

Обеспечение электробезопасности систем электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока для линий ВСМ

А. Б. КОСАРЕВ¹, А. В. БАРЧ¹, Е. Н. РОЗЕНБЕРГ²

¹ Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

² Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, 109029, Россия

Аннотация. В статье на базе полученных в более ранних работах результатов обоснована методика расчета допустимых, исходя из условий обеспечения электробезопасности, напряжений рельсы — земля и опорах контактной сети, учитывающая особенности безбалластного верхнего строения пути (для линий ВСМ). Показано, что при расчете вероятности безопасной работы необходимо учитывать случайный характер как допустимых напряжений, так и реально возникающих на рельсовом пути. Установлено, что вероятность безопасной работы в тяговых сетях участков с безбалластным верхним строением пути не превышает аналогичной величины на электрифицированных участках с традиционным строением балластной призмы. Подтверждена целесообразность использования в системе тягового электроснабжения 2×25 кВ заземления с применением искусственного заземлителя.

Ключевые слова: электробезопасность; коэффициент прикосновения; вероятность безопасной работы; рельсовый путь; безбалластное верхнее строение пути; опоры контактной сети; заземлитель; система тягового электроснабжения; автотрансформаторы; ток; напряжение

Введение. Высокоскоростное железнодорожное сообщение является перспективным и быстро развивающимся видом транспортного движения. Это объясняется тремя основными характеристиками высокоскоростных магистралей (ВСМ): безопасность, скорость, экологичность.

В последние годы активно укрепляется тенденция развития высокоскоростных пассажирских сообщений в разных странах мира. Некоторые из них придают увеличению протяженности сети высокоскоростных железных дорог более высокий приоритет, чем повышению скорости поездов [1].

В России развитие высокоскоростного сообщения связано с решением большого числа задач, в том числе инфраструктурных [2, 3], среди них — использование эффективных систем тягового электроснабжения. Одним из решений является использование искусственного заземлителя для заземления опор контактной сети рельсового пути в системе тягового

электроснабжения (СТЭ) 2×25 кВ [4]. Данный подход планируется осуществить на новой высокоскоростной магистрали Москва — Казань.

Отдельным вопросом является обеспечение электробезопасности при коротких замыканиях, оценка импульсных перенапряжений в напольных системах СЦБ, которые учитываются при проектировании. В качестве дополнительных мер используются ограждения линий ВСМ в местах скопления людей и по всей линии, а также видеонаблюдение с последующим информированием людей об опасности.

Оценивать опасность воздействия электрического тока на человека следует по ответным реакциям организма. С увеличением тока четко проявляются три качественно отличные ответные реакции: ощущение, судорожное сокращение мышц (неотпускание для переменного тока и болевой эффект для постоянного) и, наконец, фибрилляция сердца. Электрические токи, вызывающие соответствующую ответную реакцию, разделяют на ощутимые, неотпускающие и фибрилляционные [5, 6].

Допустимое напряжение прикосновения, т. е. допустимое напряжение, приложенное непосредственно к телу человека, является случайной величиной и определяется по формуле [5]

$$U_h = i_t Z_h, \quad (1)$$

где i_t — верхнее пороговое значение отпускающего или нефибрилляционного тока, зависящее от времени воздействия; Z_h — сопротивление тела человека.

Числовые характеристики законов распределения пороговых фибрилляционных токов приведены в [5, табл. 1.6].

Для любого времени t протекания тока можно принять гипотезу о логарифмически-нормальном распределении порогового нефибрилляционного напряжения прикосновения $U_{hф}$.

■ E-mail: barch.anna@vniizht.ru (А. В. Барч)

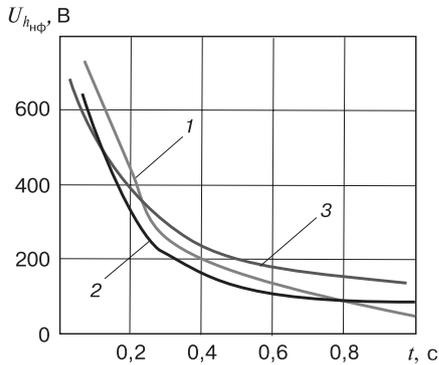


Рис. 1. Квантили пороговых напряжений прикосновения при вероятности фибрилляции $P = 0,0014$ [5]:
 1 – $Z_h = 1000$ Ом; 2 – $Z_h = M[Z_h(U_h)]$; 3 – $Z_h = Z_h(U_h; \xi)$
 Fig. 1. Quantiles of threshold voltages of touch when the probability of fibrillation $P = 0,0014$ [5]:
 1 – $Z_h = 1000$ Ohm; 2 – $Z_h = M[Z_h(U_h)]$; 3 – $Z_h = Z_h(U_h; \xi)$

Квантили полученных распределений $U_{hнф}$, соответствующие вероятности превышения порога фибрилляции $P = 0,0014$, представлены на рис. 1.

