

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

Малышев А.Н.¹, Груненков Е.А.¹, к.т.н. Дебелов В.В.^{1,2},

д.т.н. Козловский В.Н.³, к.т.н. Шишков А.Н.²

¹ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», Москва, Россия

²Московский политехнический университет, Москва, Россия,

³ФГБОУ ВО «СамГТУ», Самара, Россия

andrey.malyshev@nami.ru, vladimir.debelov@nami.ru

В работе представлены математические модели и расчетно-аналитические зависимости, позволяющие реализовать систему контроля сопротивления изоляции высоковольтной электросети гибридного автомобиля и сформулировать требования к физической и имитационной модели программно-аппаратного комплекса лабораторных испытаний. Целью работы является определение основных функций и характеристик системы контроля изоляции, ее особенностей, принципа действия и методов контроля сопротивления изоляции, составление требований к системе имитационного моделирования. Во введении обоснована важность контроля сопротивления изоляции, приводятся ссылки на стандарты, регламентирующие требования к измерению и определению неисправности электросети. Представлена структурная схема электропитания автомобиля и роль системы контроля сопротивления изоляции в этой схеме, поясняются особенности контроля изоляции. Рассматривается принцип действия системы контроля изоляции и применение наиболее распространенных схем, приводятся расчетные зависимости для каждой из представленных схем, позволяющие вычислить сопротивление изоляции. Описан порядок проведения измерений сопротивления изоляции согласно стандарту ISO и приводятся соответствующие уравнения. Для представленной схемы приводится график, поясняющий принцип работы системы, когда при замыкании одного из ключей происходит изменение напряжения на измерительном резисторе при нормальном состоянии изоляции положительной и отрицательной шины электропитания высоковольтной системы. В выводах дается обобщение представленной математической модели и формулируются требования к программно-аппаратному комплексу, который позволяет проводить имитационное и математическое моделирование электрических систем и их компонентов в различных режимах работы. Поясняются особенности исполнения программно-аппаратного комплекса, позволяющего моделировать изменение сопротивления изоляции и неисправности питающей электросети высокого напряжения для автомобиля с гибридной силовой установкой.

Ключевые слова: система электропитания, сопротивление изоляции, программно-аппаратный комплекс, гибридная силовая установка.

Для цитирования: Малышев А.Н., Груненков Е.А., Дебелов В.В., Козловский В.Н., Шишков А.Н. Математическое моделирование системы контроля сопротивления изоляции высоковольтной электросети гибридного автомобиля // Известия МГТУ «НАМИ». 2021. № 1 (47). С. 89–98. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-47-1-89-98.

Введение

Загрязнение окружающей среды выхлопными газами транспортных средств становится все более серьезным в связи с расширяющимся автомобильным рынком. Столкнувшись с существующими проблемами эффективного использования энергии и защиты окружающей среды, исследования, разработка и продвижение высокоэффективных экологически чистых

электромобилей становятся мировой тенденцией в автомобильной сфере [10, 11, 12, 13].

Современный легковой автомобиль, оснащенный гибридной силовой установкой, помимо электросети низкого напряжения оборудован сетью высокого напряжения электропитания, которая включает в себя систему управления электромашиной, аккумуляторы высокого напряжения, преобразователи по-

стоянного напряжения, компрессор кондиционера, систему отопления, систему управления насосом усилителя рулевого управления, зарядное устройство и другие системы.

Изоляция кабеля – один из важнейших конструктивных элементов сети электропитания, определяющих надежность работы электрической машины, инвертора, преобразователей постоянного напряжения, и при этом наиболее уязвимая часть электросети.

Механическая прочность изоляции значительно ниже по сравнению с несущими элементами конструкции автомобиля и устройств, которые стационарно закреплены и не подвержены смещению и деформациям. Электрическая прочность изоляции зависит от влажности, температурного коэффициента, старения материалов, воздействия агрессивных сред, излучения тепла и света и других внешних факторов.

Повреждение изоляции приводит к серьезным авариям, связанным с коротким замыканием питающих проводников между собой, корпусом изделий или автомобиля и другими предметами, что приводит к нагреву и возгоранию частей автомобиля, порче жгутов проводов и изделий, выходу из строя компонентов, поражению людей и животных электрическим током, нанесению вреда окружающей среде (FMVSS 305, SAE J1766) [5, 6].

Контроль состояния изоляции – важная и непростая задача. Внедрение методов и средств диагностики состояния изоляции электросети позволяет решить проблему эксплуатационной надежности автомобиля. Разрабатываются стандарты по контролю состояния изоляции и внедряются устройства, измеряющие сопротивление изоляции электрической замкнутой цепи [7, 8].

Сопротивление изоляции – омическое сопротивление изолятора и значение коэффициента сопротивления изолятора току, генерируемому при приложении напряжения. Изолятор обладает свойством накопления заряда, в зависимости от внешней температуры и влажности и других факторов. Сопротивление изоляции – это еще и сопротивление между землей (внешней поверхностью устройства) и проводником. Если сопротивление изоляции высокое, то ток утечки мал и сопротивление поддерживается на заданном или высоком уровне.

При эксплуатации высоковольтных систем качество изоляции электросети автомобиля

имеет большое значение. Важно точно измерить сопротивление изоляции, чтобы предотвратить утечку тока и несчастные случаи, обеспечить стабильную работу сети электропитания.

