


Рис. 2. Схема подключения ЛВС «двойная звезда»

коммутаторами в центре и устройствами полевого уровня на периферии. Для обеспечения надежности работы систем РЗА требуются основная и резервная защиты, что для схемы (рис. 2) достигается использованием полевых устройств с резервированными сетевыми портами, подключенных к мультиплексорам MU с помощью оптических кабелей FO, и парой терминалов РЗА с резервированными сетевыми портами, также подключенных к коммутаторам SW и выполняющих функции основной и резервной защит.

Протокол бесшовного резервирования систем высокой готовности предназначен для кольцевых топологий. Каждое устройство в сети имеет два присоединения (DAN), используемых для соединения всех устройств в замкнутое кольцо. Каждое устройство передает информацию, дублируя пакеты данных и отправляя

их по обоим направлениям через все устройства в кольце до центрального сервера. Устройства, не имеющие второго порта (SAN), подключаются к сети через специальные устройства, играющие роль виртуального второго порта (RedundancyBox; RedBox). Для обособленных групп устройств также могут создаваться собственные кольца, соединяемые с основной схемой посредством совместимых с HSR коммутаторов (QuadBox). Принимающее устройство получает не одновременно два пакета данных, последний из которых отбрасывается. Для ограничения циркуляции сигналов по сети передающее устройство отбрасывает пакеты, прошедшие полный круг.

Для реализации протокола применим схему «двойное кольцо», топология которой приведена на рис. 3. Каждое измерительное устройство подключается к двум

устройствам сопряжения с шиной (УСШ), которые последовательно соединены оптическими кабелями каждый с соответствующим терминалом РЗА и между собой. Для замыкания кольца также соединяются последовательно терминалы РЗА.

Для расчета показателей надежности схем составим деревья отказов и выполним их анализ. Применение такой модели обеспечивает наглядность и значительно упрощает расчет схем со сложной топологией. При составлении схем замещения и дальнейших расчетах допущены следующие упрощения:

- поскольку исследуется надежность топологии, не учитываются показатели надежности измерительных трансформаторов и силовых коммутационных аппаратов;
- расчетный срок – 4380 часов, что соответствует периодичности технических осмотров аппаратуры и вторичных цепей подстанции и позволяет не учитывать параметры восстановления оборудования [12, 13].

Рассмотрим традиционную схему подключения. Для составления дерева отказов необходимо определить события, приводящие к отказу системы. Работа релейной защиты в аварийном режиме невозможна при одновременном отказе обеих аккумуляторных батарей GB1 и GB2, что приведено на дереве отказов (рис. 4) логическим элементом «И» (&). Для прекращения работы терминала РЗА достаточно обрыва одного из кабелей, ведущих к измерительным трансформаторам, или отказа самого терминала, что отражено логическим элементом «ИЛИ» (OR). Однако отказом системы будет являться прекращение работы обоих терминалов, для чего

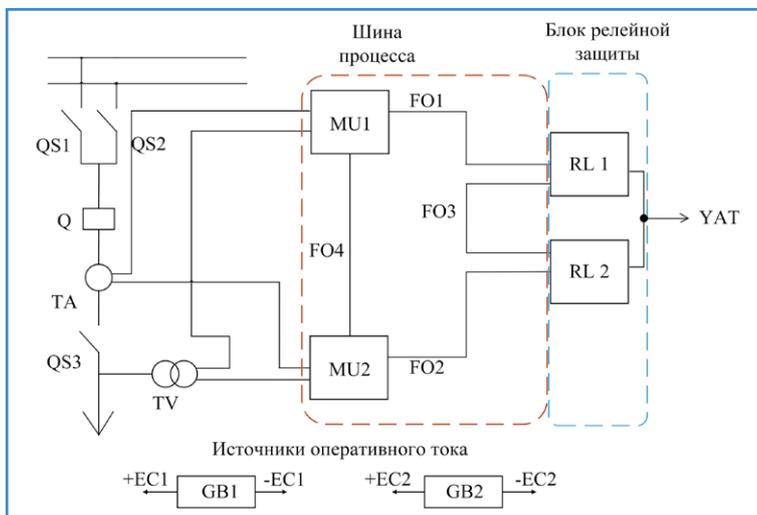


Рис. 3. Схема подключения ЛВС «двойное кольцо»

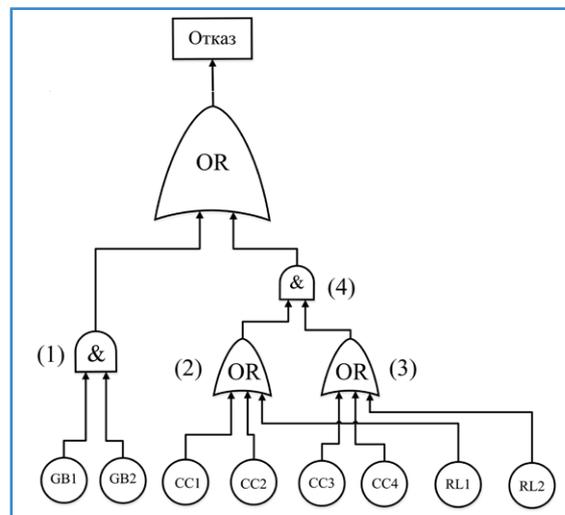


Рис. 4. Дерево отказов традиционной схемы подключения ЛВС

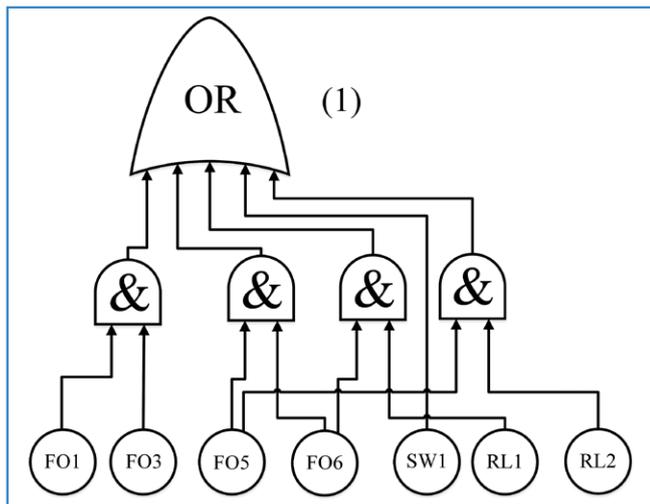


Рис. 5. Дерево отказов независимой сети в схеме «двойная звезда»

применим элемент «И». Полученная схема отражает все возможные причины отказов системы и позволяет выявить наиболее уязвимые узлы.

Дерево отказов для схемы «двойное кольцо» составим поэтапно ввиду большого количества элементов и взаимосвязей между ними. К отказу системы РЗА может привести отсутствие показаний тока или напряжения, то есть одновременный отказ кабелей FO1 и FO3, отказ кабелей FO5, FO6 между коммутатором SW1 и терминалами РЗА, отказ коммутатора SW1. Также к отказу работы сети может привести нарушение связи между коммутатором и терминалом РЗА при отказе второго терминала РЗА. Изобразим это на элементе (1) на рис. 5. Элемент (1) рассматривает события в первой независимой сети «звезды», элемент (2) – во второй. Элемент (3) учитывает, что при отказе одной сети вторая продолжает работать независимо. Элементы (4) и (5) описывают работу УСШ, к которым подключены измерительные приборы. Элемент (7) отражает требование к питанию цепи оперативным током, элемент (8) – к резервированию защит. Полученная схема (рис. 6) представляет собой искомого дерево отказов для схемы «двойная звезда»

В схеме соединения ЛВС «двойное кольцо» (рис. 7) каждый элемент, участвующий в системе РЗА, продублирован, однако все элементы соединены последовательно. Отказом системы является одновременный отказ двух точек «кольца» или одновременный отказ обоих источников оперативного тока. Отметим, что отказом не является нарушение в работе соединительных кабелей FO3 и FO4, которые необходимы для реализации протокола HSR. При отказе этих кабелей функциональность схемы не меняется, но

