



УДК 621.311  
DOI: 10.53083/1996-4277-2022-208-2-94-101

О.Н. Дробязко, Л.В. Куликова  
O.N. Droblyazko, L.V. Kulikova

## СИСТЕМНО-ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ НА ОБЪЕКТАХ АПК

### SYSTEM-PROBABILISTIC SIMULATION OF ELECTRICAL SAFETY SYSTEMS AT AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX FACILITIES

**Ключевые слова:** электробезопасность, уровень электробезопасности, устройство защитного отключения, системно-вероятностное моделирование.

Разработан метод моделирования, позволяющий по широкому набору учитываемых факторов определять значение достигаемого показателя, оценивающего уровень электробезопасности на основе системно-вероятностного моделирования систем обеспечения электробезопасности на объектах АПК. При проектировании технических систем обеспечения электробезопасности объекта необходимо обеспечить определенный уровень электробезопасности для людей, находящихся на объекте и регулярно взаимодействующих с электроустановками объекта в случаях прямого и косвенного прикосновений токоведущих частей. При этом нужно учитывать вероятность возникновения событий, создающих потенциальную опасность «попадания человека под напряжение» или «включения» человека в цепь тока. В качестве показателя, оценивающего эффективность систем обеспечения электробезопасности, предложен вероятностный параметр, количественно оценивающий остаточную опасность электропоражений людей – риск электропоражений людей на объекте, то есть остаточная вероятность электропоражений людей за некоторый период времени. Рассмотрены следующие принципы математического моделирования процесса функционирования технических систем обеспечения электробезопасности: формального описания структуры подсистемы «части электроустановок – источники опасных ситуаций»; формального описания расположения аппаратов защиты; моделирования подсистемы «Люди» и ее связей с другими подсистемами надсистемы; формализации связей между людьми, частями электроустановок и аппаратами защиты; определения номера аппарата защиты, реагирующего на

«точный» источник опасности; определения и подсчета вероятности случайного события «электропоражение человека на объекте». Такой подход позволил разработать универсальный алгоритм моделирования процесса функционирования технических систем обеспечения электробезопасности, реализованный в программе, с помощью которой осуществляется прогноз уровня электробезопасности для различных объектов АПК, что дает возможность выявлять наиболее уязвимые элементы системы и повышать уровень электробезопасности.

**Keywords:** electrical security, electrical safety level, safety shutdown device, system-probabilistic simulation.

A simulation method has been developed that allows determining the value of the achieved indicator based on a wide set of factors taken into account, assessing the level of electrical safety on the basis of system-probabilistic simulation of electrical safety systems at agricultural facilities. When designing technical systems for ensuring electrical safety of a facility, it is necessary to ensure a certain level of electrical safety for people who are at the facility and regularly interact with the electrical installations of the facility in cases of direct and indirect touching of current-carrying parts. At the same time, it is necessary to take into account the probability of events that create a potential danger of “getting a person under voltage” or “including” a person in the current circuit. As an indicator evaluating the effectiveness of electrical safety systems, a probabilistic parameter is proposed that quantifies the residual danger of electric shocks to people - the risk of electric shocks to people at the facility, that is, the residual probability of electric shocks to people over a certain period of time. The following principles of mathematical modeling of the process of functioning of electrical safety technical systems

are considered: formal description of the structure of the subsystem "parts of electrical installations - sources of dangerous situations"; formal description of the location of protection devices; modeling of the subsystem "People" and its connections with other subsystems of the supersystem; formalization of connections between people, parts of electrical installations and protection devices; determining the number of the protection device responding to a "point" source of danger; determination and calculation of the

probability of a random event "human electrocution at the facility". This approach made it possible to develop a universal algorithm for modeling the functioning of technical electrical safety systems, implemented in a program that predicts the level of electrical safety for various agricultural facilities which allows identifying the most vulnerable elements of the system and increase the level of electrical safety.

**Дробязко Олег Николаевич**, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: drolnik@list.ru.

**Куликова Лидия Васильевна**, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: liliavaskul@gmail.com.

**Drobryazko Oleg Nikolaevich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russian Federation, e-mail: drolnik@list.ru.

**Kulikova Lidiya Vasilevna**, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russian Federation, e-mail: liliavaskul@gmail.com.

