

Повышение надежности работы устройств дистанционного управления и мачтовых разъединителей

Е.Ю. Пузина✉, М.И. Крапивин, А.П. Куцкий

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉lena-rus05@mail.ru

Резюме

В процессе эксплуатации устройств управления объектами систем тягового электроснабжения приходится сталкиваться с их отказами вследствие возникновения аварийных режимов в виде короткого замыкания в контактной сети и удара молнии в оборудование, близко расположенное к устройствам управления. Как следствие, происходят повреждения устройств теле-дистанционного управления и «самоходы» мачтовых разъединителей контактной сети и воздушных линий. Анализ статистики отказов названных устройств, выполненный для одной из дирекций «Трансэнерго», показал, что две трети приводов мачтовых разъединителей имеют риск повреждения цепей их дистанционного управления, поэтому данная проблема является актуальной как для обследуемой дирекции отдельной железной дороги, так и для всей сети ОАО «Российские железные дороги». С целью уточнения величины напряжения, под действием которого повреждается изоляция цепей вторичной коммутации приводов, разработана модель короткого замыкания в контактной сети в программном комплексе Fazonord. Результаты моделирования подтвердили высокую опасность возникающих при этом напряжений в рельсовых цепях. В связи с этим разработаны меры по защите устройств теледистанционного управления и мачтовых разъединителей от «самохода». К таковым относятся: усиление цепей вторичной изоляцией; изоляция конструкций разъединителей и приводов от низкоомных опор; применение защиты от перенапряжений в цепях дистанционного управления; перенос стоек теледистанционного управления и пультов дистанционного управления на минимальное безопасное расстояние к приводам и использование схемных решений по заземлению приводов на рельсовые цепи. При исследовании задействовались следующие методы: статистический анализ информации о состоянии цепей теледистанционного управления и мачтовых разъединителей; имитационное моделирование в программном вычислительном комплексе «Кортэс» режима короткого замыкания в контактной сети; компьютерное моделирование в программном вычислительном комплексе Fazonord с целью расчета напряжения в рельсовой цепи при коротком замыкании в контактной сети.

Ключевые слова

мачтовые разъединители, устройства теледистанционного управления, аварийные режимы, защитные мероприятия, программный вычислительный комплекс

Для цитирования

Пузина Е.Ю. Повышение надежности работы устройств дистанционного управления и мачтовых разъединителей / Е.Ю. Пузина, М.И. Крапивин, А.П. Куцкий // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2 (82). С. 66–78. DOI 10.26731/1813-9108.2024.2(82).66-78.

Информация о статье

поступила в редакцию: 05.06.2024 г.; поступила после рецензирования: 10.06.2024 г.; принята к публикации: 13.06.2024 г.

Improving the reliability of remote control devices and mast disconnectors

E.Yu. Puzina✉, M.I. Krapivin, A.P. Kutsyi

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉lena-rus05@mail.ru

Abstract

During the operation of control devices for traction power supply systems, it is necessary to deal with their failures due to the occurrence of such emergency modes as a short circuit in the contact network and lightning strikes in equipment close to the control devices. As a result, damage to tele-remote control devices and self-propelled mast disconnectors of the contact network and overhead lines occur. An analysis of the failure statistics of these devices, performed for one of the Transenergo directorates, showed that two thirds of the drives of mast disconnectors have a risk of damage to their remote control circuits. Therefore, this problem is relevant both for the surveyed directorate of a separate railway and for the entire network of Russian railways. In order to clarify the magnitude of the voltage under which the insulation of the secondary switching circuits of the drives is damaged, a short circuit model in the contact network in the Fazonord software package has been developed. The simulation results confirmed the high risk of stresses in rail circuits arising in this case. In this regard, measures have been developed to protect remote control devices and mast disconnectors from self-propelled guns. These include: strengthening the insulation of secondary circuits; isolation of disconnector and

drive structures from low-resistance supports; application of surge protection in remote control circuits; transfer of control racks and remote controls to the minimum safe distance to the drives and circuit solutions for grounding drives on rail circuits. In the course of the work, the following research methods were used: statistical analysis of information on the state of the tele-remote control and mast disconnector circuits; the method of simulation modeling in software computing complex «Cortes» of the short-circuit mode in contact network; the method of computer modeling in software computing complex «Fazonord» in order to calculate the voltage in the rail circuit during a short circuit in the contact network.

Keywords

mast disconnectors, remote control devices, emergency modes, protective measures, software computing complex

For citation

Puzina E.Yu., Krapivin M.I., Kutsyi A.P. Povyshenie nadezhnosti raboty ustroystv distantsionnogo upravleniya i machtovykh raz'edinitelei [Improving the reliability of remote control devices and mast disconnectors]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2024, no. 2(82), pp. 66–78. DOI: 10.26731/1813-9108.2024.2(82).66-78.

Article info

Received: June 5, 2024; Revised: June 10, 2024; Accepted: June 13, 2024.

Введение

Современные технологии в области электроэнергетики позволяют осуществлять удаленное управление объектами систем электроснабжения. Однако при использовании теледистанционного управления (ТУ-ДУ) в системах тягового электроснабжения возникает ряд проблем:

- необходимость защиты данных устройств от аварийных режимов;
- разработка и применение защитных мер для мачтовых разъединителей контактной сети (КС) и воздушных линий (ВЛ) от «самохода».

При «самоходе» провода линий электропередачи могут замыкаться между собой или на землю, что может привести к аварийным ситуациям и повреждению оборудования.

Решение перечисленных проблем является актуальной задачей, поскольку приведет к снижению количества повреждений исследуемых устройств и, тем самым, повысит надежность работы систем тягового электроснабжения [1–5].

Постановка задачи исследования

Целью данной работы является разработка конкретных мер по защите устройств ТУ-ДУ в аварийных режимах и защите мачтовых разъединителей от «самохода» [6, 7]. Для достижения данной цели поставлены следующие задачи:

- анализ причин повреждений устройств ТУ-ДУ и причин «самохода» разъединителей при повреждении изоляции цепей дистанционного управления (ДУ);
- разработка модели замыкания КС на рельсовой цепи (РЦ) в программном вычисли-

тельном комплексе (ПВК) Fazonord;

- моделирование режима короткого замыкания в КС для определения напряжения в РЦ в этом режиме;
- разработка мер по защите исследуемых устройств.

Реализация указанной цели должна привести к снижению повреждений устройств ТУ-ДУ и мачтовых разъединителей КС и ВЛ в аварийных режимах, а также обеспечить их защиту от возможного «самохода».