Целью работы является определение основных функций и характеристик системы контроля изоляции, ее особенностей, принципа действия и методов контроля сопротивления изоляции, составление требований к системе имитационного моделирования.

Методы и средства проведения исследования

Моделирование характеристики сопротивления токоведущих частей систем контроля изоляции необходимо для оценки быстродействия и погрешности измерения сопротивления, сравнения реальной характеристики сопротивления с ее математическим описанием, для оценки задержек в цепи измерения и изучения физических особенностей работы измерительных цепей.

Математическое моделирование необходимо при построении физических моделей системы контроля изоляции, чтобы добиться достоверности воспроизведения физических характеристик сопротивления изоляции для различных условий эксплуатации транспортного средства. Поэтому важным критерием математической модели контроля сопротивления изоляции является получение характеристики сопротивления изоляции токоведущего проводника по его математическому описанию или экспериментальным данным. Математическая модель системы также должна позволять исследовать необратимые процессы старения и разрушения изоляционного слоя, влияние проникновения инородных веществ и частиц, снижающих сопротивление.

Назначение и особенности системы IRM

Система электропитания автомобиля является одной из наиболее важных, а ее структура приведена на рис. 1. Требования к питающему напряжению в разных местах электросети различаются, также различаются требования для высоковольтной и низковольтной электросети.

Низковольтная система питания обеспечивает электропитанием бортовую сеть низкого напряжения для питания электрических устройств. Она отвечает за контроль состоя-

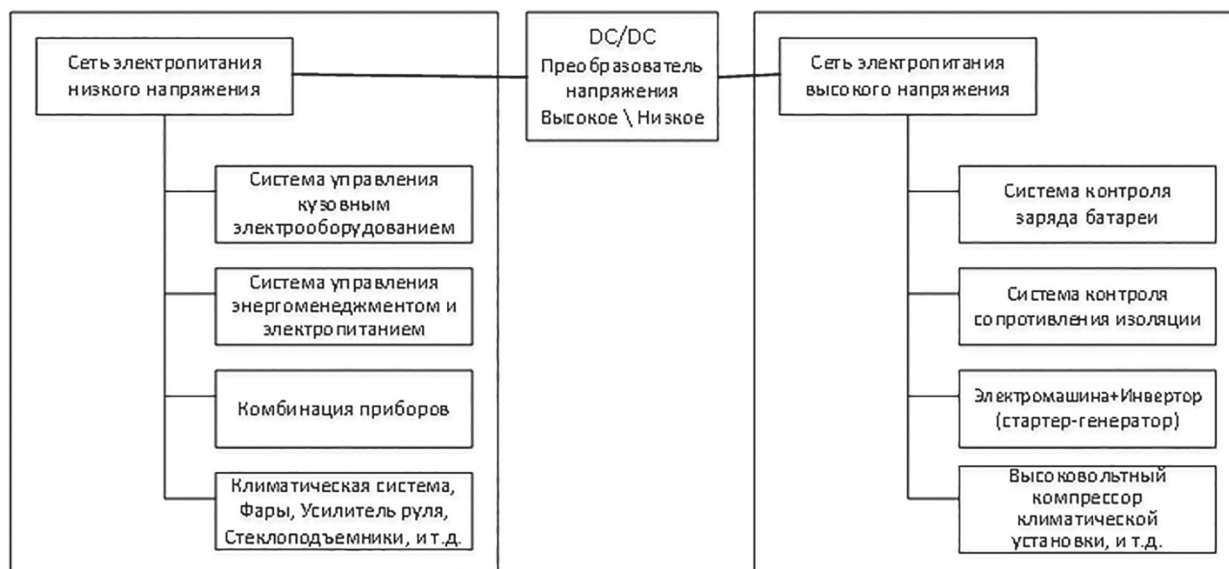


Рис. 1. Структурная схема системы электропитания автомобиля

Fig. 1. Block diagram of the vehicle power supply system

ния бортового аккумулятора электропитания, контроль токов нагрузки и управление мощными потребителями, а также регулирует уставку тока генератора или преобразователя энергии постоянного напряжения.

Наличие дефектов в электропитании бортовой сети низкого напряжения решается путем отключения потребителей, пока утечка тока или короткое замыкание не будет устранено.

Высоковольтная система питания состоит из электромашин и инверторного преобразователя, преобразователей постоянного напряжения, компрессора кондиционера, системы контроля заряда высоковольтной батареи и системы контроля изоляции, системы управления гидравлическим насосом усилителя рулевого управления, системы торможения и других систем, которые питаются от электросети высокого напряжения.

Напряжение электропитания высоковольтной системы автомобиля обычно находится в диапазоне 100В–500 В. Более высокое рабочее напряжение предъявляет более серьезные требования к характеристикам изоляции между высоковольтной шиной электропитания транспортного средства и шасси транспортного средства.

Кислотная и щелочная коррозия, изменение температуры и влажности окружающей среды вызывают старение или поломку высоковольтного токоведущего кабеля и его изоляции, что приводит к снижению сопротивления изо-

ляции между высоковольтной цепью и шасси автомобиля. Положительные и отрицательные выводы высоковольтной электросети образуют контур тока утечки через изоляцию и шасси, что приводит к росту потенциала шасси.