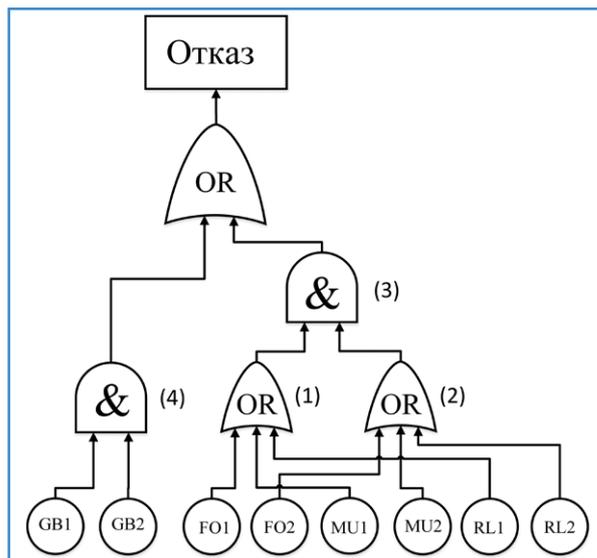


Рис. 7. Дерево отказов схемы «двойное кольцо»

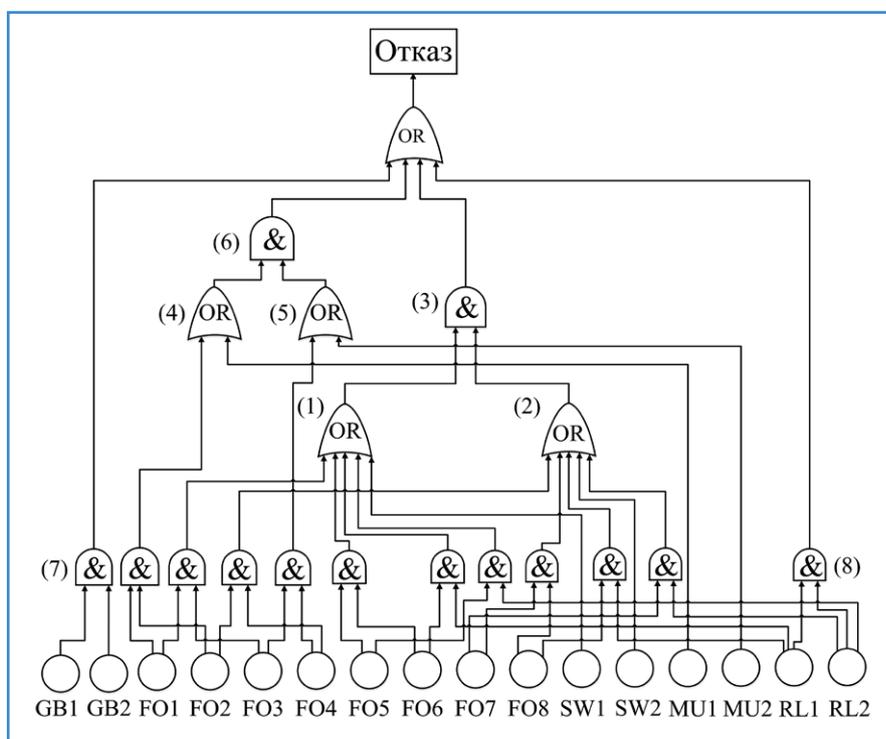


Рис. 6. Дерево отказов схемы «двойная звезда»

снижается скорость передачи данных, увеличивается вероятность отказа системы.

Расчеты и анализ деревьев отказов произведем, используя экспоненциальный закон распределения отказов и параметры надежности оборудования, применяемого на действующей подстанции, приведенные в таблице 1. Результаты численной оценки вероятности безотказной работы различных схем подключения микропроцессорных систем РЗА сведем в таблицу 2.

В заключение проделанной работы отметим, что результаты произведенных расчетов показывают изменение показателей

надежности локальной вычислительной сети при переходе на новые коммуникационные стандарты, что значительно влияет на работу микропроцессорных систем РЗА. Так, расчетное значение вероятности безотказной работы для систем РЗА для схемы «двойное кольцо» ниже, чем для традиционной схемы ($0,9975560 < 0,9978814$).

При использовании схемы «двойная звезда», наоборот, показатели надежности повышаются: вероятность безотказной работы со значения $0,9979914$ (традиционная схема) повышается до значения $0,9984287$ («двойная звезда»). Таким

Таблица 1. Основные показатели для расчета вероятности безотказной работы оборудования подстанции

Наименование оборудования	Среднее время наработки на отказ, ч	Интенсивность отказов, 1/ч
Терминал P3 SIEMENS 7SA522	125 000	–
Кабельная линия (1 м КВВГЭнг(А)-LS 7×4)	–	$5,87 \cdot 10^{-9}$
Волоконно-оптическая линия (1 км)	–	$1,19 \cdot 10^{-9}$
Устройство сопряжения с шиной процесса ENMU	280 000	–
Коммутатор MOXA EDS-408A	363 000	–
Батареи аккумуляторные	–	$2,50 \cdot 10^{-7}$

Таблица 2. Вероятность безотказной работы для систем РЗА различной топологии

Топология сети	Вероятность безотказной работы, R
Традиционная	0,9979914
«Двойная звезда»	0,9984287
«Двойное кольцо»	0,9975560

образом, при сравнении двух рекомендованных схем («двойная звезда» и «двойное кольцо») при переходе на новые коммуникационные стандарты предпочтение следует отдавать схеме «двойная звезда».

Вместе с тем на надежность работы микропроцессорных систем РЗА влияет также и ряд других факторов: степень подготовленности персонала, надежность используемого оборудования, правильность его наладки и эксплуатации, а также новые возможности, которые открывает внедрение цифровых технологий: удаленная диагностика и прогнозирование состояния оборудования, расширение числа анализируемых статистических данных за счет работы с большими данными, использование более точных значений данных с меньшими задержками по времени, расширение возможностей автоматизации процесса управления. Перечисленные факторы также нуждаются в дальнейшей детальной оценке, что позволит произвести более эффективную адаптацию систем РЗА при переходе к цифровым технологиям в соответствии со стандартами МЭК 61850.

Литература

1. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/43027> (дата обращения 20.11.2020).
2. Туровец Ю.В., Вишневецкий К.О. Стандартизация цифрового производства: возможности для России и ЕАЭС // Бизнес-информатика, 2019, т. 13, № 3, с. 78–96.
3. Технологу ЦПС нужно развивать сообща! / Цифровая подстанция, 2015. URL: [https://digitalsubstation.com/blog/2015/11/18/kruglyj-stoltsentralizovannye-i-detsentralizovannye-sistemy-](https://digitalsubstation.com/blog/2015/11/18/kruglyj-stoltsentralizovannye-i-detsentralizovannye-sistemy-releynoj-zashhity-i-avtomatiki/)

releynoj-zashhity-i-avtomatiki/ (дата обращения 19.09.2020).