Анализ состояния и причин повреждений устройств теледистанционного управления и мачтовых разъединителей

Выполним анализ состояния и причин повреждений устройств ТУ-ДУ и мачтовых разъединителей по нескольким направлениям.

Анализ состояния цепей дистанционного управления по данным дистанций электроснабжения

Проведен анализ состояния цепей ДУ приводами разъединителей КС и ВЛ, имеющих в хозяйстве одной из дирекций по энергообеспечению АО «Трансэнерго».

По результатам анализа (табл. 1) выявлено, что по хозяйству электроснабжения обследуемой дирекции при существующих условиях эксплуатации из 1 965 приводов разъединителей КС и ВЛ:

- 1 351 привод с риском повреждения цепей ДУ;
- 376 приводов требуют изоляции конструкций от тела опоры в целях электробезопасности и сохранности цепей ДУ;

– 264 привода нарушают требования содержания устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), так как заземлены наглухо на РЦ с сопротивлением менее 100 Ом.

Стоит отметить, что при наличии близко расположенных дроссель-трансформаторов (ДТ) 607 разъединителей заземлены на рельс, что увеличивает риск их повреждения практически в 2 раза.

Для определения актуальности проблемы повреждения устройств ТУ-ДУ на железной

дороге, хозяйство электроснабжения которой обслуживается работниками данной дирекции, собрана информация о количестве поврежденных устройств за 2023 г. (табл. 2).

В соответствии с представленными данными за 2023 г в ЭЧ-5 выявлено 75 случаев повреждения устройств ТУ-ДУ, что оказывает крайне негативное влияние на пропуск поездов и расход материальных ресурсов в обследуемой дирекции.

Таблица 1. Оценка состояния цепей дистанционного управления приводами разъединителей контактной сети и высоковольтных линий

Table 1. Assessment of the condition of remote control drive circuits of contact network disconnectors and high-voltage lines

Показатель Indicator	ЭЧ-										Итого Total
	1	2	5	6	7	8	9	10	11		
Общее количество опор с разъединителями дистанционного управления Total number of supports with remote control disconnectors	261	235	494	226	138	189	115	250	57	1 965	
Количество разъединителей с превышением допустимого напряжения в аварийном режиме Number of disconnectors with excess voltage in emergency mode	203	194	336	117	98	115	89	157	42	1 351	
Количество приводов, требующих изоляции привода от тела опоры и заземление приводов отдельным спуском, либо на дроссель-трансформатор Number of drives requiring insulation of the drive from the support body and grounding of the drives with a separate descent, or to a choke-transformer	112	100	48	80	–	36	–	–	–	376	
Количество приводов и опор, требующих перемонтажа заземления опоры с разъединителями, заземленных на релейную цепь с нарушением требований по сигнализации, централизации и блокировке Number of drives and supports requiring re-installation of support grounding with disconnectors, grounded to the relay circuit in violation of requirements for signaling, centralization and blocking	57	5	33	9	35	2	5	118	–	264	
Наличие близко расположенных дроссель-трансформаторов для заземления либо возможность их дополнительной установки The presence of closely located choke transformers for grounding or the possibility of their additional installation	92	146	98	–	57	–	10	197	7	607	

Таблица 2. Результаты повреждений устройств теледистанционного управления за 2023 г.
Table 2. Results on damage to remote control devices for 2023

Квартал Quarter	ЭЧ-1	ЭЧ-2	ЭЧ-5	ЭЧ-6	ЭЧ-7	ЭЧ-8	ЭЧ-9	ЭЧ-10	ЭЧ-11	Итого Total
1	4	4	23	8	4	4	1	51	4	103
2	4	1	16	6	3	16	14	30	4	94
3	7	4	11	9	5	13	22	42	3	116
4	4	2	25	10	4	12	14	53	2	126
Итого Total	19	11	75	33	16	45	51	176	13	439

В соответствии с анализом повреждений можно выделить случаи, при которых происходит электрическое повреждение изоляции одного элемента (обычно привода разъединителя), нескольких элементов (двух и более приводов, пульта аппаратуры управления приводами (АУП) [8], стойки телеуправления, кабелей вторичной коммутации).

В некоторых случаях создаются условия для «самохода» разъединителей, что угрожает повреждением главных контактов силовой цепи разъединителей и несанкционированным снятием напряжения с КС участков питания, что приведет к развитию повреждений и остановке поездов.

Причины повреждений устройств теледистанционного управления

Отказы устройств ТУ-ДУ чаще всего происходят при воздействии следующих явлений:

– короткое замыкание на электровозах или в КС (рис. 1);

– удары молнии в оборудование, находящееся на относительно малом расстоянии от приводов разъединителей [1].

Стоит отметить, что вследствие удара молнии может произойти короткое замыкание в КС из-за срабатывания устройств защиты от перенапряжений или перекрытия изоляции под воздействием дуговых молниевых разрядов.

Указанные явления вызывают возникновение напряжения в РЦ, в результате появляется напряжение между корпусом привода и кабелями вторичной коммутации и далее контуром заземления тяговой подстанции или поста электрической централизации (ЭЦ) значение которого достигает 500–5 000 В и более в течение 0,1–0,5 с., что соответствует времени срабатывания устройств релейной защиты и автоматики. Таким образом, под воздействием этого высокого уровня напряжения и развивается процесс повреждения устройств ТУ-ДУ.

Принцип возникновения напряжения на РЦ в точке заземления привода представлен на рис. 2.



Рис. 1. Электрические параметры, сопровождающие повреждения устройств теледистанционного управления