Для того, чтобы обнаружить неисправности в электросети высокого напряжения, часто применяются методы обнаружения сопротивления изоляции. Среди них наиболее распространены: метод измерения напряжения на конце шины, метод ввода сигналов переменного тока и метод измерения напряжения изоляции постоянного тока. Схема, используемая в методе определения напряжения на конце шины, проста, ненадежна и не может определить неисправность, например, короткое замыкание на землю. Метод генерации сигналов переменного тока обеспечивает формирование сигналов переменного тока в системе постоянного тока высоковольтной стороны электроавтомобиля, расчет и определение состояния изоляции системы. Метод измерения напряжения изоляции в сети постоянного тока реализуется путем измерения сопротивления изоляции методом трех вольтметров. Для того, чтобы измерить сопротивление изоляции, создаются специализированные системы контроля ее сопротивления.

Измерение сопротивления изоляции высоковольтной аккумуляторной батареи выполняется вместе с компонентами, расположенными внутри корпуса батареи, например, с устрой-

ствами мониторинга температуры, устройствами поддержания температуры и обеспечения теплообмена жидкостного типа [14].

Обе клеммы высоковольтной аккумуляторной батареи, как правило, имеют разные сопротивления изоляции относительно электрического шасси. По соображениям безопасности наименьшее из них считают сопротивлением изоляции электросети, которое рассчитывают с помощью измеренных значений напряжений.

*Принцип действия системы
 контроля изоляции автомобиля*

Система контроля сопротивления изоляции (Insulation-resistance monitoring system-IRM) – это надежная и простая в обслуживании система, которая используется для периодического или непрерывного контроля сопротивления изоляции токоведущих кабелей, применяемых в высоковольтных питающих цепях автомобиля и дает возможность отслеживать долговременную деградацию кабельной разводки высоковольтной питающей цепи. Система IRM может измерять сопротивление кабеля в диапазоне от 20 кОм до 1000 мОм, где оптимальным считается сопротивление свыше 500 кОм. Измерения сопротивления выполняются поочередно для каждой цепи и длительность измерений зависит от времени зарядки цепи. При отключенной цепи измерения сопротивления изоляции не выполняются.

В соответствии с положениями стандартов BS ISO 6469-1-2016, ISO 16750, IEC 60664-1 [1, 2, 3] состояние изоляции высоковольтной электросети автомобиля измеряется изолированным сопротивлением для положительной и отрицательной линии питания постоянного тока относительно земли. Для оценки требований безопасности выполняется деление значения сопротивления изоляции на номинальные напряжения U системы электропитания постоянного тока автомобиля, если результат превышает величину 100 Ом/В, то сеть считается безопасной, а если результат ниже этого значения, то сеть считается не безопасной и существует нарушение изоляции транспортного средства.

Для измерения сопротивления изоляции высоковольтной электросети по отношению к шасси используется цепь с переменным импедансом. Для этого рассмотрим схему измерительной цепи, показанной на рис. 2. В схеме Vb – напряжение аккумуляторной батареи GB , R_p и R_n – сопротивления изоляции положитель-

ной шины и отрицательной шины по отношению к земле соответственно. U_p и U_n представляют собой напряжения положительного полюса и отрицательного полюса относительно земли.

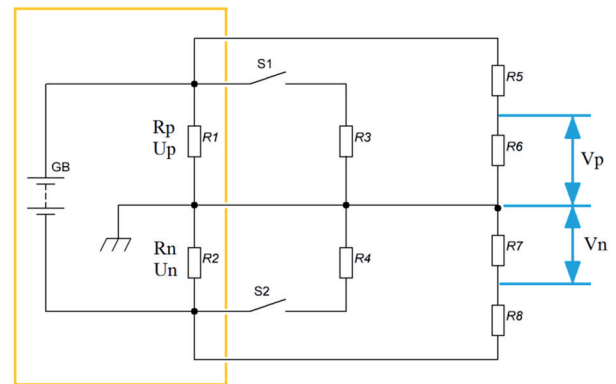


Рис. 2. Схема измерения сопротивления изоляции электросети

Fig. 2. Electrical network insulation resistance measurement circuit

Измерительная цепь представляет собой модель контроля изолированного сопротивления высоковольтной сети транспортного средства, в которой R_3 и R_4 являются шунтирующими резисторами с известными значениями сопротивлений, используемые для измерения элементы R_3 и R_4 , S_1 , S_2 образуют цепь сопротивления смещения. R_5 и R_6 , R_7 и R_8 образуют схему деления напряжения. Во время измерения поочередно включаются S_1 и S_2 и измеряются величины напряжения V_p и V_n . По значениям V_p и V_n определяется сопротивление изоляции высоковольтной электросети.

Теорема Тевенина для линейных электрических цепей утверждает, что любая электрическая цепь, имеющая два вывода и состоящая из произвольной комбинации источников напряжения, источников тока и резисторов (сопротивлений), электрически для этих двух выводов эквивалентна цепи с одним идеальным источником напряжения с ЭДС V и одним резистором R , соединенными последовательно с этим источником напряжения.