4. Мозохин А.Е., Шведенко В.Н. Анализ направлений развития цифровизации отечественных и зарубежных энергетических систем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2019, т. 19, № 4, с. 657–672.
5. Макашева С.И. Расчет показателей надежности цифровой подстанции / С.И. Макашева, П.С. Пинчуков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика», 2019, т. 19, № 4, с. 41–51.
6. Зубков Д.В., Пинчуков П.С. Анализ особенностей микропроцессорных устройств релейной защиты // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке, 2019, т. 1, с. 62–66.
7. Pinchukov P., Makasheva S. Estimation of Digital Substation Reliability Indices // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020, т. 1115 AISC, Pp. 3–14.
8. Pinchukov P., Makasheva S. Improving Methods for Reliability Assessment of Electric Power Systems // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2018, pp. 162–169.
9. ГОСТ Р 57121–2016. Терминалы присоединений интеллектуальные для распределительных устройств тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств тягового электроснабжения железной дороги. Технические требования.
10. Руководящие указания по релейной защите систем тягового электроснабжения. – М., Трансиздат, 2005. – 216 с.
11. СТО 34.01–21–004–2019. Цифровой питающий центр. Требования к технологическому проектированию цифровых подстанций напряжением 110–220 кВ и узловых цифровых подстанций напряжением 35 кВ. Стандарт организации ПАО «Россети», 2019.
12. СТО 34.01–4.1–005–2017. Правила технического обслуживания устройств релейной защиты, автоматики, дистанционного управления и сигнализации на объектах электросетевого комплекса. Стандарт организации ПАО «Россети», 2017.
13. Пинчуков П.С., Макашева С.И. Устройства цифровой релейной защиты и автоматики: классификация и особенности составления схем надежности // Энергоэксперт, 2020, № 2 (74), с. 42–47.

Пинчуков Павел Сергеевич

Родился в 1977 году. В 1999 году окончил ДВГУПС по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик». Кандидат технических наук, доцент. В 2004 году защитил диссертацию по теме «Комплекс релейных защит внешнего и тягового электроснабжения 25 кВ». Опыт работы – 21 год. В настоящее время работает директором Электроэнергетического института ДВГУПС, доцентом кафедры «Системы электроснабжения» ДВГУПС. Имеет более 60 опубликованных работ, из которых 12 статей на иностранном языке, входящих в Scopus и Web of Science, 9 учебно-методических пособий, 2 патента на изобретение, 1 патент на полезную модель.

Макашева Светлана Игоревна

Родилась в 1975 году. В 1997 году окончила ДВГУПС по специальности «Инженер путей сообщения – электромеханик». Кандидат технических наук, доцент. В 2020 году защитила диссертацию по теме «Влияние рекуперативного торможения на качество напряжения и эффективность работы системы тягового электроснабжения». Опыт работы – 23 года. В настоящее время работает доцентом кафедры «Системы электроснабжения» ДВГУПС. Имеет более 70 опубликованных работ, из которых 12 статей на иностранном языке, входящих в Scopus и Web of Science, 14 учебно-методических пособий, 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель, 1 зарегистрированная программа для ЭВМ.

Мамаев Александр Романович

Родился в 1997 году. В настоящее время является студентом пятого курса Электроэнергетического института ДВГУПС. Имеет 5 научных статей.

Pinchukov Pavel

Born in 1977. In 1999 he graduated from DVGUPS with a degree in "Railway engineer – electrician". Candidate of technical sciences, associate professor. In 2004 he defended his dissertation on the topic "Complex of relay protection of external and traction power supply of 25 kV". Work experience – 21 years. Currently he works as the director of the Electric Power Institute of DVGUPS, associate professor of the Department of Power supply systems of DVGUPS. He has more than 60 published works, including 12 articles in a foreign language, included in Scopus and Web of Science, 9 teaching aids, 2 patents for an invention, 1 patent for a utility model.

Makasheva Svetlana

Born in 1975. In 1997 she graduated from DVGUPS with a degree in "Railway engineer – electrician". Candidate of technical sciences, associate professor. In 2020 she defended her dissertation on the topic "The influence of regenerative braking on the quality of voltage and the efficiency of the traction power supply system". Work experience – 23 years. Currently he is an associate professor of the Department of Power supply systems of the DVGUPS. He has more than 70 published works, including 12 articles in a foreign language, included in Scopus and Web of Science, 14 teaching aids, 1 patent for an invention, 1 patent for a utility model, 1 registered computer program.

Mamaev Alexander

Born in 1997. Currently he is a fifth-year student of the Electric Power Institute of DVSUPS. He has 5 scientific articles.

Создание экспертной диагностической системы электропривода автомобиля

// Creation of an expert diagnostic system for the electric drive of a car //

**Чебоксаров А. Н., к. т. н., доцент,
СибАДИ, Омск**

В статье рассмотрены вопросы, связанные с разработкой экспертной системы самодиагностики, применительно к силовой части электропривода автомобиля. Описана процедура формирования базы данных экспертной системы. Приведена функциональная схема интегрированной системы самодиагностики.

Ключевые слова: автомобиль, электропривод, диагностика, экспертная система, аккумуляторная батарея.

The article deals with the issues related to the development of an expert system of self-diagnosis, in relation to the power part of the electric drive of the car. The procedure of forming the database of the expert system is described. The functional diagram of the integrated self-diagnosis system is given.

Keywords: car, electric drive, diagnostics, expert system, battery.

Обновление состава автотранспортных средств происходит все интенсивнее. Автомобили с электрическим приводом (ЭП) в этой гонке занимают первые позиции. Такая тенденция определяет актуальность оперативного контроля технического состояния автомобилей данного класса в процессе их эксплуатации.

На борту современных автомобилей используются интегрированные диагностические системы, способные выполнять пассивные (информирование) и активные (поддержание работоспособности) функции во время транспортного процесса. Основу таких систем составляют микропроцессорные устройства, в которых воплощены экспертные программы.

Диагностические системы для проверки механических и электрических систем современного автомобиля, которые основаны на измерениях электрических величин, можно классифицировать по нескольким общим признакам: степени автоматизации (неавтоматические, автоматизированные или автоматические); способу реализации (электронные, компьютеризированные или компьютерные); месту размещения (снаружи, интегрированные); назначению (информационные, самодиагностики, адаптации, резервирование). Современные бортовые диагностические системы представляют собой программные продукты компьютерной

диагностики, интегрирующиеся в автомобильные системы управления [1].

Экспертная система (ЭС) – программа, использующая экспертные знания специалистов для обеспечения эффективного решения неформализованных задач в интерактивном режиме. Для неформализованных задач характерны определенные признаки: задачи не могут быть заданы в числовой форме; цели нельзя выразить в терминах точно определенной целевой функции; не существует алгоритмического решения задачи; наличие признаков ложности, неоднозначности и противоречивости исходных данных. Программы ЭС используются в системах управления и средствах компьютерной диагностики автомобилей [2].

Оперативный контроль диагностических параметров электрического привода автомобилей позволяет своевременно установить факт наличия неисправности, локализовать место повреждения и повлиять на систему с целью исключения аварийной ситуации. Наиболее подробную информацию о техническом состоянии электрической машины можно получить методом спектрального анализа токов в цепях его питания [3].

В [4] проведены виртуальные исследования электрических процессов в силовых цепях системы ЭП с синхронным вентильным двигателем, который питается

от высоковольтной аккумуляторной батареи (ВАБ). Доказано, что параметры, характеризующие спектральный состав функции тока разряда тяговой ВАБ, как нельзя лучше удовлетворяют требованиям, предъявляемым к диагностическим параметрам с позиций информативности, чувствительности и технологичности измерения. Следующим шагом в [5] проведено исследование Matlab-моделей систем ЭП в режиме двигателя и генератора как объектов диагностики путем спектрального анализа функции тока в цепи ВАБ. Вид спектрограмм, полученных по результатам моделирования, оправдывает направление исследований.

Исследования по данному направлению состоят из нескольких этапов: анализа структуры электрического привода как объекта диагностики; построения имитационных моделей и моделирования эксплуатационных режимов ЭП; формирования базы данных экспертной системы; реализации измерительного канала и анализатора спектра текущих данных (системы мониторинга). Целью исследований на данном этапе является синтез диагностической системы для идентификации технического состояния ЭП автомобиля.

Первичными задачами при этом являются определение процедуры формирования базы данных экспертной системы и построение функциональной схемы диагностической системы.

Процедура формирования базы данных экспертной системы заключается в наблюдении функции спектрального состава тока в цепи питания ЭП и накопления диагностической информации во время имитации повреждений ее элементов в эксплуатационных режимах. При решении второй задачи следует предусмотреть выполнение нескольких активных функций диагностики: аварийное отключение электропитания во время пуска ЭП, проверка ЭП на режиме холостого хода; адаптация управляющих воздействий

и резервирования функциональных блоков во время транспортного процесса.