Fig. 1. Electrical parameters accompanying damage to remote control devices

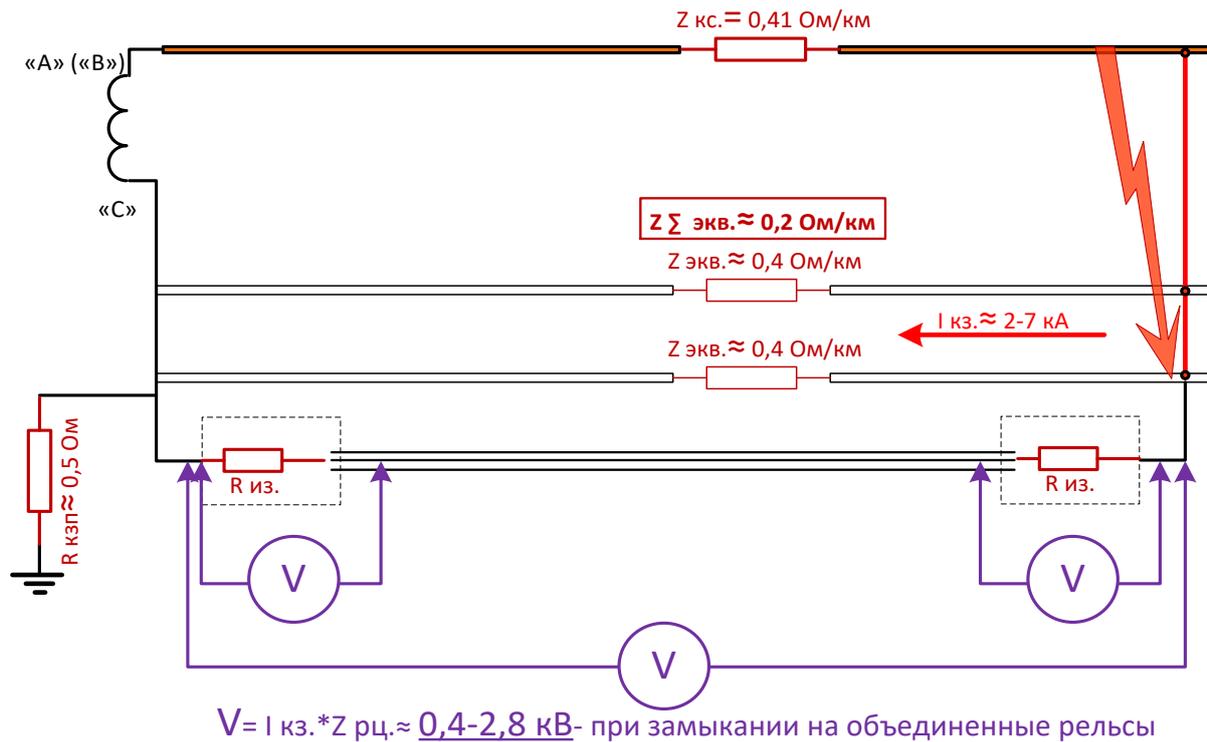


Рис. 2. Возникновение напряжения на релейной цепи в точке заземления привода

Fig. 2. The occurrence of voltage on the relay circuit at the drive grounding point

Как видим, причиной этого является процесс протекания тока короткого замыкания по РЦ в направлении к тяговому трансформатору [9]. Поскольку в момент короткого замыкания благодаря нелинейным свойствам стали активное сопротивление рельсов значительно возрастает, то это приводит к существенному увеличению уровня напряжения, воздействующего на изоляцию кабелей вторичной коммутации, которое фактически равно падению напряжения на РЦ.

В случае возникновения удара молнии из-за значительного тока величина возникающего напряжения обычно лежит в пределах 10–20 кВ, в редких случаях достигая 70 кВ. Естественно, эти значения более чем опасны для изоляции кабелей вторичной коммутации устройств ТУ-ДУ. Однако следует учитывать, что молниевые разряды, имея высокую частотную характеристику, не распространяются по протяженным металлическим проводникам (в среднем до 300 м).

В целях предотвращения отказов устройств ТУ-ДУ необходимо применять защитные меры от перечисленных явлений.

Причины самохода разъединителей при повреждении изоляции дистанционного управления

1. При пробое изоляции на одном из приводов, как правило, происходит замыкание на землю и между собой всех трех схемных проводов, как в приводе, так и в АУП привода. Данное замыкание приводит к отключению питания АУП штатной токовой защитой и/или перегоранием штатных предохранителей питания. С учетом подключения цепей сигнализации к управляющим проводам и объединения их через контакты реле ТУ-ДУ на общую точку, происходит объединение всех управляющих проводов всеми приводами через цепи сигнализации с замыканием на контур тяговой подстанции. Таким образом, в момент короткого замыкания создается цепь протекания части тока короткого замыкания через кабель вторичной коммутации по пути: «КС – место повреждения – РЦ – заземление привода – поврежденная изоляция вторичной коммутации привода – жилы кабеля 1, 2, 3 привода с поврежденной изоляцией – поврежденные цепи сигнализации (либо другая поврежденная аппаратура) в АУП – контур заземления подстанции и фаза «С» тягового трансформатора».

2. Режим воздействия тока короткого замыкания кратковременный – 0,1 с при замыкании вблизи тяговых подстанций, либо 0,5 с. – при удаленных замыканиях.

3. Протекание тока короткого замыкания вызывает кратковременную разность потенциалов между жилами «2» и «3» («1») неповрежденных приводов величиной до 2,4 кВ. Данная величина не способна осуществить полноценное переключение, однако может привести к сдергиванию привода либо повреждению его изоляции.

4. При отсутствии повреждения изоляции смежных приводов после отключения тока короткого замыкания система переходит в режим транзита через кабель вторичной коммутации по пути: «КС – место повреждения – РЦ – заземление привода – поврежденная изоляция вторичной коммутации привода – жилы кабеля 1, 2, 3 привода с поврежденной изоляцией – поврежденные цепи сигнализации (либо другая поврежденная аппаратура) в АУП – контур заземления подстанции и фаза «С» тягового трансформатора».

5. Протекание тягового тока вызывает длительную разность потенциалов между жилами «2» и «3» («1») неповрежденных приводов величиной от 140 до 250 В. Данная величина способна осуществить полноценное переключение и не повреждает изоляцию смежного привода.

6. Молниевые разряды, имея высокую частотную характеристику, не распространяются по протяженным металлическим проводникам (в среднем до 300 м). Таким образом, для снижения вероятности влияния молниевых разрядов на низковольтные цепи, рекомендуется располагать приводы и разъединители с ДУ, максимально далеко от устройств грозозащиты (разрядников, ограничители перенапряжения нелинейные) – не ближе 300 м.

В результате анализа выявлены электрические параметры, от которых необходимо защищаться для уменьшения вероятности повреждения вторичной коммутации цепей ТУ-ДУ:

- напряжение в РЦ величиной свыше допустимого для низковольтной коммутации;
- токи в кабелях ДУ, превышающие допустимые токи жил кабелей ДУ;
- время воздействия аварийных режимов.

Основным «спусковым крючком» аварийного режима, приводящим в действие про-

цесс повреждения, является высокий уровень напряжения РЦ относительно цепей вторичной коммутации и далее контура подстанции или поста ЭЦ.

Расчет напряжения в рельсовой цепи при коротком замыкании в контактной сети

Моделирование короткого замыкания в контактной сети

Для моделирования режима короткого замыкания в КС [10–15] с целью определения величины тока использован программный комплекс «Кортэс». В качестве примера рассмотрен участок ДЛ – АН Восточного полигона.