Когда все переключатели S_1 и S_2 отключены, напряжение между положительной, отрицательной шиной и электрическим шасси составляет U_{p1} и U_{n1} соответственно, согласно теореме Тевенина:

$$\frac{U_{p1}}{R_p} = \frac{U_{n1}}{R_n}.$$

Когда переключатель S_1 закрыт, а S_2 отключен, стандартный резистор смещения R_{C1} вставляется между положительной шиной и электрическим шасси. Напряжение между положительной и отрицательной шинами и электрическим шасси составляет U_{P2} и U_{N2} соответственно. Мы можем получить следующее уравнение:

$$\frac{U_{P2}}{R_p} + \frac{U_{P2}}{R_{C1}} = \frac{U_{N2}}{R_N}.$$

Решив уравнения, можно получить сопротивление изоляции:

$$R_p = R_{C1} \left(\frac{U_{P1} U_{N2}}{U_{N1} U_{P2}} - 1 \right) \text{ или}$$

$$R_p = R_{C1} \frac{U_{P1} U_{N2} - U_{N1} U_{P2}}{U_{P1} U_{P2}}.$$

Аналогично значение сопротивления изоляции может быть получено в следующих двух ситуациях:

(1) все S_1 и S_2 отключены или S_1 отключен, а S_2 замкнут;

(2) S_1 замкнут, S_2 отключен и S_1 отключен, S_2 замкнут.

На практике применяется также модифицированная схема (рис. 3), основанная на методе, который описан в стандарте BS ISO 6469-1-2016.

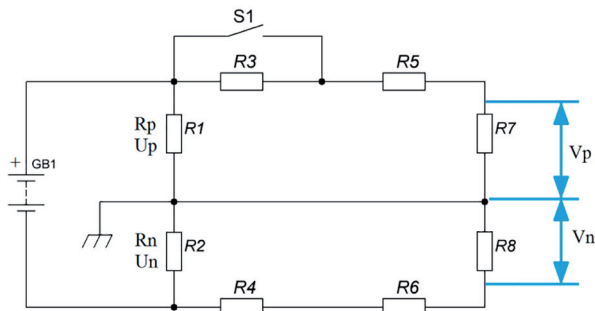


Рис. 3. Принципиальная схема измерения сопротивления изоляции

Fig. 3. Schematic diagram of insulation resistance measurement

R_p и R_N представляют собой сопротивление изоляции положительной и отрицательной токоведущей шины к корпусу корпуса. U_p и U_N представляют собой напряжение между положительной и отрицательной шинами и корпусом аккумулятора. U_{RP} и U_{RN} – значения напряжения на сопротивлениях R_p и R_N соответственно. R_3, R_4, R_5, R_6, R_7 и R_8 – значения из-

вестного сопротивления. Когда ключ S разомкнут, значения напряжения положительной и отрицательной шин по отношению к земле равны U_{P1} и U_{N1} . Когда S замкнут, значения напряжения положительной и отрицательной шин к земле равны U_{P2} и U_{N2} .

При разомкнутом ключе S по закону Кирхгофа получим выражение:

$$\frac{U_{P1}}{R_3 + R_5 + R_7} + \frac{U_{P1}}{R_1} = \frac{U_{N1}}{R_4 + R_6 + R_8} + \frac{U_{N1}}{R_2}.$$

Когда S замкнут, резистор R_1 замкнут, и получается соотношение:

$$\frac{U_{P2}}{R_5 + R_7} + \frac{U_{P2}}{R_p} = \frac{U_{N1}}{R_4 + R_6 + R_8} + \frac{U_{N1}}{R_N}.$$

Поскольку значения сопротивлений R_7 и R_8 значительно меньше, чем R_3, R_4, R_5 и R_6 , их значениями можно пренебречь и принять $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$. Формула для расчета сопротивления изоляции будет иметь вид:

$$R_p = \frac{2R_3(U_{N2}U_{P1} - U_{N1}U_{P2})}{2U_{N1}U_{P2} - U_{N2}U_{P1}} \text{ или}$$

$$R_p = \frac{2R_3(U_{N2}U_{P1} - U_{N1}U_{P2})}{U_{P1}U_{P2} + U_{N1}U_{P2} + U_{N2}U_{P1}}.$$

Из формул видно, что пока напряжение положительной и отрицательной шин по отношению к земле измеряется при отключении и подключении S , можно измерить величину изоляции положительной и отрицательной шин относительно земли. Основываясь на принципе последовательного включения сопротивления, напряжение положительной и отрицательной шин на землю может быть получено путем измерения напряжения на R_7 и R_8 .

Согласно принципу последовательного включения сопротивления, когда переключатель S разомкнут, справедливо уравнение:

$$U_{P1} = U_{R7} \frac{R_3 + R_5 + R_7}{R_7} \text{ или}$$

$$U_{N1} = U_{R8} \frac{R_4 + R_6 + R_8}{R_8}.$$

Когда ключ S замкнут, то получим:

$$U_{P.2} = U_{R7.2} \frac{R_5 + R_7}{R_7} \text{ и } U_{N.2} = U_{R8.2} \frac{R_4 + R_6 + R_8}{R_8}.$$

Значение сопротивления изоляции R_N и R_P может быть получено из приведенных выше соотношений.

*Порядок проведения измерений
 сопротивления изоляции согласно ISO*

Для измерения сопротивления изоляции транспортного средства обе силовые клеммы должны быть отсоединены от электрической силовой цепи и других внешних цепей. Контактные группы внутренних вспомогательных систем должны быть отключены от внешних источников питания и подключены к электрическому источнику, расположенному на шасси транспортного средства.

Сопротивление изоляции измеряют в течение стабилизирующего периода выдержки, при котором определяется наименьшее значение сопротивления. Параметры периодов предварительной и стабилизирующей выдержек выбирают в зависимости от состояния перехода накопителя энергии через точку росы.