Регистрация неисправности во время пуска позволяет избежать тяжелых последствий. Тестирование на холостом ходу предотвращает аварийную ситуацию, которая может возникнуть во время движения автомобиля. Мониторинг технического состояния системы во время транспортного процесса обеспечивает аварийный режим функционирования ЭП.

В качестве объекта диагностики рассматривается система ЭП автомобиля с одной вентильной электрической машиной двойного действия GM. Такая система способна функционировать в двух режимах – привода (двигателя) и энергетической установки (генератора). В первом случае система питается от первичного источника напряжения ВАБ. В режиме генератора система выполняет рекуперативный процесс заряда ВАБ за счет энергии торможения и движения накатом.

Эксплуатационные режимы ЭП задаются положением педалей акселератора (ДПА) и тормоза (ДПТ). Для согласования напряжения питания потребителей и источников энергии (ВАБ и GM) используются четыре преобразователя напряжения: инвертор; выпрямитель; преобразователь, повышающий постоянное напряжение (ППН); преобразователь, снижающий постоянное напряжение (ПСН). Управление вентильной машиной GM обеспечивает контроллер КЭМ на основании сигналов с датчиков ДПА, ДПТ (α_1 , α_2), углового положения и скорости вращения вала машины ω . Выходные напряжения преобразователей ППН и ПСН регулируются частотными сигналами f_1 и f_2 , которые поступают из КЭМ. Скоростной режим электродвигателя определяется сигналами коммутации инвертора f_n (рис. 1).

В режиме двигателя период рабочего цикла электрических процессов в схеме ППН определяется временем переключения тока в катушке L транзисторным

ключом VT8. Во время замкнутого состояния ключа к катушке подведено напряжение ВАБ, под действием которой в цепи возникает ток, возрастающий со временем до устойчивого значения. На время размыкания ключа катушка индуцирует импульсы повышенной электро-движущей силы.

Интегрирующий конденсатор C2 на выходе схемы преобразователя поддерживает постоянное напряжение на уровне амплитудных значений. Диод VD7 исключает разряд конденсатора C2 через транзисторный ключ во время его открытого состояния. Диод VD8 защищает транзисторный ключ VT8 от импульсного перенапряжения, возникающего вследствие коммутации тока в катушке L. Буферный конденсатор C1 сглаживает броски напряжения в цепи питания во время переходных процессов. Диоды выпрямителя VD1...VD6 в режиме двигателя обеспечивают защиту транзисторов инвертора от перенапряжения, возникающего вследствие коммутации тока в обмотках электрической машины.

В режиме генератора мост VD1...VD6 выполняет функции трехфазного выпрямителя напряжения, которое вырабатывает электрическая машина. Оптимальный режим заряда ВАБ в режиме генератора поддерживается ключом VT7 преобразователя ПСН. Снижение напряжения и соответственно зарядного тока ВАБ происходит за счет роста индуктивного сопротивления катушки L вследствие повышения частоты переключения ключа VT7.

Основу экспертной системы составляет база данных, которая предназначена для хранения долгосрочных данных. В базе данных рассматриваются допустимые (эталонные) значения диагностических параметров и алгоритмы функционирования исправной системы, а также текущие (фактические) значения диагностических параметров и алгоритмы функционирования системы по факту их реализации. Вся текущая информация о состоянии системы, которая поступает и хранится в экспертной системе, представляет собой параметры электрических величин (сигналов), которые анализируются в интерпретируемом (кодовом) виде путем сравнения.

Обобщенная схема процесса формирования базы данных для идентификации технических состояний (исправных и неисправных) ЭП представлена на рис. 2.

Оператор последовательно имитирует неисправности системы ЭП путем

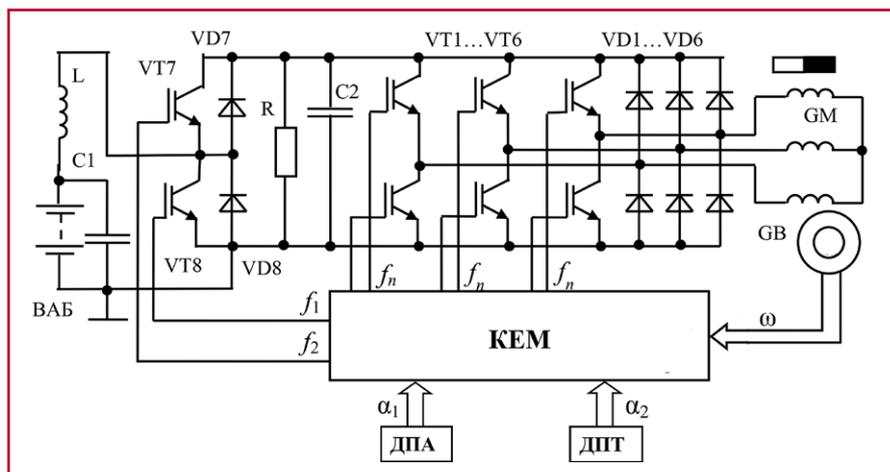


Рис. 1. Электрическая схема силовых цепей системы электропривода:
L – катушка индуктивности; VT1...VT6 – транзисторные ключи инвертора;
VD1...VD6 – трехфазный выпрямитель; VT7 – транзисторный ключ ПСН;
VT8 – транзисторный ключ ППН

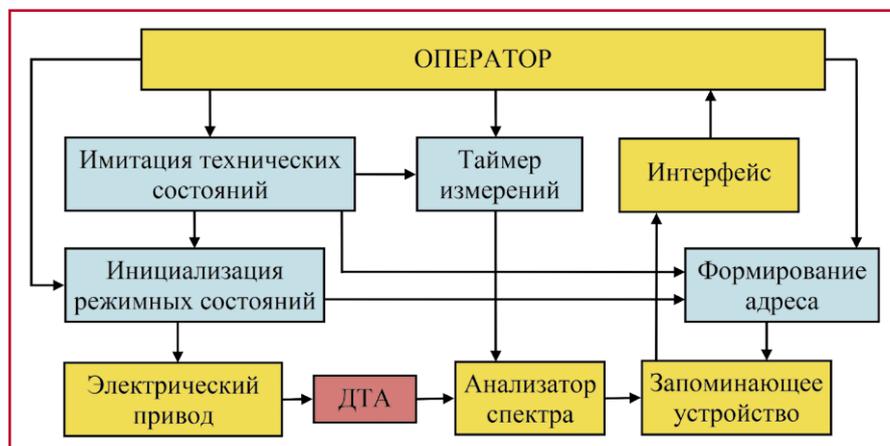


Рис. 2. Схема процесса формирования базы эталонных данных

размыкания цепей (режим холостого хода) и переключения элементов (режим короткого замыкания) и обеспечивает функционирование ЭП в эксплуатационных режимах автомобиля. Мониторинг режимного и технического состояний ЭП осуществляется с помощью датчика тока аккумуляторной батареи (ДТА) в виде периодического сигнала, который преобразуется анализатором спектра. Таймер измерений, нормированный оператором, назначает необходимую продолжительность времени анализа функции тока. Согласно режиму функционирования ЭП и заданному повреждению оператор определяет адрес записи спектрограммы в двумерном формате. Первая координата формируемой таким образом характеристической карты определяет ячейку памяти, где хранится информация о диагностическом параметре по признаку режимного состояния, а вторая – по признаку технического состояния за время проведения эксперимента.

Таким образом, объем памяти, необходимой для хранения библиотеки эталонных значений параметров, определяется перечнем режимных состояний (количеством функциональных тестов) и технических состояний (количеством возможных неисправностей). Для ЭП рассматриваются четыре состояния (функциональных теста) в режиме двигателя и два состояния в режиме генератора: холостой ход и пуск электродвигателя без нагрузки и под определенной нагрузкой; вращение электродвигателя под постоянной нагрузкой; подключение ВАБ к генератору под напряжением; заряд ВАБ фиксированным значением тока в режиме рекуперации.