Имитационная модель для режима короткого замыкания в левом и правом плечах КС, питающихся от подстанции ДЛ, в качестве примера представлена на рис. 3.

Результаты моделирования по всем подстанциям, постам секционирования (ПС), пунктам параллельного соединения (ППС) исследуемого участка приведены в табл. 3.

Разработка модели замыкания контактной сети на релейную цепь в программно-вычислительном комплексе Fazonord

Для решения задачи определения величины напряжения в точке короткого замыкания в КС и относительно «удаленной земли» разработана модель замыкания КС на рельс в ПВК Fazonord (рис. 4) [11]. На рисунке использованы следующие обозначения: J – источник тока, с помощью которого моделируется ток короткого замыкания на рельс; R1-RL(C) – элемент, с помощью которого оценивается уровень напряжения в РЦ в точке короткого замыкания и в точке относительно «удаленной земли» (сопротивление данного элемента принимается 1 000 Ом из условия ограничения по напряжению 1 000 В); R2-RL(C) – элемент, с помощью которого моделируется замыкание на два рельса (сопротивление данного элемента, равное ранее рассчитанным значениям тока короткого замыкания, подставляем в источник тока и далее с помощью элемента R1 оцениваем уровень напряжения в РЦ в точке замыкания и в точке относительно «удаленной земли»). Полученные значения сведены в табл. 4.

Анализ значений напряжения в точке короткого замыкания и относительно «удаленной земли» на участке ДЛ – АН позволяет сделать вывод, что оборудование ТУ-ДУ не выдержива-

ет данные напряжения, так как предельно допустимое напряжение в точке относительно «удаленной земли» составляет 1 000 В, а при возникновении короткого замыкания на одиночный рельс – до 2 000 В, что является критичным для

изоляции низковольтных цепей ТУ-ДУ. Следовательно, происходит разрушение данного оборудования, что приводит к «самоходу» разъединителей (0,01 Ом).

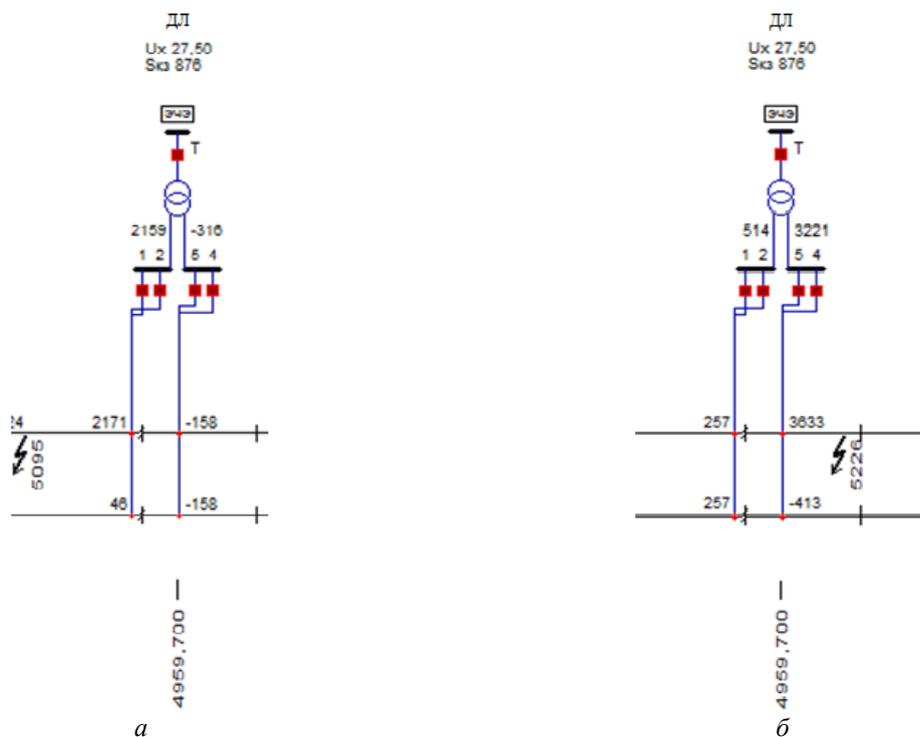


Рис. 3. Имитационная модель короткого замыкания в контактной сети в левом (а) и правом (б) плече
Fig. 3. Simulation model of a short circuit in the contact network in the left (a) and right (b) shoulder

Таблица 3. Значения тока короткого замыкания на релейной цепи
Table 3. Short-circuit current values in a relay circuit

Подстанция, пост секционирования, пункт параллельного соединения Substation, sectioning post, parallel connection point	Максимальный ток короткого замыкания, А Maximum short-circuit current, A	Ток релейной цепи на «запад», А Relay circuit current to the «west», A	Ток релейной цепи на «восток», А Relay circuit current to the «east», A	Максимальное безопасное расстояние от пульта дистанционного управления до привода разъединителя, м Maximum safe distance from the remote control to the disconnector drive, m
ДЛ	5 804	2 171	3 633	475
ЗЛ	6 790	4 448	2 342	381
ГЛ	7 400	2 356	5 044	344
ПЛ	7 645	5 271	2 374	330
УС	7 646	5 421	2 225	321
СХ	7 587	5 039	2 548	344
ИС	6 797	4 229	2 568	374
ГН	8 553	2 617	5 936	292
РС	8 209	5 272	2 937	293
ППС ОГ	7 825	3 740	4 085	423
ПД	7 831	2 783	5 048	345
ПС ГЛ	8 969	5 045	3 924	324
АН	9 244	5 297	3 947	324

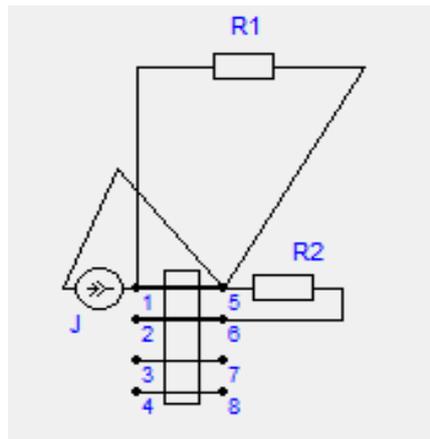


Рис. 4. Модель замыкания контактной сети на рельс в программном вычислительном комплексе Fazonord
Fig. 4. Model of contact network closure on rail in the Fazonord software computing complex

Таблица 4. Расчетные значения напряжения в точке короткого замыкания и относительно «удаленной земли»

Table 4. Calculated values of voltage at the short circuit point and relative to the «remote ground»