Если это возможно, то аккумуляторная батарея должна быть заряжена до максимальной степени, рекомендованной изготовителем. При измерениях внутри транспортного средства, если аккумуляторная батарея заряжается только от бортовых преобразователей и источников энергии, то она должна быть заряжена до любой степени заряженности, подходящей для проведения измерений, обеспечивающая нормальный уровень функционирования.

Внутреннее сопротивление измерительной цепи должно быть более 10 МОм.

Система IRM должна заряжать цепь, пока не будет достигнута стабилизация. Цепь считается стабильной, если значение сопротивления ее изоляции находится в пределах 2 % или менее от предыдущего значения.

Если силовые контакторы батареи интегрированы в аккумуляторную батарею, то они должны быть отключены во время измерения. Процедура для каждого измерения заключается в следующем.

Необходимо измерить напряжения между каждой клеммой аккумулятора и электрическим шасси автомобиля (рис. 4). Большее значение напряжения обозначают U_1 , меньшее – U'_1 и два соответствующих сопротивления изоляции R_{i1} и $R_{i2} = R_i$. Поскольку R_{i2} – наименьшее сопротивление изоляции то, следовательно, оно и является сопротивлением изоляции аккумулятора. При измерении напряжения также необходимо включить измерительное сопротивление R_0 известного номинала параллельно R_{i1} и измерить напряжения U_2 и U'_2 . При выполнении измерений испытательное напряжение должно быть стабильным.

Теоретически величина сопротивления R_0 не имеет никакого влияния на расчетные сопротивления изоляции. Однако R_0 выбирают так, чтобы измеряемые напряжения как можно больше повысили точность расчетного сопротивления изоляции. Подходящим является значение сопротивления в диапазоне 100–500 Ом/В рабочего напряжения аккумулятора. Значение этого сопротивления должно быть известно с погрешностью не более 2 %.

Сопротивление изоляции R_i рассчитывают, используя R_0 и три значения напряжения U_1 , U'_1 и U_2 , при помощи следующего уравнения:

$$R_i = R_0 \frac{U_1 - U_2}{U_2} \left(1 + \frac{U'_1}{U_1} \right).$$

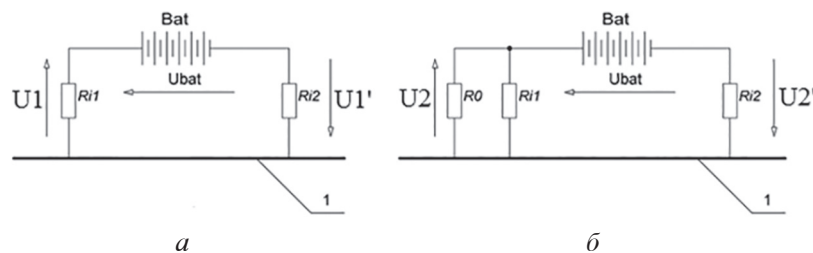


Рис. 4. Схема измерения напряжений на измерительном сопротивлении по отношению к кузову автомобиля для вычисления R изоляции:

а) измерение напряжения U_1, U'_1 ; б) измерение напряжения U_2, U'_2 при добавлении R_0 ; 1 – кузов автомобиля, образующий электрическую землю; R_{i1} и R_{i2} – номинальные сопротивления изоляции между двумя клеммами аккумуляторной батареи и корпусом шасси; R_0 – измерительное сопротивление

Fig. 4. The circuit for measuring voltages across the measuring resistance in relation to the car body for calculating R insulation: a) measurement of voltage U_1, U'_1 ; b) measuring the voltage U_2, U'_2 when adding R_0 ; 1 – vehicle body forming an electrical ground, R_{i1} and R_{i2} – nominal insulation resistance between the two terminals of the battery and the chassis, R_0 – measuring resistance

Уравнение описывается в стандартах SAE J1766 и FMVSS 305, ISO 6469-1: 2016, но только представлено с другими индексами.

R_i также можно рассчитать, используя R_0 и все четыре значения напряжения U_1 , U'_1 , U_2 , U'_2 , при помощи следующего уравнения:

$$R_i = R_0 \left(\frac{U'_2}{U_2} + \frac{U'_1}{U_1} \right).$$

Результаты исследований и их обсуждение

Представленный график (рис. 5) позволяет наглядно изобразить процесс работы системы IRM и измерения сопротивления изоляции, когда при замыкании одного из ключей происходит изменение напряжения на измерительном резисторе R при нормальном состоянии изоляции плюсового и минусового проводов высоковольтной системы. Измерения происходят примерно в точках 30 с, 60 с, 90 с, 120 с на графике кривой 3. По измеренному значению напряжения с учетом значений изме-

рительных сопротивлений вычисляется сопротивление изоляции по известным формулам. Сопротивления положительной и отрицательной шины представлены кривыми 1 и 2 и вычисляются с заданным периодом повторения (на рисунке это 30 секунд).

Измерение сопротивления изоляции происходит следующим образом:

- 1) измеряется общее напряжение на высоковольтной батарее;
- 2) IRM измеряет напряжение высоковольтной батареи;
- 3) IRM измеряет разность потенциалов между землей и плюсовым проводом высоковольтной системы;
- 4) IRM измеряет напряжение высоковольтной батареи;
- 5) IRM измеряет разность потенциалов между землей и минусовым проводом высоковольтной системы.