Формирование базы данных можно проводить двумя путями – натурального эксперимента или виртуальных исследований имитационной модели. В первом случае нужно иметь реальный автомобиль с ЭП (объект диагностики), на котором обеспечиваются необходимые режимы функционирования (инициализация режимных состояний) и есть возможность последовательно вызывать повреждения элементов электрических цепей и их восстановление (имитация технических состояний) без тяжелых последствий. Кроме того, нужна аппаратура для реализации измерительного канала (интегрированный датчик ДТА), преобразователь сигнала (анализатор спектра, таймер измерений) и сохранение полученной информации (формирователь адреса, запоминающее устройство, интерфейс пользователя).

При разработке диагностической системы целесообразным является второй подход – виртуальные исследования, где затратная часть разработки сводится к наличию персонального компьютера с соответствующим программным обеспечением.

Имитационные модели ЭП строятся отдельно для режима двигателя и режима генератора. Для определенных режимов ЭП проводится спектральный FFT-анализ функции тока батареи. В таком случае чувствительность диагностического параметра определяется расхождением амплитуд и фазовых сдвигов отдельных гармоник спектра для заданного режима ЭП, а информативность – расхождением спектрограмм выбранного режима для различных технических состояний (исправного и неисправных). Результаты исследований показывают, что для каждого режима функционирования и технического состояния ЭП следует выбирать определенные форматы спектрограмм [3]. Такой подход позволяет отделить на спектрограммах характерные (с доминирующей амплитудой) составляющие (комбинации составляющих), по которым идентифицируются неисправные состояния системы.

Как наиболее вероятные неисправные состояния силовой цепи при структурной идентификации можно рассматривать значительный перечень аппаратных повреждений: пробой (короткие замыкания) и перегорания (обрывы) полупроводниковых приборов; обрывы пассивных элементов и короткие замыкания монтажа; обрывы обмоток вентильной машины. К этому перечню можно добавить состояния при

параметрической идентификации неисправностей, такие как межвитковые замыкания в обмотках вентильной машины и отклонение параметров пассивных элементов от нормируемых значений.

Таким образом, учитывая количество контролируемых режимов работы (режимных состояний) системы электропривода N и количество возможных повреждений (технических состояний) n , имеем значительный перечень спектрограмм, которые рассматриваются как база эталонных данных (база данных) экспертной системы самодиагностики.

Если количество гармоник, рассмотренных в каждой спектрограмме технического состояния, обозначить числом m , то общий формат (объем памяти), нужный для хранения библиотеки состояний по амплитудным показателям, определится умножением $F = 2 \times N \times n \times m$. Удвоение формата объясняется необходимостью сохранять предельные значения (коридор допусков) амплитуды каждой гармоники. Общий объем памяти в кодовом представлении при этом зависит от выбранной разрядности кода интерпретированной амплитуды отдельных гармоник. Если технические состояния идентифицировать еще и фазовым сдвигом отдельных гармоник спектра, можно значительно повысить информативность спектрограмм. Однако при этом формат библиотеки данных и объем памяти для ее хранения значительно возрастает.

При аппаратной реализации системы цифровой обработки сигнала на схеме рассматривают функциональные блоки, при программной – программные модули. В любом случае функциональная схема

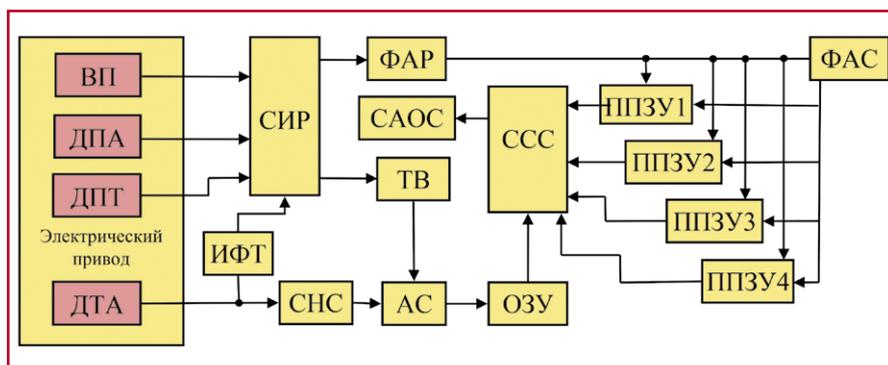


Рис. 3. Функциональная схема экспертной диагностической системы электропривода: ВП – выключатель питания; ИФТ – интегратор функции тока; СИР – схема идентификации режима; СНС – схема нормализации сигнала; ДТА – датчик тока аккумуляторной батареи; ФАР – формирователь адреса режима; ТИ – таймер измерений; АС – анализатор спектра; ССС – схема сравнения сигналов; ОЗУ – оперативно-запоминающее устройство; ППЗУ – постоянно программируемое запоминающее устройство; ФАС – формирователь адреса состояния; САОС – схема аварийного отключения и сигнализации.

бортовой экспертной диагностической системы ЭП автомобиля имеет вид определенной структуры (рис. 3).

Во время эксплуатационных режимов автомобиля из органов управления ЭП (ВП, ДПА, ДПТ) и датчика ДТА сигналы поступают к блоку СИР, который идентифицирует текущее режимное состояние с помощью внутренней ЭС (блок тестовых ситуаций). При этом благодаря блоку ИФТ аналоговый сигнал информирует о среднем значении (ступней нагрузки электродвигателя) и направлении тока в цепи ВАБ (режим работы ЭП).

Одновременно нормированный сигнал (блок СНС) с ДТА поступает в анализатор спектра АС. Сигнал о наличии тестовой ситуации с СИР запускает таймер ТВ, который определяет длительность анализа спектра в АС. Полученная спектрограмма текущего режима некоторое время сохраняется в ОЗУ. В этом же цикле двоичный код номера режимного состояния с СИР через ФАР формирует код адреса ППЗУ, где хранится база эталонных данных текущего режима. Адресный сигнал с ФАР запускает последовательный просмотр (сканирование) адресов выбранного номера ППЗУ, где хранятся эталонные спектрограммы технических состояний системы ЭП на заданном текущем режиме. Сканирование начинается со спектрограммы, характеризующей исправное состояние.

Таким образом, на схему сравнения ССС, с одной стороны, подается спектрограмма фактической функции тока ВАБ в текущем режиме, с другой – последовательно поступают эталонные спектрограммы с соответствующего номера ППЗУ. В случае если спектрограммы совпадают, на выходе ССС формируется сигнал, в котором содержится информация о техническом состоянии системы ЭП.

Если система исправна (совпадение на первом сравнении), сигнал с ССС игнорируется. В случае наличия определенной неисправности соответствующий код посылается в память ошибок (как в системах самодиагностики) и на анализатор информационной системы

водителя. Наряду с этим код неисправности поступает в блок САОС, через который реализуются активные функции системы самодиагностики (резервирование, отключение питания, адаптация сигналов управления).

Базу эталонных данных диагностической экспертной системы можно формировать двумя методами – натурального эксперимента и виртуальных исследований. Процесс формирования базы данных в последнем случае предполагает субъективные действия оператора или реализацию на программном уровне в автоматическом режиме. Функциональная схема интегрированной системы самодиагностики ЭП состоит из четырех основных частей: измерительной (идентификация режима); анализирующей сигнал; библиотеки параметров (базы данных); принятия решения (обеспечение аварийного режима).

Экспертная диагностическая система предлагаемой структуры способна решать несколько задач пассивной и активной диагностики: определять неисправный элемент ЭП; обеспечивать аварийный режим функционирования путем резервирования аппаратных элементов и программного замещения утраченной информации; устанавливать причины и закономерности проявления неисправности элементов на эксплуатационных режимах; минимизировать отрицательные последствия повреждений элементов и монтажа; предупреждать аварийное состояние системы.