Подстанция, пост секционирования, пункт параллельного соединения Substation, sectioning post, parallel connection point	Расчитанное значение напряжения, кВ Calculated voltage value, kV	
	В точке короткого замыкания At the point of short circuit	Относительно «удаленной земли» Relative to «remote ground»
ДЛ	3,00	1,50
ЗЛ	3,34	1,67
ГЛ	3,46	1,73
ПЛ	3,54	1,77
УС	3,40	1,70
СХ	3,50	1,75
ИС	3,42	1,71
ГН	3,70	1,85
РС	3,76	1,88
ППС ОГ	3,56	1,78
ПД	3,58	1,79
ПС ГЛ	3,36	1,68
АН	3,84	1,92

Разработка мер по защите устройств теледистанционного управления в аварийных режимах и защита мачтовых разъединителей контактной сети и высоковольтных линий от самохода

Существует ряд разработок в области повышения надежности работы двигательных приводов [16–22]. В настоящей работе предлагаются, исходя из результатов анализа статистики повреждений приводов мачтовых разъединителей и устройств ТУ-ДУ, следующие меры их защиты.

1. Усиление изоляции цепей вторичной коммутации.

В качестве предупредительных мер по

усилению изоляции устройств предлагается:

- замена тумблеров с металлическим корпусом на полимерные;
- замена винтов колодок подключения на короткие винты;
- замена кнопок блокировки с металлическим корпусом на полимерные;
- дополнительная изоляция кожуха двигателя относительно корпуса листовым полимерным материалом.

2. Изоляция конструкций разъединителей и приводов от низкоомных опор.

Ручное переключение привода, заземленного через искровой промежуток, является крайне опасным действием, так как при повре-

ждении изоляции (например, в результате излома колонки) на конструкцию подается рабочее напряжение величиной 27,5 кВ. При дистанционном переключении данное напряжение, безусловно, приведет к развитию аварии в цепях ДУ. Защититься от воздействия 27,5 кВ не представляется возможным.

С другой стороны, при глухом заземлении низкоомных опор с приводами возникает асимметрия тяговых токов, что может привести к неисправностям в цепях автоблокировки и ложным показаниям напольной и локомотивной сигнализации.

Кардинальное решение – это установка дополнительной высокоомной опоры с переносом привода, что требует больших материальных и физических затрат.

В качестве меры изоляции приводов от тела опоры предлагается вместо всех металли-

ческих болтовых соединений внедрить полиамидные болты, гайки, шайбы и фланцевые прокладки (рис. 5).

3. Применение защиты от перенапряжений в цепях дистанционного управления.

Штатная защита на базе искровых промежутков (варисторов), установленная в пультах ДУ, не обеспечивает защиту цепей ТУ по причине завышенного предела срабатывания (600–1 200 В) и защиту от «самохода», так как при срабатывании не исключает связь внешних цепей и контура заземления пульта ДУ.

В настоящее время защита цепей от перенапряжений, исключающая повреждение оборудования ДУ, не разработана. Предлагается в качестве защиты от перенапряжений использовать заводские реле типа РН-111 с установкой в питающие и управляющие провода каждого привода (рис. 6).