При падении сопротивления изоляции происходит смещение потенциала положительной

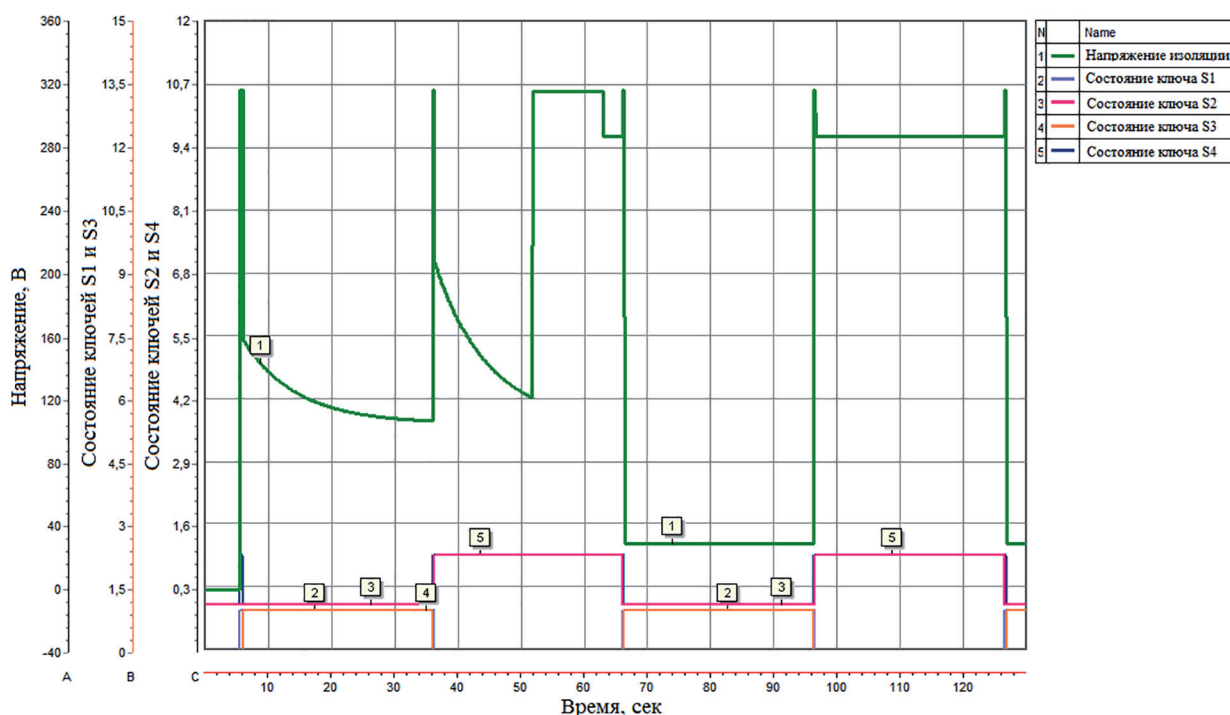


Рис. 5. График измерения потенциала на измерительных резисторах для определения сопротивления изоляции высоковольтной электросети:

1 – напряжение между корпусом высоковольтной батареи и положительной или отрицательной шиной питания в момент уменьшения сопротивления изоляции и смещения измеряемого потенциала, относительно корпуса высоковольтной батареи; 2, 3, 4, 5 – состояние ключей в момент переключения

Fig. 5. The graph of measuring the potential on the measuring resistors to determine the insulation resistance of the high-voltage power grid: 1 – voltage between the high-voltage battery case and the positive or negative power bus at the time of decreasing the insulation resistance and displacement of the measured potential, relative to the high-voltage battery case; 2, 3, 4, 5 – state of the keys at the moment of switching

шины батареи высокого напряжения относительно земли. На графике с 0 по 35 секунду моделируется измерение разности потенциалов на высоковольтной батарее, соответствующей нормальной изоляции. В момент времени 35 секунд моделируется измерение общего напряжения батареи. На интервале с 35 по 52 секунду моделируется процесс заряда емкости. Начиная с 52 секунды до 65 секунды моделируется измерение смещения потенциала между минусом высоковольтной батареи и корпусом, что соответствует снижению сопротивления изоляции. На интервале с 65 по 95 секунду моделируется измерение потенциала плюсовой шины относительно корпуса, что соответствует неисправной шине электропитания. Потенциал батареи смещен относительно потенциала, заданного сопротивлениями симметризации, что соответствует снижению сопротивления.

Заключение

Снижение сопротивления изоляции электросети может быть обусловлено старением и деградацией некоторых типов автомобильных аккумуляторов.

Если сопротивление изоляции всей силовой цепи, измеренное с помощью системы мониторинга сопротивления изоляции на борту транспортного средства, соответствует требованиям ISO 6469-3-2020, то измерение сопротивления изоляции аккумуляторной батареи как отдельного компонента по ISO не проводят [9].

Посредством физического моделирования необходимо определить наилучший метод контроля изоляции, который позволяет определить сопротивление относительно положительной и отрицательной шины электропитания, а также получить математическую и физическую модель сети.

Для того, чтобы оценить эффективность методов контроля изоляции, необходимо построить платформу для тестирования и имитации сопротивления изоляции, чтобы подтвердить достоверность и надежность теории и метода измерения.

При разработке программно-аппаратной платформы необходимо разработать схемы включения сопротивления смещения, контроля изоляции, защиты от высокого и низкого напряжения, блокировки контура высокого напряжения в соответствии с принципом обнаружения напряжения, чтобы испытать всю аппа-

ратную часть системы IRM. Следует составить модель, которая имитирует основные функции аппаратной электрической схемы IRM в среде MATLAB, а также платформу для отработки программного обеспечения, используя модульный принцип ее построения.