Литература

1. On-board diagnostics. Материалы сайта, 2020. Режим доступа: <https://en.wikipedia.org/wiki/>
2. Asabere Nana Yaw, Simonov Kusi-Sarpong. A Mobile vehicle expert system for the automobile industry / International journal of engineering research and applications (IJERA) ISSN: 22489622 Vol. 2, Issue 6, November–December 2012, pp. 1108–1123. Материалы сайта, 2020. Режим доступа: www.ijera.com/papers/Vol2_issue6/FH2611081123.pdf.

3. Бороденко Ю.М. Синтез экспертной диагностической системы электропривода автомобиля // Автомобиль и электроника. Современные технологии: электронное научное специализированное издание.– Х.: ХНАДУ, 2018, № 13, с. 108–114.

4. Dubravko Miljković, Hep, Zagreb Croatia. Brief review of motor current signature analysis. Материалы сайта, 2020. Режим доступа: <https://hrcak.srce.hr/file/218882>.

5. Бороденко Ю.М. Идентификация неисправностей энергетической установки гибридного автомобиля // Автомобиль и электроника. Современные технологии: электронное научное специализированное издание.– Х.: ХНАДУ, 2016, № 9, с. 2731.

Чебоксаров Алексей Николаевич

Родился в 1985 году. В 2007 году окончил Сибирскую государственную автомобильно-дорожную академию (СибАДИ) по специальности «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования (строительные, дорожные и коммунальные машины)». Кандидат технических наук, доцент. В 2011 году защитил диссертацию по теме «Совершенствование технических средств диагностирования двигателей силовых установок и гидроагрегатов дорожно-строительных машин». Опыт работы – 12 лет. В настоящее время работает доцентом кафедры «Эксплуатация и ремонт автомобилей» СибАДИ. Имеет 32 научных труда, 4 патента.

Cheboksarov Alexey

Was born in 1985. In 2007 he graduated from The Siberian State Automobile and Highway Academy (SIBADI) with a degree in "Service of transport and technological machines and equipment (construction, road and utility machines)". Candidate of engineering sciences, associate professor. In 2011 he defended his thesis on the topic "Improving the technical means of diagnosing engines of power plants and hydraulic units of road-building machines". Has 12 years of working experience. At present he is an associate professor of Car operation and repair department at SIBADI. Has 32 scientific works, 4 patents.

Экспериментальные исследования помехоустойчивости электронных систем управления двигателем внутреннего сгорания и управления автоматизированной коробкой передач

// Experimental studies of noise immunity of electronic control systems of an internal combustion engine and control of an automated transmission //

Козловский В. Н., д.т.н., профессор,

Подгорный А. С., к.т.н.,

Брачунова У. В.,

ФГБОУ ВО «СамГТУ», г. Самара

Николаев П. А., д.т.н.,

АО «АВТОВАЗ», г. Тольятти

Дебелов В. В., к.т.н.,

ФГУП «НАМИ», г. Москва

В статье представлены результаты экспериментальных исследований помехоустойчивости электронной системы управления двигателем внутреннего сгорания легкового автомобиля, а также электронной системы управления автоматизированной коробкой передач. Работа подготовлена при поддержке гранта Президента РФ НШ-2515.2020.8

Ключевые слова: автомобиль, бортовой электротехнический комплекс, электромагнитная совместимость.

Исследование электронной системы управления двигателем внутреннего сгорания

В качестве объекта исследования выбран автомобиль популярной российской марки с модернизированной системой управления двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Модернизация заключалась в применении датчиков контроля индивидуальных катушек зажигания и программного обеспечения обработки информации по этим каналам [1, 2].

Исследования проводились при стандартном фронтальном и предлагаемом дискретном позиционировании автомобиля с углом поворота сенда 30 град. Оно было выбрано исходя из предоставленного лабораторией времени на проведение исследований.

Результаты экспериментов сводились в матричные массивы, по которым анализировались и определялись параметры помехоустойчивости.

The article presents the results of experimental studies of the noise immunity of an electronic control system for an internal combustion engine of a passenger car, as well as an electronic control system for an automated transmission. The work was prepared with the support of the grant of the President of the Russian Federation NSh-2515.2020.8

Keywords: car; onboard electrical complex; electromagnetic compatibility.

Для обработки данных был введен параметр частотности, равный

$$F_{\beta} = \frac{K_{\beta}}{N_{\beta}} \Big|_{f=const}, \quad (1)$$

где K_{β} – количество угловых позиций АТС по отношению к излучающей антенне, при которых наблюдается нарушение работоспособности; N_{β} – полное количество угловых позиций АТС по отношению к излучающей антенне.

Формула (1) показывает, сколько раз на конкретной частоте был зафиксирован сбой при разных углах позиционирования. Данный параметр был взят как основной при определении частотных диапазонов с наименьшей помехоустойчивостью.

Исследования на помехоустойчивость электронной системы управления ДВС выявили проблему, приводящую к прекращению работы двигателя из-за ложной диагностики неисправности катушек зажигания (рис. 1).

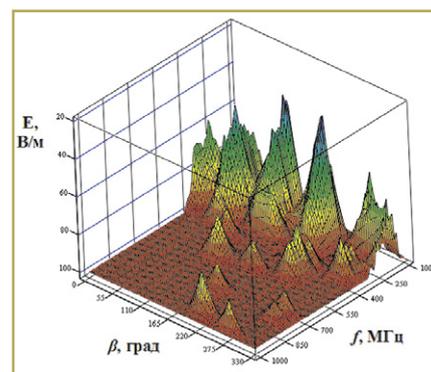


Рис. 1. Помехоустойчивость модернизированной системы управления ДВС автомобиля

В процессе экспериментов было определено, что помехи, наводимые в электрических цепях, искажали информацию по каналу контроля работоспособности катушек зажигания электронной системы управления ДВС. Ложно диагностировалась неисправность катушки зажигания, запрещалось накопление энергии в катушке и топливоподача в соответствующий цилиндр двигателя. Если помехи искажали информацию по нескольким каналам диагностики, то принудительно отключались соответствующие катушки и форсунки. Из-за этого ДВС прекращал работать и АТС останавливался.

Исследования показали, что нарушения работоспособности происходили в диапазоне частот от 99 до 980 МГц при воздействии немодулированного узкополосного электромагнитного излучения.

Анализ результатов показал, что для $F_{\beta} \geq 0,3$ диапазон частот составил 110–430 МГц. Было зафиксировано 79,5% нарушений работоспособности по отношению к общему числу. Этому диапазону принадлежит минимальный уровень помехоустойчивости 30 В/м, зафиксированный на частоте 203 МГц (рис. 2).

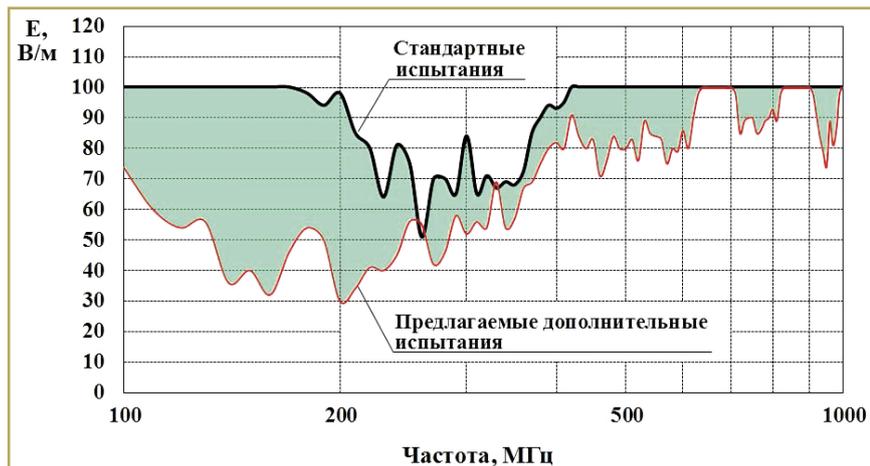


Рис. 2. Минимальные значения помехоустойчивости модернизированной системы управления ДВС автомобиля при стандартных и предлагаемых дополнительных испытаниях

Для $F_{\beta} \geq 0,2$ диапазон частот составил 99–440 МГц. В нем происходило 81,4% проблем ЭМС.