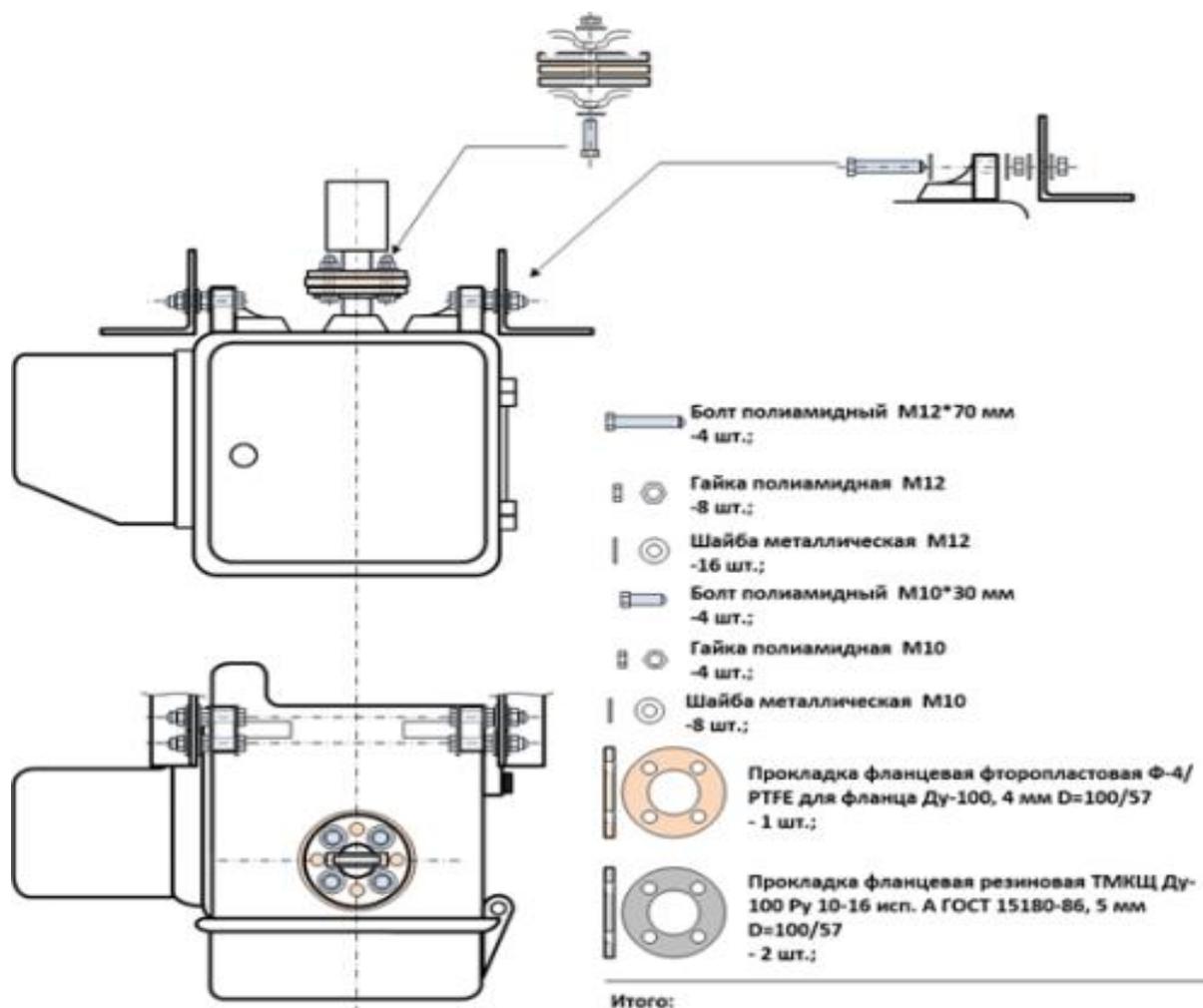


Рис. 5. Конструкция привода, закрепленная на полиамидные крепежи

Fig. 5. Drive design secured with polyamide fasteners

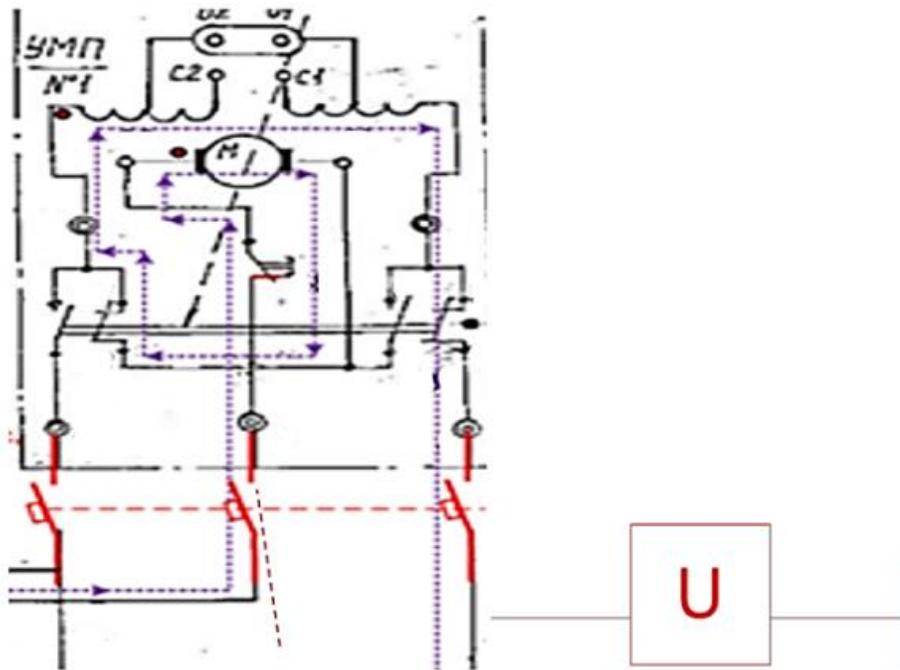


Рис. 6. Схема подключения реле типа РН-111
 Fig. 6. Wiring diagram for the relay of RN-111 type

При появлении сверхдопустимого потенциала, опасного для изоляции вторичной коммутации, происходит быстродействующее отключение питающих проводов, что позволяет исключить развитие повреждения и «самоходы» разъединителей, даже при повреждении внутренней изоляции привода.

4. Перенос стоек ТУ-ДУ и пультов дистанционного управления на минимально безопасное расстояние к приводам и схемные решения по заземлению приводов на РЦ.

Как было указано ранее, напряжение на элементах вторичной коммутации напрямую зависит от следующих факторов:

- величины тока короткого замыкания;
- расстояния (длины кабеля управления) от пульта ДУ до привода;
- схемы заземления привода на РЦ.

Уменьшить токи короткого замыкания в условиях эксплуатации до безопасных величин не представляется возможным.

Сокращение расстояния от пульта до привода приводит к значительному снижению уровня напряжения и, как следствие, уменьшению вероятности повреждения устройств ТУ-ДУ. Так, при средних токах 5 кА и эквивалентном сопротивлении двойной РЦ 0,2 Ом/км с расстоянием до привода 1 000 м, напряжение

на вторичной коммутации составит:

$$U = I_{кз} \cdot L \cdot Z_{уд},$$

$$U = 5000 \cdot (1 \cdot 0,2) = 1\ 000\ \text{В}.$$

где $I_{кз}$ – ток короткого замыкания, А; L – расстояния до привода, км; $Z_{уд}$ – сопротивление двойной РЦ, Ом/км.

При сокращении расстояния до 50 метров падение напряжения на участке РЦ составит:

$$U = 5\ 000 \cdot (0,05 \cdot 0,2) = 50\ \text{В},$$

что безопасно для изоляции цепей.

Однако перенос пультов и стоек ТУ к приводам является достаточно трудоемким мероприятием, требующим организации цепей питания, подвода линий связи и корректировок алгоритмов управления на диспетчерских пунктах. Данное эффективное мероприятие следует применять в исключительных случаях, когда проведение иных мероприятий недостаточно эффективно либо физически невозможно.

Схема заземления привода на РЦ оказывает кратное влияние на уровни напряжений за счет растекания токов короткого замыкания по РЦ. При заземлении на одиночный рельс и возникновении повреждения изоляции КС с транзитом тока короткого замыкания через этот же рельс, расположенный с полевой стороны, уровень напряжения максимален. При заземлении на среднюю точку специально установленного

либо близкорасположенного путевого ДТ, ток короткого замыкания, распределяясь по двум рельсам, вызывает увеличение напряжения вдвое меньше. При заземлении на среднюю точку междупутной перемычки ток распределяется по четырем рельсовым нитям, а уровень напряжения уменьшается приблизительно в 4 раза, что исключает вероятность повреждения.

Таким образом, заземление приводов на близко расположенные путевые ДТ и междупутные перемычки является эффективной и малозатратной мерой защиты устройств ТУ-ДУ от повреждений в аварийных режимах.

Заключение

В ходе выполнения исследования изучены и разработаны меры по защите устройств ТУ-ДУ в аварийных режимах и защите мачтовых разъединителей КС и ВЛ от «самохода».

В результате анализа состояния цепей ДУ выявлено, что большая часть из них не обеспечивает полной защиты от возможных аварийных ситуаций и не гарантирует сохранность оборудования.

С целью оценки значений тока короткого замыкания в КС использован ПВК «Кортэс». Для определения величины напряжения в точке короткого замыкания и относительно «удален-

ной земли» разработана модель замыкания КС на рельс в ПВК Fazonord.

С учетом проведенных исследований разработаны меры по защите устройств ТУ-ДУ и мачтовых разъединителей КС и ВЛ от «самохода». Они включают в себя следующее:

- усиление изоляции вторичной коммутации;
- изоляция конструкций разъединителей и приводов от низкоомных опор;
- применение защиты от перенапряжений в цепях ДУ;
- перенос стоек ТУ и пультов ДУ на минимальное безопасное расстояние к приводам и использование схемных решений по заземлению приводов на РЦ.