### Введение

На протяжении последних 25 лет университете им. И.И. Ползунова разрабатывались математические модели технических систем, обеспечивающих защиту людей, работающих на объектах АПК, от воздействия на них электрического тока [1-3]. Такие системы были названы техническими системами обеспечения электробезопасности (ТСОЭБ).

С помощью таких систем может быть обеспечена защита людей от электрического тока в случаях прямого и косвенного прикосновений. Основными компонентами таких систем являются технические устройства, производящие отключения электроустановок или их частей в случае возникновения событий, создающих потенциальную опасность «попадания человека под напряжение» или «включения» человека в цепь тока.

Для защиты от прямого прикосновения могут быть использованы устройства защитного отключения (УЗО) (с ограниченным значением номинального отключающего дифференциального тока).

При защите от косвенного прикосновения такие устройства (по терминологии ПУЭ [3-5]) представляют собой техническую реализацию защитной меры «автоматическое отключение питания». Такие устройства называются защитно-коммутационными аппаратами, или аппаратами защиты. Рассматриваемые аппараты защиты могут реагировать на сверхтоки или на дифференциальный ток (ток утечки). В первую группу аппаратов входят автоматические вы-

ключатели и предохранители, во вторую – устройства защитного отключения.

В состав некоторых видов рассматриваемых систем, обеспечивающих защиту людей на объекте АПК, помимо аппаратов защиты могут входить также и определенные «проводниковые» компоненты (например, PEN-проводники).

**Цель** исследования – разработать метод моделирования, позволяющий по широкому набору учитываемых факторов определять значение достигаемого показателя, оценивающего уровень электробезопасности на основе системно-вероятностного моделирования систем обеспечения электробезопасности на объекте АПК.

### Объекты и методы

При создании объектов АПК должно быть спроектировано их электрооборудование, выбраны схемы, компоновка и конструкции электроустановок. В рамках такого проектирования необходимо одновременно спроектированная и ТСОЭБ объекта.

При проектировании такой системы необходимо решение следующих задач: 1) выбор мест установки аппаратов защиты (в рамках системы электроснабжения объекта); 2) выбор вида аппарата защиты; 3) выбор защитных параметров аппаратов защиты. Рассматриваемые три проектные задачи решаются последовательно.

При проектировании ТСОЭБ объекта могут быть выбраны различные проектные решения (выбраны различные варианты систем). Такие решения будут обеспечивать различные уровни защиты людей, находящихся на объекте и регулярно взаимодействующих с электроустановка-

ми объекта. (Такие уровни принято называть уровнями электробезопасности.) В связи с этим могут быть поставлены две проектных задачи:

1) оценка достигаемого уровня электробезопасности людей при определенном варианте системы обеспечения безопасности;

2) выбор оптимального варианта системы обеспечения электробезопасности (при наличии нескольких допустимых вариантов системы).

Для решения таких задач необходимо осуществить моделирование процесса функционирования системы обеспечения электробезопасности людей на объекте [6, 7].

При этом в первую очередь должен быть определен показатель, позволяющий оценивать достигаемый уровень электробезопасности на объекте.

После этого должен быть разработан метод моделирования, позволяющий по набору учитываемых факторов, отражающих особенности системы электроснабжения объекта, особенности поведения людей (обусловленного, в первую очередь, характером технологического процесса), надежности электрооборудования, надежности аппаратов защиты и других факторов, определять значение достигаемого показателя, оценивающего уровень электробезопасности на объекте.

Выбор показателя для оценки эффективности системы обеспечения электробезопасности был осуществлен в АлтГТУ на основе использования системного подхода. Было предложено считать, что ТСОЭБ входит как подсистема в состав надсистемы, в которую входят также подсистема источников электроопасных ситуаций и подсистема людей, находящихся на объекте.

При введении подсистемы источников электроопасных ситуаций под источником электроопасной ситуации понималась совокупность двух токопроводящих объектов с различными электрическими потенциалами, которых может коснуться различными частями своего тела че-

ловек, находящийся на объекте АПК. Одним из таких объектов является некоторая часть электроустановки. В качестве такой части может выступать или токоведущая часть электроустановки, или открытая проводящая часть, нормально не находящаяся под напряжением, но которая может оказаться под напряжением при повреждении основной изоляции. Во второй части источника опасной ситуации может выступать пол помещения или заземленная металлоконструкция, которой касается человек.