При практической апробации модели результаты измеренных значений сопротивления изоляции и теоретических значений должны сходиться и составлять порядка 100 кОм, и при этом относительная погрешность не должна превышать 10 %. Это достаточно, чтобы доказать достоверность используемой расчетной модели сопротивления изоляции, описанной в данной работе.

Учитывая границы и шаг изменения сопротивления изоляции электросети, необходимо разработать физическую модель, обеспечивающую динамическое изменение сопротивления для различных режимов эксплуатации транспортного средства. Модель необходима для определения оптимальных схемных решений и применяемых методов расчета и коррекции измеренных значений.

С учетом описанных принципов измерения сопротивления изоляции с использованием метода измерения напряжений для разработки физической модели системы контроля изоляции требуется реализовать модель напряжения в измеряемых цепях с использованием ЦАП, имеющего следующие технические характеристики:

- диапазон значений выходного напряжения 0–450 В ± 10 В;
- разрешающая способность на 1 бит не менее 10 мВ;
- погрешность не более ± 5 мВ на канал;
- время нарастания импульса от 0 В до 10 В – 50 мкс;
- время спада импульса от 10 В до 0 В – 50 мкс.

При разработке физической и имитационной моделей необходимо предусмотреть возможность моделирования состояния электронных ключей (программная или аппаратная модель), используемых для переключения каналов измерения изоляции между корпусом высоковольтной батареи и шиной электропитания (положительной и отрицательной).

Для уменьшения сложности, стоимости и времени создания физической модели ее следует выполнять на сигнальном уровне без использования элементов модели с высоким на-

пряжением (> 60 В), для который потребуются особые способы разработки с учетом предъявляемых требований к электрической безопасности (ЕЭК ООН N 100) [4]. Управляющие сигналы включения электронных ключей для измерительных каналов, являющихся входными сигналами физической модели, определяющими включение и выключение каналов измерения в системе контроля изоляции, должны заменяться на информационные сигналы, передаваемые по шине данных от системы контроля изоляции.

Литература

- ГОСТ Р ИСО 6469-1-2016. Транспорт дорожный на электрической тяге. Требования безопасности. Часть 1. Системы хранения энергии аккумуляторные бортовые. М.: Стандартинформ, 2016. 8 с.
- ISO 16750 (все части). Road vehicles Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment.
- IEC 60664-1. Insulation coordination for equipment within low-voltage systems — Part 1: Principles, requirements and tests. International Electrotechnical Commission. 2020. 167 с.
- ГОСТ Р 41.100-99 (Правила ЕЭК ООН N 100). Единые предписания, касающиеся официального утверждения аккумуляторных электромобилей в отношении конкретных требований к конструкции и функциональной безопасности. М.: Изд-во стандартов, 2001. 17 с.
- FMVSS 305. Electric powered vehicles: Electrolyte spillage and electrical shock protection. USA. National Highway Traffic Safety Administration. 2017. 21 с.
- SAE J1766. Recommended Practice for Electric and Hybrid Electric Vehicle Battery Systems Crash Integrity Testing. Группа SAE. 2014. 22с.
- H.M. Vasquez, M. Kuttner: System and method for monitoring an electrical device. Patent US9172233, Assignee: Early Rescue Solutions, LLC, Inventors: M.H. Vasquez, M. Kuttner (2015).
- C. Zhou, S. Hu, W. Sha, Q. Liu, X. Yu: Active detection system of insulation resistance in electric vehicle // Journal of Electronic Measurement and Instrumentation 27 (2013), № 05, pp. 409–414.
- ГОСТ Р ISO 6469-3-2020. Транспорт дорожный на электрической тяге. Требования безопасности. Часть 3. Электробезопасность. Электрические цепи электrorаспределительных систем и электропроводящие вспомогательные электрические системы. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2020. 24 с.
- B. Dong, Y.T. Tian, C.J. Zhou: Fuzzy logic-based optimal control method for energy management of pure electric vehicle // Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition) 45 (2015), № 2, pp. 516–525.
- J. Yang, Z. Zeng, Y. Tang, J. Yan, H. He, Y. Wu: Load frequency control in isolated micro-grid with electrical vehicle based on multivariable generalized predictive theory // Energies 8 (2015), № 3, pp. 2145–2164.
- D. Savitski, V. Ivanov, B. Shyrokau, J.D. Smet, J. Theunissen: Experimental study on continuous abs operation in pure regenerative mode for full electric vehicle // SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems 8 (2015), № 1, pp. 364–369.
- Бахмутов С.В., Гайсин С.В., Карпухин К.Е., Теренченко А.С., Курмаев Р.Х., Зиновьев Е.В. Способ повышения энергоэффективности электромобильного транспорта // Журнал автомобильных инженеров. 2015. № 4 (93). С. 4–10.
- Kurmaev R.Kh., Umnitsyn A.A., Struchkov V.S., Karpukhin K.E., Lyubimov I.A. Development and research of temperature control system of a high-voltage battery of a perspective electric vehicle // Trans and Motauto World. 2018. Т. 3. № 4. С. 151–154.