Применение разработанных мер обеспечит надежное функционирование устройств ТУ-ДУ и мачтовых разъединителей КС и ВЛ в аварийных режимах, а также их защиту от возможного «самохода», что приведет к повышению надежности работы системы тягового электроснабжения в целом и к снижению эксплуатационных расходов, связанных с восстановлением нормальной работы устройств ТУ-ДУ и мачтовых разъединителей КС и ВЛ.

Список литературы

1. Плотников И.И. Обнаружение неисправностей в системе тягового электроснабжения // Железнодорожный транспорт. 2023. № 8. С. 45–47.
2. Урлапов С.С., Крапивин М.И. Анализ повреждаемости электрооборудования тяговых подстанций на Восточно-Сибирской железной дороге // Молодая наука Сибири. 2023. № 2 (20). С. 106–114. URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/1290/951> (Дата обращения 18.03.2024).
3. Худоногов И.А. Причины повреждаемости силовых маслонаполненных трансформаторов тяговых подстанций ВСЖД // Техничко-экономические проблемы развития регионов : материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. Иркутск, 2022. Т. 25. С. 203–207.
4. Определение современных показателей надежности устройств релейной защиты и автоматики / А.В. Виноградов, А.А. Лансберг, Ю.Д. Волчков и др. // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. № 2. С. 58–70.
5. Reliability analysis of power equipment of traction rolling stock within the Eastern region / A.M. Khudonogov, I.A. Khudonogov, E.Yu. Dulskiy et al. // International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2019). Moscow, 2019. Vol. 760. DOI 10.1088/1757-899X/760/1/012018.
6. Вендин С.В. К вопросу о разъединителях электрических цепей // Органическое сельское хозяйство : проблемы и перспективы : материалы XXII междунар. науч.-производ. конф. Майский, 2018. Т. 1. С. 161–163.
7. Макаревич Д.М., Лустенков М.Е., Никитин А.П. Кинематический и динамический анализ привода для переключения контактных разъединителей // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2007. № 7. С. 87–94.
8. Аппаратура управления приводами АУП-5. Техническое описание Ам147.00.000ТО. М. : Московский энергетический завод, 2019. 34 с. URL : <https://mez.ru/wp-content/uploads/2023/12/am147.00.000to-tehnicheskoe-opisanie.pdf> (Дата обращения 01.06.2024).
9. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized diagnostic parameter for condition assessment of power transformer windings insulation // International Russian Automation Conference. 2019. DOI 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867610.
10. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). М. : Высш. шк., 1984. 438 с.
11. Крюков А.В. Моделирование электрических нагрузок. Иркутск : ИрГУПС, 2004. 64 с.

12. Cherpanov A., Kutsyi A. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). Sochi, 2018. P. 1–5. DOI 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501734.
13. Основы электротехники, микроэлектроники и управления. Теория и расчет. / Ю.А. Комиссаров, Л.С. Гордеев, Д.П. Вент и др. Т. 1. М.: Химия, 2007. 451 с.
14. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высш. шк., 1987. 248 с.
15. Пузина Е.Ю. Усиление системы тягового электроснабжения участка Чуро – Таксимо ВСЖД // Транспорт: наука, образование, производство : тр. междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2016. Т. 2. С. 306–310.
16. Курганов В.В., Крышнев Ю.В., Каптуров О.П. Повышение надежности автоматического управления самозапуском синхронных двигателей цифровым реле Sepam 2000 // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. 2009. № 1 (36). С. 49–58.
17. Быкадоров А.Л., Заруцкая Т.А., Попов М.О. Инновационные методы анализа основных компонент для оценки и диагностики состояния контактной сети // Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи : сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2023. С. 50–53.
18. Тришин Д.Н., Вендин С.В. Эксплуатация разъединителей в сетях 6–10 кВ // Актуальные проблемы агроинженерии в XXI веке : материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 30-летию кафедры технической механики конструирования машин. Майский, 2018. С. 545–548.
19. Усовершенствование схемы блока управления электродвигателя малогабаритного стрелочного универсального / К.В. Менакер, А.В. Пультяков, М.В. Востриков и др. // Автоматика на транспорте. 2023. Т. 9. № 4. С. 313–323.
20. Зональная система повышения надежности электрических машин тягового подвижного состава / А.М. Худоногов, В.П. Смирнов, Е.М. Лыткина и др. // Наука и техника транспорта. 2015. № 1. С. 75–78.
21. К повышению надежности устройств контактной сети / А.С. Есауленко, В.П. Ступицкий, В.А. Тихомиров и др. // Молодая наука Сибири. 2021. № 2 (12). С. 200–205. URL: <http://mnv.irkgups.ru/toma/212-2021> (Дата обращения 18.03.2024).
22. Разработка и исследование малогабаритного привода для высоковольтных разъединителей контактных сетей и систем электрификации железных дорог / Д.М. Макаревич, А.П. Никитин, С.Д. Макаревич и др. // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2006. № 5. С. 100–105.