Таким образом, совокупность источников электроопасных ситуаций на объекте по своему характеру и месторасположению предопределяется совокупностью некоторых частей электроустановок. Две такие тесно связанные подсистемы будут в дальнейшем рассматривать как подсистема «части электроустановок – источники опасных ситуаций» – ЧЭУ/ИОС.

При формировании показателя, оценивающего эффективность системы обеспечения электробезопасности, учитывалось, что такая система существенно снижает интенсивность воздействия электрического тока на людей, находящихся на объекте (при этом предполагается, что в пределах объекта множество источников опасности может воздействовать на множество людей).

Подсистема людей, находящихся на объекте, характеризуется составом таких людей и характеристиками их взаимодействий с источниками опасных ситуаций (с частями электроустановок).

Графически рассматриваемая надсистема может быть представлена в виде прямоугольников, изображающих подсистемы, и стрелок, изображающих связи между этими подсистемами. Защитное действие СОЭБ может быть представлено как уменьшение числа стрелок, изображающих опасные воздействия подсистемы «ЧЭУ/ИОС» на подсистему «Люди». При этом подсистема «СОЭБ» находится «между» двумя указанными подсистемами и резко уменьшает интенсивность связей между ними (рис.).

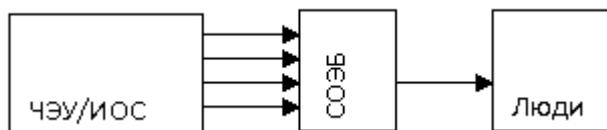


Рис. Надсистема «ЧЭУ/ИОС» – «СОЭБ» – «Люди»

В качестве показателя, оценивающего эффективность СОЭБ, может быть использован

показатель, количественно оценивающий остаточную опасность электропоражений людей на

объекте (имеющую место и при использовании СОЭБ). Он может быть определен так же и как остаточный риск электропоражений людей на объекте.

Традиционной оценкой такого риска является остаточная вероятность электропоражений людей на объекте (за некоторый период времени T). Поскольку в общем случае значения таких вероятностей являются различными для различных людей на объекте, то обычно в качестве показателя эффективности системы рассматривается средняя остаточная вероятность электропоражений людей.

При построении математической модели процесса функционирования технической СОЭБ на объекте АПК нами использовались системный подход к описанию сформированной выше надсистемы и вероятностная концепция описания электропоражений.

Описание особенностей построенных моделей может быть кратко представлено в виде совокупности некоторых принципов моделирования, реализованных в математической модели системы.

Рассмотрим далее разработанные нами принципы математического моделирования процесса функционирования ТСОЭБ на объекте АПК.

1. Принцип формального описания структуры подсистемы ЧЭУ/ИОС.

При описании подсистемы частей электроустановок на объекте АПК следует опираться на имеющуюся структуру системы электроснабжения объекта (на структуру наружной и внутренней электрической сети объекта). Такая структура обычно имеет древовидный характер.

Для ее описания было введено формализованное представление структур, опирающееся на понятие графа.

С помощью вершин такого графа формально описывались «точки ветвления» различных проводящих частей и проводников, входящих в состав различных видов электрооборудования (шины 0,4 кВ на подстанции, главный щит, распределительные устройства различных уровней, магнитные пускатели, комплектные устройства управления и др.). Кроме того, с помощью неразветвляющихся («тупиковых») вершин графа описывались электроприемники и кнопочные станции управления.

В качестве дуг графа рассматривались различные проводниковые элементы – участки

наружной сети и участки электропроводки внутри помещения (участок сети определяется двумя смежными «точками ветвления»).

Древовидный характер сети объекта АПК позволил ввести специальную иерархическую нумерацию ее участков (иерархическую систему координат), учет направления распространения электроэнергии – дополнительные характеристики участков сети, такие как «начало участка сети» и «конец участка сети».

Введенный принцип описания структуры позволил достаточно точно позиционировать положение частей электроустановок, а на его основе и одного из двух объектов источника опасной ситуации.

2. Принцип формального описания расположения аппаратов защиты (АЗ) в сети объекта.

В качестве аппаратов защиты при моделировании ТСОБ нами рассматривались автоматические выключатели, предохранители и устройства защитного отключения (выключатели дифференциального тока).