Обработка данных показала, что максимальное значение параметра Q равно 28,2.

Испытания проведены при стандартном фронтальном позиционировании автомобиля и при предлагаемом позиционировании автомобиля с изменением азимутального угла позиционирования АТС по отношению к излучателю. Сравнение результатов стандартных и предлагаемых дополнительных испытаний (рис. 2) показало, что в большей части исследуемого диапазона частот уровни помехоустойчивости электротехнической системы при стандартном позиционировании выше, чем при других азимутальных углах позиционирования автотранспортного средства (АТС) к излучателю. Минимальный уровень помехоустойчивости зафиксирован при азимутальном угле 210 град.

Обеспечение помехоустойчивости до уровня 100 В/м достигнуто доработкой алгоритма работы программы. Оно основывается на том, что вероятность

нарушения работоспособности с интервалом менее 300 мс двух и более катушек зажигания в процессе эксплуатации крайне мала. Поэтому при одновременном определении неисправностей катушек информация об этих событиях игнорировалась. Соответственно накопление энергии в катушках и топливоподача в цилиндры ДВС не отключались. Повторные испытания с доработанным алгоритмом программы показали, что помехоустойчивость электронной системы управления ДВС достигает не менее 100 В/м во всем диапазоне тестируемых частот [3].

Исследование помехоустойчивости электронной системы управления автоматизированной коробкой передач

Объектом исследования был опытный образец автомобиля с автоматизированной коробкой передач (рис. 3).

Исследования на помехоустойчивость выявили сбой по цепи датчика положения привода выбора передачи, приводящий к ложной диагностике с появлением



Рис. 3. Общий вид рычага переключения автоматизированной коробки передач

ошибки «замыкание цепи на бортовую сеть», и самопроизвольное переключение с первой на нейтральную передачу (рис. 4) [4].

В эксплуатации самопроизвольное переключение передач может привести к изменению скорости АТС или его остановке. При ложной диагностике ошибки переключения передач станет невозможным, т.к. система управления перейдет в аварийный режим и АТС будет двигаться на передаче, включенной до момента пропадания ошибки диагностики. Первое нарушение работоспособности характеризуется тем, что проблема устраняется после прекращения электромагнитного воздействия. Ложная диагностика ошибки переключения передач характеризуется тем, что для ее сброса и приведения системы управления в штатный режим работы необходимо выполнить перезагрузку контроллера операцией «выкл./вкл.» зажигания.

Исследования показали, что нарушения работоспособности происходили в диапазоне частот от 85 до 250 МГц (рис. 5).

Для $F_{\beta} \geq 0,3$ диапазон частот составил 90–245 МГц. Здесь было зафиксировано

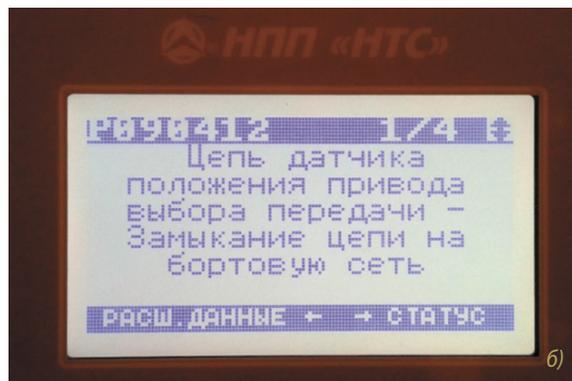


Рис. 4. Нарушение работоспособности электронной системы управления автоматизированной коробкой передач: а) самопроизвольное переключение с первой на нейтральную передачу; б) ложная диагностика ошибки

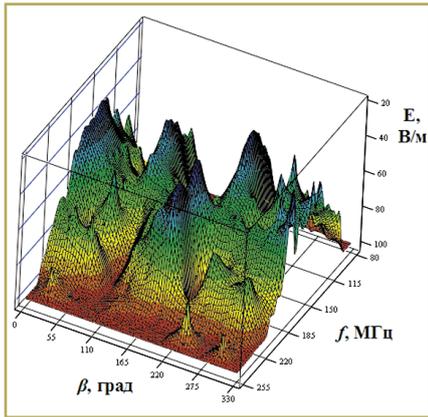


Рис. 5. Помехоустойчивость электронной системы управления автоматизированной коробкой передач опытного образца автомобиля

98,4% нарушений работоспособности по отношению к общему числу. Этому диапазону принадлежит минимальный уровень помехоустойчивости 31 В/м, зафиксированный на частоте 176 МГц (рис. 6).

Для $F_{\beta} \geq 0,2$ диапазон частот составил 85–245 МГц. В нем происходило 99,3% проблем ЭМС.

Обработка данных показала, что максимальное значение параметра Q равно 19,5.

Сравнение результатов стандартных и предлагаемых дополнительных испытаний (рис. 7) показало, что в большей части исследуемого диапазона частот уровни помехоустойчивости электротехнических систем при стандартном фронтальном позиционировании выше, чем при других азимутальных углах позиционирования АТС к излучателю. Проведенные эксперименты доказывают, что испытания во всем диапазоне азимутальных углов по сравнению со стандартными тестами позволяют более полно оценить электротехнические системы АТС на соответствие требованиям ЭМС.

Исследуемый автомобиль был оснащен системой управления коробкой передач зарубежного производителя. Это

осложнило детальное изучение причин нарушения работоспособности и разработку рекомендаций по повышению помехоустойчивости.

Таким образом, экспериментально доказано, что помехоустойчивость зависит от азимутального позиционирования АТС относительно источника электромагнитного излучения. Определено, что минимальные уровни электромагнитных излучений, при которых происходят нарушения работоспособности электротехнических систем (ЭТС), могут не соответствовать направлениям, совпадающим с продольной и перпендикулярной осями симметрии автотранспортных средств (АТС).

Найдены уровни помехоустойчивости ЭТС. Минимумы лежат в области частот от 124 до 597 МГц и имеют значения от 25 В/м, что ниже предела регламентированных международных требований. Данные эксперименты доказывают актуальность проблемы электромагнитной безопасности автотранспортных средств, а также важность развития теории и практики направления ЭМС автотранспортных средств.

Сравнение результатов стандартных и предлагаемых дополнительных испытаний показало обоснованность применения тестов в азимутальной области, т.к. в большей части исследуемого диапазона частот уровни помехоустойчивости электротехнических систем при стандартном фронтальном позиционировании выше, чем при других азимутальных углах позиционирования АТС к излучателю. Проведенные эксперименты доказывают, что испытания во всем диапазоне азимутальных углов по сравнению со стандартными тестами позволяют более полно оценить электротехнические системы АТС на соответствие требованиям ЭМС.

Литература

1. Строганов В.И. Итоги и перспективы развития электромобилей и автомобилей с гибридными силовыми установками / В.И. Строганов, В.Н. Козловский // Электроника и электрооборудование транспорта, 2012, № 2–3, с. 2–8.
2. Козловский В.Н. Модели аналитических исследований качества и надежности легковых автомобилей в эксплуатации / В.Н. Козловский, В.И. Строганов, С.И. Клейменов // Автомобильная промышленность, 2013, № 9, с. 1–5.
3. Николаев П.А. Повышение устойчивости автотранспортных средств в условиях сложной электромагнитной обстановки / П.А. Николаев, Л.Н. Кечиев, Н.В. Балюк, А.С. Подгорный // Технологии электромагнитной совместимости, 2017, № 1 (60), с. 3–12.
4. Николаев П.А. Требования обеспечения устойчивости основных систем автотранспортных средств в условиях сложной электромагнитной обстановки / П.А. Николаев, Л.Н. Кечиев, Н.В. Балюк, А.С. Подгорный // Технологии электромагнитной совместимости, 2016, № 3 (58), с. 3–10.