References

1. Plotnikov I.I. Obnaruzhenie neispravnostei v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya [Detection of faults in the traction power supply system]. *Zhelezнодорожный транспорт* [Railway transport], 2023, no. 8, pp. 45–47.
2. Uralpov S.S., Krapivin M.I. Analiz povrezhdaemosti elektrooborudovaniya tyagovykh podstantsii na Vostochno-Sibirskoi zheleznoi doroge [Analysis of damage to electrical equipment of traction substations on the East Siberian Railway]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia], 2023, no. 2 (20), pp. 106–114.
3. Khudonogov I.A. Prichiny povrezhdaemosti silovykh maslonapolnennykh transformatorov tyagovykh podstantsii VSZhD [Causes of damage to power oil-filled transformers of traction substations of East Siberian Railway]. *Materiyaly nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhduнародnym uchastiem «Tekhniko-ekonomicheskie problemy razvitiya regionov»* [Proceedings of a Scientific and Practical Conference with International Participation «Technical and Economic Problems of Regional Development»]. Irkutsk, 2022, vol. 25, pp. 203–207.
4. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Volchkov Yu.D., Vinogradova A.V. Opredelenie sovremennykh pokazatelei nadezhnosti ustroystv releinoi zashchity i avtomatiki [Determination of modern indicators of reliability of relay protection and automation devices]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki* [Bulletins of higher educational organizations. Energy problems], 2023, vol. 25, no. 2, pp. 58–70.
5. Khudonogov A.M., Khudonogov I.A., Dul'skii E.Y., Ivanov P.Yu., Lobytsin I.O., Khamnaeva A.A. Reliability analysis of power equipment of traction rolling stock within the Eastern region. *International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2019)*. Moscow, 2019, vol. 760. DOI: 10.1088/1757-899X/760/1/012018.
6. Vendin S.V. K voprosu o raz'edinitel'nykh elektricheskikh tsepei [On the issue of disconnectors of electric circuits]. *Materiyaly XXII mezhduнародnoi nauchno-proizvodstvennoi konferentsii «Organicheskoe sel'skoe khozyaystvo: problemy i perspektivy»* [Proceedings of the XXII International scientific and industrial conference «Organic agriculture: problems and prospects»]. Maiskii, 2018, vol. 1, pp. 161–163.
7. Makarevich D.M., Lustenkov M.E., Nikitin A.P. Kinematicheskii i dinamicheskii analiz privoda dlya pereklyucheniya kontaknykh raz'edinitelei [Kinematic and dynamic analysis of a drive for switching contact disconnectors]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii* [New materials and technologies in mechanical engineering], 2007, no. 7, pp. 87–94.
8. Apparatura upravleniya privodami AUP-5. Tekhnicheskoe opisanie Am147.00.000TO [Drive control equipment AUP-5. Technical description Am147.00.000TO]. Moscow: Moskovskii energomekhanicheskii zavod Publ., 2019. 34 p. Available at: <https://mez.ru/wp-content/uploads/2023/12/am147.00.000to-tehnicheskoe-opisanie.pdf> (Accessed June 1, 2024).
9. Khudonogov I.A., Puzina E.Yu., Tuigunova A.G. Summarized Diagnostic Parameter for Condition Assessment of Power Transformer Windings Insulation. *International Russian Automation Conference*, 2019. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867610.
10. Venikov V.A., Venigov G.V. Teoriya podobiya i modelirovaniya (primenitel'no k zadacham elektroenergetiki) [Theory of similarity and modeling (in relation to the tasks of the electric power industry)]. Moscow: Vysshya Shkola Publ., 1984. 438 p.
11. Kryukov A.V. Modelirovanie elektricheskikh nagruzok [Modeling of electrical loads]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2004. 64 p.
12. Cherpanov A., Kutsyi A. Modeling of Tractive Power Supply Systems for Heavy-Tonnage Trains Operation. *2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. Sochi, 2018, pp. 1–5.

13. Komissarov Yu.A., Gordeev L.S., Vent D.P., Babokin G.I. Osnovy elektrotekhniki, mikroelektroniki i upravleniya. Teoriya i raschet (v 2 t) [Fundamentals of electrical engineering, microelectronics and control. Theory and calculation (In 2 vol.)]. Vol. 1. Moscow: Khimiya Publ., 2007. 451 p.
14. Kopylov I.P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin [Mathematical modeling of electrical machines]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1987. 248 p.
15. Puzina E.Yu. Usilenie sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya uchastka Churo – Taksimo VSZhD [Strengthening the traction power supply system of the Churo – Taksimo section of the Eastern Siberian Railway]. *Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Transport: science, education, production»]. Rostov-on-Don, 2016, vol. 2, pp. 306–310.
16. Kurganov V.V., Kryshnev Yu.V., Kapturov O.P. Povyshenie nadezhnosti avtomaticheskogo upravleniya samozapuskom sinkhronnykh dvigatelei tsifrovym rele Sepam 2000 [Improving the reliability of automatic self-start control of synchronous motors by digital relay Sepam 2000]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo* [Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi], 2009, no. 1 (36), pp. 49–58.
17. Bykadorov A.L., Zarutskaya T.A., Popov M.O. Innovatsionnye metody analiza osnovnykh komponent dlya otsenki i diagnostiki sostoyaniya kontaktnoi seti [Innovative methods of analysis of the main components for assessing and diagnosing the state of the contact network]. *Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Energetika transporta. Aktual'nye problemy i zadachi»* [Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference «Energy of transport. Current problems and challenges»]. Rostov-on-Don, 2023, pp. 50–53.
18. Trishin D.N., Vendin S.V. Eksploatatsiya raz'edinitelei v setyakh 6–10 kV [Operation of disconnectors in 6–10 kV networks]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 30-letiyu kafedry tekhnicheskoi mekhaniki konstruirovaniya mashin «Aktual'nye problemy agroinzhenerii v XXI veke»* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Actual problems of agroengineering in the XXI century»]. Maikii, 2018, pp. 545–548.
19. Menaker K.V., Pul'tyakov A.V., Vostrikov M.V., Orlov A.V. Uovershenstvovanie skhemy bloka upravleniya elektrodvigatelya malogabaritnogo strelochnogo universal'nogo [Improvement of the circuit of the control unit of the electric motor of a small-sized universal switch]. *Avtomatika na transporte* [Automation in transport], 2023, vol. 9, no. 4, pp. 313–323.
20. Khudonogov A.M., Smirnov V.P., Lytkina E.M., Dul'skii E.Yu., Ivanov P.Yu., Garev N.N. Zonal'naya sistema povysheniya nadezhnosti elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava [Zonal system for improving the reliability of electric traction rolling stock machines]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology of transport], 2015, no. 1, pp. 75–78.
21. Esaulenko A.S., Stupitskii V.P., Tikhomirov V.A., Lobanov O.V. K povysheniyu nadezhnosti ustroystv kontaktnoi seti [To increase the reliability of contact network devices]. *Molodaya nauka Sibiri* [Young Science of Siberia]. 2021, no. 2(12), pp. 200–205.
22. Makarevich D.M., Nikitin A.P., Makarevich S.D., Pitkova T.N. Razrabotka i issledovanie malogabaritnogo privoda dlya vysokovol'tnykh raz'edinitelei kontaktnykh setei i sistem elektrifikatsii zheleznykh dorog [Development and research of a small-sized drive for high-voltage disconnectors of contact networks and railway electrification systems]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii* [New materials and technologies in mechanical engineering], 2006, no. 5, pp. 100–105.

Информация об авторах

Пузина Елена Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

Крапивин Михаил Иванович, кафедра электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: mihail.krapivin03@gmail.com.

Куцый Антон Павлович, начальник Молодежного научного центра, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: kutsyi_ap@irgups.ru.

Information about the authors

Elena Yu. Puzina, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: lena-rus05@mail.ru.

Mikhail I. Krapivin, Department of Electric Power Industry of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: mihail.krapivin03@gmail.com.

Anton P. Kutsyi, Head of the Youth Research Center, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: kutsyi_ap@irgups.ru.