В распределительных устройствах (РУ) аппараты защиты могут быть расположены как в их головной части, так и на отходящих линиях. Поскольку в РУ «входят» и из них «выходят» некоторые проводниковые части электроустановок, то расположение АЗ в головной части РУ может трактоваться как его установка в «конце» участка сети, подходящего к РУ, а расположение на отходящей линии – как установка АЗ «вначале» проводникового участка сети, выходящего из РУ.

Такое соглашение позволяет однозначно описывать расположение АЗ в сети путем указания иерархического номера участка сети и дополнительного признака, указывающего на «начало» или «конец» этого участка сети.

Можно сказать, что при этом описывается связь АЗ с системой электроснабжения объекта.

3. Принцип моделирования подсистемы «Люди» и ее связей другими подсистемами надсистемы.

Для формализованного описания группы людей, взаимодействующих с электроустановками объекта, достаточно ввести их последовательную нумерацию (занумеровать их с помощью натуральных чисел).

4. Принцип формализации связей между людьми, частями электроустановок и аппаратами защиты.

Важным условием моделирования ТСОЭБ является формализация описания связей между элементами выделенных подсистем надсистемы.

Важно однозначно логически связать определенного человека на объекте с определенным источником электроопасной ситуации (через описание соответствующей части электроустановки), а также дополнительно учесть, каким аппаратом защиты обеспечивается функция электрозащиты их взаимодействия.

Так, в случае возможного прямого прикосновения должно быть описано, какой человек коснулся токоведущей части, какой электроустановки и каким УЗО он будет защищен. В случае косвенного прикосновения также однозначно должно быть описано, какой человек коснулся какой открытой проводящей части электроустановки и какой аппарат защиты будет осуществлять автоматическое отключение питания.

Для формализации таких отношений предложено использовать понятие элементарного взаимодействия трех компонентов надсистемы: определенного человека, определенного ИОС и определенного АЗ. Такое взаимодействие может быть описано как тройка номеров  $[i, j, z]$ . При этом индексом  $i$  обозначается номер человека, индексом  $j$  – номер части электроустановки (определяющей номер ИОС), индексом  $z$  – номер аппарата защиты.

(Индексы  $j$  и  $z$  упрощенно отражают более сложные номера, строящиеся на основе иерархических координат участков сети и указаний дополнительной характеристики «начало» или «конец» участка сети).

Такие тройки индексов формируются отдельно для прямого и косвенного прикосновений для каждого из людей на производственном объекте. Для определенного человека индекс  $j$  указывается в том случае, если имеет место факт касания части электроустановки для косвенного прикосновения и возможен факт прямого прикосновения к токоведущей части электроустановки. Индекс  $z$  указывается с учетом принципа, приводимого ниже.

5. Принцип определения номера АЗ, реагирующего на «точечный» источник опасности.

При моделировании процесса функционирования СОЭБ возникает необходимость в решении вспомогательной задачи – моделирование отношения защиты (отношения между АЗ и защищаемым им объектом).

Она заключается в том, что для части электроустановки, относимой к «концу» некоторого участка сети, должен быть указан номер АЗ, осуществляющего защиту человека, прикоснувшегося к этой части электроустановки сети. (Такое соответствие должно быть указано как при моделировании прямого, так и для косвенного прикосновения.)

Эта задача может быть решена алгоритмическим путем на основе данных о фактической расстановке АЗ в сети и извлечении информации из значения иерархической координаты участка сети, с которым связывается часть электроустановки, создающая «точечный» источник опасности.

Таким образом, после задания номера  $i$  определяется координата  $j$ . После этого на ее основе определяется координата  $z$ .

6. Принцип определения случайного события «электропоражение человека на объекте АПК».

Как было отмечено выше, в качестве показателя эффективности СОЭБ принято, в первую очередь, использовать показатель «средняя остаточная вероятность электропоражения человека на объекте» (за некоторое время  $T$ ).

Случайное событие «электропоражение человека на объекте» определяется на основе некоторых элементарных событий путем представления его в виде суммы произведений таких событий.

Построение такой суммы произведений возможно при принятии некоторых допущений относительно элементарных событий, в частности, допущения о несовместности таких событий, происходящих в течение некоторого периода времени  $T$ . Возможность принятия такого допущения основывается на относительной редкости элементарных событий.