References

- GOST R ISO 6469-1-2016. Electric road transport. Safety requirements. Part 1. Onboard battery energy storage systems. Moscow: Standartinform Publ., 2016. 8 p.
- ISO 16750 (vse chasti). Road vehicles Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment.
- IEC 60664-1. Insulation coordination for equipment within low-voltage systems – Part 1: Principles, requirements and tests. International Electrotechnical Commission. 2020. 167 p.
- GOST R 41.100-99 (Pravila YEEK OON N 100). Uniform provisions concerning the approval of battery electric vehicles with regard to specific requirements for construction and functional safety. Moscow: Izd-vo standartov Publ., 2001. 17 p.
- FMVSS 305. Electric powered vehicles: Electrolyte spillage and electrical shock protection. USA. National Highway Traffic Safety Administration. 2017. 21 p.
- SAE J1766. Recommended Practice for Electric and Hybrid Electric Vehicle Battery Systems Crash Integrity Testing. Gruppya SAE. 2014. 22 p.
- H.M. Vasquez, M. Kuttner: System and method for monitoring an electrical device. Patent US 9172233,

- Assignee: Early Rescue Solutions, LLC, Inventors: M.H. Vasquez, M. Kuttner (2015).
8. C. Zhou, S. Hu, W. Sha, Q. Liu, X. Yu: Active detection system of insulation resistance in electric vehicle. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation* 27 (2013), No 05, pp. 409–414.
 9. GOST R ISO 6469-3-2020. Electric road transport. Safety requirements. Part 3. Electrical safety. Electrical circuits of electrical distribution systems and electrically conductive auxiliary electrical systems. Moscow: FGUP «StandartinforM» Publ., 2020. 24 p.
 10. B. Dong, Y. T. Tian, C. J. Zhou: Fuzzy logic-based optimal control method for energy management of pure electric vehicle. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)* 45 (2015), No 2, pp. 516–525.
 11. J. Yang, Z. Zeng, Y. Tang, J. Yan, H. He, Y. Wu: Load frequency control in isolated micro-grid with electrical vehicle based on multivariable generalized predictive theory. *Energies* 8 (2015), No 3, pp. 2145–2164.
 12. D. Savitski, V. Ivanov, B. Shyrokau, J. D. Smet, J. Theunissen: Experimental study on continuous abs operation in pure regenerative mode for full electric vehicle. *SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems* 8 (2015), No 1, pp. 364–369.
 13. Bakhmutov S.V., Gaysin S.V., Karpukhin K.E., Terenchenko A.S., Kurmayev R.Kh., Zinov'yev YE.V. A way to improve the energy efficiency of electric vehicles. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*. 2015. No 4 (93), pp. 4–10 (in Russ.).
 14. Kurmaev R.Kh., Umnitsyn A.A., Struchkov V.S., Karpukhin K.E., Lyubimov I.A. Development and research of temperature control system of a high voltage battery of a perspective electric vehicle. *Trans and Motauto World*. 2018. Vol. 3. No 4, pp. 151–154.

MATHEMATICAL MODELING OF A SYSTEM FOR MONITORING THE INSULATION RESISTANCE OF A HIGH-VOLTAGE POWER GRID OF A HYBRID VEHICLE

A.N. Malyshev¹, YE.A. Grunenkov¹, PhD in Engineering V.V. Debelov^{1,2},
DSc in Engineering V.N. Kozlovskiy³, PhD in Engineering A.N. Shishkov²

¹Central research and development automobile and engine institute NAMI, Moscow, Russia

²Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

³Samara State Technical University (Samara Polytech), Samara, Russia

andrey.malyshev@nami.ru, vladimir.debelov@nami.ru

The paper presents mathematical models and computational and analytical dependences, which make it possible to implement a system for monitoring the insulation resistance of a high-voltage power grid of a hybrid vehicle and make it possible to formulate requirements for the physical and simulation model of the software and hardware complex of laboratory tests. The purpose of the work is to determine the main functions and characteristics of the insulation monitoring system, its features, the principle of operation and methods of monitoring the insulation resistance, drawing up requirements for the simulation system. The introduction justifies the importance of monitoring insulation resistance and provides references to standards that regulate the requirements for the measurement and determination of mains failure. The block diagram of the vehicle power supply and the role of the insulation resistance monitoring system in this diagram are presented, the features of insulation monitoring are explained. The principle of operation of the insulation monitoring system and the use of the most common schemes are considered. The calculated dependencies for each of the presented schemes are given. These allow calculating the insulation resistance. The procedure for measuring the insulation resistance according to the ISO standard is described and the corresponding equations are given. For the presented circuit, a graph that explains the principle of the system's operation, when one of the keys is closed, the voltage across the measuring resistor changes with the normal insulation state of the positive and negative power supply bus of the high-voltage system is given. The conclusions provide a generalization of the presented mathematical model and formulate the requirements for the software and hardware complex, which allows simulation and mathematical modeling of electrical systems and their components in various operating modes. The paper explains the features of the software and hardware complex that allows to simulate changes in the insulation resistance and faults of the high-voltage power supply network for a vehicle with a hybrid power plant.

Keywords: power supply system, insulation resistance, hardware and software complex, hybrid power plant.

Cite as: Malyshev A.N., Grunenkov YE.A., Debelov V.V., Kozlovskiy V.N., Shishkov A.N. Mathematical modeling of a system for monitoring the insulation resistance of a high-voltage power grid of a hybrid vehicle. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2021. No 1 (47), pp. 89–98 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-47-1-89-98.