Козловский Владимир Николаевич

Родился в 1976 году. В 1999 году окончил Тольяттинский политехнический институт по специальности «Электрооборудование автомобилей и тракторов». В 2010 году защитил докторскую диссертацию на тему «Обеспечение качества и надежности системы электрооборудования автомобилей». Опыт работы – 20 лет. В настоящее время работает заведующим кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета (СамГТУ). Автор 330 научных работ, из них более 280 в изданиях ВАК, 20 монографий, 27 статей в международных базах Scopus и Web of Science.

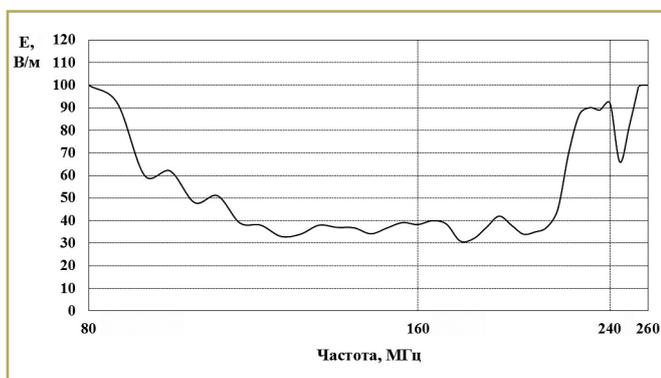


Рис. 6. Минимальные значения помехоустойчивости азимутальных проекций электронной системы управления автоматизированной коробкой передач опытного образца автомобиля

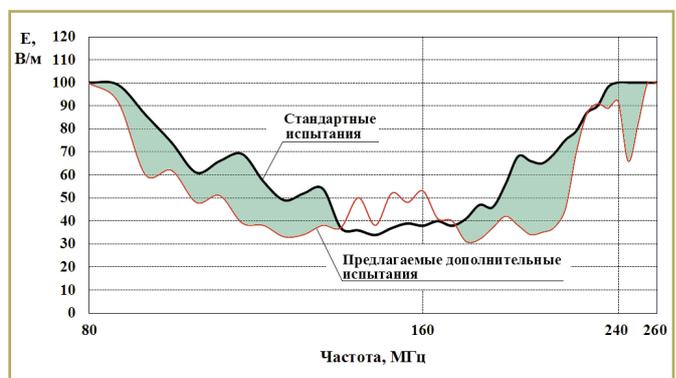


Рис. 7. Минимальные значения помехоустойчивости электронной системы управления автоматизированной коробкой передач опытного образца автомобиля при стандартных и предлагаемых дополнительных испытаниях

Подгорний Александр Сергеевич

Родился в 1992 году. В 2015 году окончил ФГБОУ ВО «ПВГУС» по специальности «Автосервис». Кандидат технических наук. В 2019 году защитил диссертацию по теме «Совершенствование системы контроля бортового электротехнического комплекса автомобилей на помехоустойчивость к электромагнитным воздействиям». Опыт работы – 5 лет. В настоящее время работает научным сотрудником кафедры «Теоретическая и общая электротехника» Самарского государственного технического университета. Автор 17 работ, из них 10 в изданиях ВАК, 2 патента на изобретение.

Брачунова Ульяна Викторовна

Родилась в 1972 году. В 1994 году окончила СамГТУ по специальности «Инженер-системотехник (робототехнические системы и комплексы)». Опыт работы – 21 год. В настоящее время является аспирантом кафедры «Теоретическая и общая электротехника» СамГТУ. Имеет 5 научных трудов.

Николаев Павел Александрович

Родился в 1977 году. В 2000 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет по специальности «Радиоинженер». Доктор технических наук. В 2012 году защитил докторскую диссертацию на тему «Обеспечение электромагнитной совместимости автомобильных систем зажигания». Опыт работы – 19 лет. В настоящее время работает начальником бюро электромагнитной совместимости ПАО «АВТОВАЗ». Автор более 100 научных трудов, в том числе 23 патентов.

Дебелов Владимир Валентинович

Родился в 1989 году. В 2012 году окончил Тольяттинский государственный универси-

тет (ТГУ) по специальности «Промышленная электроника». Кандидат технических наук. В 2016 году защитил диссертацию по теме «Моделирование электротехнических систем управления двигателем легкового автомобиля». Опыт работы – 8 лет. В настоящее время работает заведующим отделом математического моделирования систем управления кузовной электроникой и комфорта ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». Имеет 45 научных работ, из них 25 в изданиях ВАК, 1 монографию, 3 статьи в международных базах Scopus и Web of Science.

Kozlovskiy Vladimir

Was born in 1976. In 1999 he graduated from the Togliatti Polytechnic Institute with a degree in Electrical equipment for cars and tractors. Doctor of technical sciences. In 2010 he defended his doctoral dissertation on the topic "Ensuring the quality and reliability of the electrical system of cars". Work experience is 20 years. At present he works as the head of the Department theoretical and general electrical engineering of Samara State Technical University (SamSTU). He is the author of 330 scientific works, of which more than 280 are in the editions of the Higher attestation commission, 20 monographs, 27 articles in the international Scopus and Web of Science databases.

Podgorny Aleksandr

Was born in 1992. In 2014 he graduated from PVGUS Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education with a degree in Autoservice. Candidate of Technical Science. In 2019 he defended his thesis on "Improving the control system of the on-board electrical complex of cars for noise immunity to electromagnetic influences". Work experience is 5 years. At present he works as a researcher at the De-

partment of Theoretical and General Electrical Engineering of the Samara State Technical University. He is the author of 17 works, 10 of which are in the editions of the Higher Attestation Commission, 2 patents for invention.

Brachunova Ulyana

Was born in 1972. In 1994 she graduated from SamSTU with a degree in Systems engineer (robotic systems and complexes). Work experience is 21 years. At present she is a graduate student of the department "Theoretical and general electrical engineering" SamSTU. She has 5 scientific works.

Nikolaev Pavel

Was born in 1977. In 2000 he graduated from Samara State Aerospace University majoring in "Radio engineer". He is doctor of technical sciences. In 2012 he defended the dissertation, the theme is "Provision of electromagnetic compatibility of automobile ignition systems". He has 19 years of work experience. At present he works as the head of the electromagnetic compatibility bureau of PJSC AVTOVAZ. He is author of 100 scientific works, including 23 patents.

Debelov Vladimir

Was born in 1989. In 2012 he graduated from Tolyatty State University with a degree in Industrial electronics. Candidate of technical sciences. In 2016 he defended his thesis on Modeling of electrical control systems of the car engine. Work experience is 8 years. At present he works as a Head of the Department of Mathematical Modeling of Body Electronics and Comfort Control Systems of SSC RF FSUE NAMI. He is the author of 45 scientific works, of which more than 25 are in the editions of the Higher attestation commission, 1 monograph, 3 articles in the international Scopus and Web of Science databases.

Сведения об авторах

Д.т.н., профессор
Вольский Сергей Иосифович
+7-963-675-51-17

Д.т.н., профессор
Герман Леонид Абрамович
+7-908-769-94-26

Д.т.н., профессор
Щуров Николай Иванович
+7-383-346-17-91

К.т.н.
Голубчик Тимофей Владимирович
+7-915-255-88-88

К.т.н.
Дебелов Владимир Валентинович
+7-999-897-89-69

Дураков Дмитрий Николаевич
+7-929-606-36-19

К.т.н., доцент
Пинчуков Павел Сергеевич
+7-914-548-27-79

К.т.н., доцент
Чебоксаров Алексей Николаевич
+7-904-072-82-56

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

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:

(2 номера) – **4 000 руб.**, в т.ч. НДС 20%

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 Объединенный каталог «Пресса России», 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, на специализированных выставках и симпозиумах.