7. Принцип подсчета вероятности случайного события «электропоражение человека на объекте АПК».

Принцип подсчета такой вероятности опирается на последовательное использование теорем сложения и умножения вероятностей некоторых элементарных событий.

При подсчете вероятностей используются несколько уровней элементарных событий.

Наиболее низкий уровень элементарных событий отвечает уровню элементарного взаимодействия трех компонентов надсистемы, рассмотренному в рамках четвертого принципа.

8. Принцип подсчета вероятности электропоражения человека при его элементарном взаимодействии с электроустановкой.

*Случай прямого прикосновения.* Электропоражение человека для этого случая представляется как произведение двух событий: касание человеком токоведущей части электроустановки (событие Кас) и зависимого от него события, определяющегося как возникновение такого сочетания величины тока через тело человека и его длительности, при которых возникает электропоражение человека.

Отметим также, что в рассматриваемых моделях вероятности электропоражения подсчитываются по отношению к определенному периоду времени  $T$ .

Тогда вероятность электропоражения  $i$ -того человека в  $j$ -той части электро-установки (в  $j$ -том источнике опасной ситуации)  $P(\text{ЭП})_{Tij}$  (за время  $T$ ) при защите определенным аппаратом защиты по теореме умножения вероятностей подсчитывается как произведение вероятностей касания человеком проводящей части электроустановки  $P(\text{Кас})_{Tij}$  (за время  $T$ ) и условной вероятности электропоражения  $P(\text{ЭП/Вкл})_{ij}$  при включении человека в цепь тока:

$$P(\text{ЭП})_{Tij} = P(\text{Кас})_{Tij} \cdot P(\text{ЭП/Вкл})_{ij}. \quad (1)$$

Отметим, что указанные в формуле (1) индексы учитывают введенные выше номера элементов надсистемы. В частности, в вероятности касания учитывается, какой человек коснулся какой-либо части электроустановки, а в условной вероятности электропоражения – номер аппарата защиты. Последнее позволяет определить время срабатывания АЗ и, соответственно, время воздействия тока на организм  $i$ -того человека.

*Случай косвенного прикосновения.* Электропоражение для этого случая представляет собой произведение трех событий:

1) повреждение изоляции электроустановки, приводящее к появлению напряжения на проводящей части электроустановки, нормально не находящейся под напряжением (событие Напр);

2) прикосновение человека к проводящей части электроустановки и пересечение во времени интервалов касания и наличия напряжения на проводящей части (событие Пер);

3) возникновения сочетания значений тока через тело человека и его длительности, вызывающих электропоражение.

Тогда вероятность электропоражения  $i$ -того человека в  $j$ -той части электро-установки (в  $j$ -том источнике опасной ситуации)  $P(\text{ЭП})_{Tij}$  при касании  $i$ -том человеком этой части электроустановки при отключении  $j$ -той электроустановки  $z$ -том аппаратом защиты определяется в виде

$$P(\text{ЭП})_{Tij} = P(\text{Кас})_{Tij} \cdot P(\text{ЭП/Вкл})_{jz}. \quad (2)$$

(Наличие системы зануления усложняет построение формулы (2) в связи с тем, что появление напряжения на открытой проводящей части  $j$ -той электроустановки, которой касается человек, может возникнуть вследствие повреждения изоляции в другой электроустановке.)

9. Принцип предварительного расчета значений некоторых вероятностей, используемых при подсчете вероятностей электропоражения человека при его элементарном взаимодействии с электроустановкой.

Перед использованием формул (1) и (2) должен быть выполнен предварительный расчет значений условных вероятностей электропоражений  $P(\text{ЭП/Вкл})_{jz}$ , а также значений вероятностей  $P(\text{Пер})_{ij}$ . В таких расчетах в качестве исходных данных используются значения длительностей срабатываний аппаратов защиты. Такие длительности должны определяться алгоритмическим путем с использования принципа 5, защитных характеристик аппаратов защиты и предварительно вычисленных значений сверхтоков, определяемых местами повреждений изоляции.

10. Принцип ввода значений некоторых вероятностей, используемых при подсчете вероятностей электропоражения человека при его элементарном взаимодействии с электроустановкой.

Некоторые вероятности элементарных событий для выполнения моделирования должны быть введены как исходные данные. К ним относятся вероятности  $P(\text{Кас})_{Tij}$ ,  $P(\text{Напр})_{Tj}$ , а также вероятности отказов АЗ. Оценки таких вероятностей должны быть получены на основе анализа статистических данных, собранных на аналогичных объектах.

### Экспериментальная часть

С учетом изложенных выше принципов в АлтГТУ был сформирован следующий алгоритм моделирования процесса функционирования ТСОЭБ.

На самом нижнем вспомогательном уровне алгоритма осуществляются расчеты, позволяю-

щие определить длительности срабатывания АЗ, на более высоком вспомогательном уровне по специальным методикам – расчет двух последних вероятностей в выражении (2) [1, 2].

Далее по каждому человеку учитывается возможность отказа защищающего его АЗ (в этом случае предполагается, что защиту осуществляет АЗ, находящийся выше по иерархии сети), а также возможность многократных касаний (одной и той же части электроустановки или различных частей различных электроустановок). (Это осуществляется на основе принятия допущений, позволяющих суммировать вероятности некоторых элементарных событий.)

В результате выполнения этих операций определяется вероятность электропоражения каждого человека на объекте. Последней операцией моделирования являлся подсчет средней вероятности электропоражения людей на объекте.

Построенный на основе сформулированных принципов моделирующий алгоритм имеет ряд специфических особенностей, который учитывает структуры выделенных систем и подсистем, а также «картины» межсистемных и межэлементных связей. В своей основной части он предполагает оперирование с вероятностями определенных случайных событий и опирается на иерархическую структуру элементарных событий. Одновременно с этим алгоритм имеет и вспомогательную часть, «подготавливающую» значения вероятностей некоторых элементарных событий, участвующих в расчетах.

### Результаты и их обсуждение

Разработанный алгоритм может осуществлять моделирование ТСОЭБ при любых конфигурациях системы электроснабжения объекта АПК, при любых расстановках и видах аппаратов защиты и любых схемах взаимодействия людей с электроустановками объекта.

Рассмотренный алгоритм был реализован в виде программы для ЭВМ. Тем самым были созданы предпосылки для широкого использования разработанной модели в практике проектирования оптимальных ТСОЭБ на объектах АПК.

### Заключение

Системно-вероятностное моделирование систем обеспечения электробезопасности на объекте АПК позволило разработать универсальный алгоритм, реализованный в программе для

ЭВМ, с помощью которой осуществляется прогноз уровня электробезопасности для различных объектов АПК, что позволяет выявить наиболее уязвимые элементы системы и повысить уровень электробезопасности.

### Библиографический список

1. Куликова, Л. В. Основы электромагнитной совместимости: учебник / Л. В. Куликова, О. К. Никольский, А. А. Сошников. – Изд. 4-е. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2020. – 405 с. ил., табл. – ISBN 978-5-4499-1175-9. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=600138>. – Текст: электронный.

2. Сошников, А. А. Экспресс-оценка эффективности защиты в сетях 0,38 кВ с низким уровнем аварийных токов / А. А. Сошников, Е. В. Титов. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2020. – № 2. – С. 158-164.

3. Правила устройства, эксплуатация и безопасность электроустановок: нормативно-технический сборник. – Барнаул, 2004. – 840 с. – Текст: непосредственный.

4. ПУЭ 7. Правила устройства электроустановок. – Изд. 7-е. – URL: <https://www.elec.ru/library/direction/pue.html>. – Текст: электронный.

5. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – URL: <https://www.elec.ru/library/direction/pteep/>. – Текст: электронный.

6. Boron, S., Heyduk, A., Joostberens, J., Pielot, J. (2016). Empirical Model of a Human Body Resistance at a Hand-To-Hand DC Flow. *Elektronika ir Elektrotechnika*. 22. DOI: 10.5755/j01.eie.22.4.15910.

7. Gierlotka S. Metody badań impedancji ciała człowieka. *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr. 8, 2011, s. 18-20.

### References

1. Kulikova, L.V. Osnovy elektromagnitnoi sovместimosti: uchebник: / L.V. Kulikova, O.K. Nikolskii, A.A. Soshnikov. – Izd. 4-e. – Moskva; Berlin: Direkt-Media, 2020. – 405 s. il., tabl. <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=600138>.

2. Soshnikov, A.A. Ekspress-otsenka effektivnosti zashchity v setiakh 0,38 kV s nizkim urovнем aviariiynkh tokov / A.A. Soshnikov, E.V. Titov // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2020. – No. 2. – S. 158-164.

3. Pravila ustroistva, eksploatatsiia i bezopasnost elektroustanovok. – Normativno-tehnicheskii sbornik. – Barnaul, 2004. – 840 s.

4. PUE 7. Pravila ustroistva elektroustanovok. Izdanie 7. [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.elec.ru/library/direction/pue.html>.

5. Pravila tehnicheckoi eksploatatsii elektroustanovok potrebitelei [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa <https://www.elec.ru/library/direction/pteep/>.

6. Boron, S., Heyduk, A., Joostberens, J., Pielot, J. (2016). Empirical Model of a Human Body Resistance at a Hand-To-Hand DC Flow. *Elektronika ir Elektrotehnika*. 22. DOI: 10.5755/j01.eie.22.4.15910.

7. Gierlotka S. Metody badań impedancji ciała człowieka. *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr. 8, 2011, s. 18-20.



УДК 53.096

DOI: 10.53083/1996-4277-2022-208-2-101-110

Ш.Ф. Нигматуллин, Р.Ф. Самиков,  
М.М. Рязанов, Р.Р. Хайретдинова  
Sh.F. Nigmatullin, R.F. Samikov,  
M.M. Razyarov, R.R. Khayretdinova

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА В СИСТЕМЕ ВЫПУСКА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДВС

### STUDY OF THERMOELECTRIC GENERATOR OPERATION IN EXHAUST SYSTEM OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE

**Ключевые слова:** термоэлектрический генератор, двигатель внутреннего сгорания, теплообменник, модуль, температура, давление, проточная область, отработавшие газы, теплоноситель, газ, жидкость.

Объектом проведенного исследования является работа выпускной системы ДВС совместно с термоэлектрическим генератором. Были проведены тепловой и гидродинамический расчёты теплообменников (ТЭГ), по результатам которых определена наиболее эффективная конструкция проточной области теплообменника термоэлектрического генератора. Собран экспериментальный прототип термоэлектрического генератора на базе термоэлектрических генераторных модулей ТГМ-199-1,4-0,8. Максимальная генерируемая электрическая мощность составила 82,14 Вт. Собрана экспериментальная установка, с использованием которой получены зависимости: генерируемого напряжения с ТЭГ от температуры стенок на горячих сторонах ТГМ при стабильной температуре охлаждающей жидкости 90°C; выходной мощности с ТЭГа от изменения температуры на горячих и холодных стенках ТЭГа. Применение разработанного термоэлектрического генератора позволяет: получить дополнительный источник постоянного тока; повысить степень использования выделяющегося при сгорании топлива тепла ДВС, тем самым частично снизить затраты топлива на привод генератора; обеспечить электроэнергией потребителей постоянного тока на минимальных оборотах коленчатого вала ДВС и при аварийных ситуациях, когда выходные

параметры источника тока нестабильны; возможность генерирования электроэнергии в течение 5-10 мин. с момента остановки двигателя.

**Keywords:** thermoelectric generator, internal combustion engine, heat exchanger, module, temperature, pressure, exhaust gases, coolant, gas, liquid.

The research target is the operation of the exhaust system of an internal combustion engine together with a thermoelectric generator. Thermal and hydrodynamic calculation of heat exchangers was carried out; according to the calculation results, the most efficient design of the flow part of the thermoelectric generator heat exchanger was determined. An experimental prototype of a thermoelectric generator was assembled on the basis of thermoelectric generator modules TGM-199-1.4-0.8. The maximum generated electric power was 82.14 watts. An experimental installation was assembled, the dependences were obtained: the generated voltage and current strength with the thermoelectric generator on the temperature of the walls on the hot sides of the thermoelectric generator at a stable coolant temperature of 90°C; the output power from the thermoelectric generator on temperature changes on the hot and cold walls of the thermoelectric generator. The use of the developed thermoelectric generator allows obtaining an additional DC source; increase the degree of use of the heat released during fuel combustion in the internal combustion engine thereby partially reducing fuel costs for the drive of the main generator; to supply direct current to consumers with electricity at the minimum speed of the crank-