Из результатов вычислений [5] следует, что использование в качестве расчетного значения сопротивления тела человека 1000 Ом может приводить к погрешностям. В частности, при малых длительностях воздействия это допущение приводит к завышению порогового нефибрилляционного напряжения.

Нетрудно сделать вывод о нецелесообразности пренебрежения случайным характером сопротивления тела человека, так как это приводит к занижению вероятности поражения при небольших (менее 30 В) значениях приложенного напряжения, что крайне нежелательно, поскольку именно среди этих напряжений находится нормируемое допустимое напряжение прикосновения [5, 6].

Для объективного анализа условий электробезопасности при возникновении аварийных режимов в системе электроснабжения электрифицированных железных дорог большое значение имеет правильное определение не только допустимых, но и воздействующих на человека напряжений.

Напряжение на теле человека, касающегося заземленных на рельсовый путь конструкций при появлении на них напряжений, вызванных стеканием с заземлителя токов, равно [7, 8, 9]

$$U_{hв} = U_{в} = U_{зв} \alpha_{пр} Z_h / (Z_h + Z_d) \quad (2)$$

где $U_{в}$ — воздействующее напряжение на устройствах электроснабжения; $U_{зв}$ — напряжение на заземляющем устройстве (ЗУ) относительно зоны нулевого потенциала; $\alpha_{пр}$ — коэффициент прикосновения; Z_d — дополнительное сопротивление в цепи протекания тока, включенное последовательно с

сопротивлением тела человека, состоящее из сопротивления обуви, сопротивления растеканию с ног и входного сопротивления системы электроснабжения.

Для определения напряжений на теле человека, касающегося заземленных конструкций, необходимо располагать данными о коэффициентах прикосновения $\alpha_{пр}$ к заземленным электроустановкам электрифицированных железных дорог.

Значения коэффициентов напряжения прикосновения к рельсовому пути приведены в [5, 8, 9]. Для рельсового пути с безбалластным верхним строением пути значения этого коэффициента не превышают 0,65. Это объясняется тем, что в отличие от традиционного верхнего строения пути при прикосновении человека к рельсовому пути с безбалластным строением ноги человека располагаются не на земле, а на бетонном основании, имеющем значительное удельное электрическое сопротивление. Применительно к опорам контактной сети возможны ситуации при прикосновении к телу опоры, когда человек располагается непосредственно на земле с незначительным удельным электрическим сопротивлением.

Произведение $U_{зв} \alpha_{пр}$, входящее в выражение (2), называют ожидаемым напряжением до прикосновения $U_{до пр}$ и определяют как напряжение, приложенное между двумя точками цепи тока замыкания на землю, которых одновременно может коснуться человек рукой и ногами. Ожидаемое напряжение до прикосновения превышает напряжение прикосновения на величину падения напряжения в дополнительном сопротивлении Z_d .

Определение характеристик допустимых напряжений для рельсового пути и опор контактной сети. Основной задачей нормирования критериев электробезопасности является с большой степенью вероятности предотвращение нежелательных последствий воздействия опасных производственных факторов при обязательном выполнении работающими требований безопасности.

При расчете параметров средств защиты от электропоражения, оценке условий электробезопасности применяют допустимые токи i и напряжения прикосновения U .

Недостатки принятого способа нормирования критериев электробезопасности особенно ярко видны на примере существующей практики расчета заземлителей наиболее массовых электроустановок — комплектных трансформаторных подстанций (КТП), использующих в качестве естественного заземлителя рельсовые пути. Входное сопротивление рельсового пути не превышает нормируемых значений сопротивлений заземлителей КТП, что позволяет выбирать конструкцию ЗУ по допустимому напряжению прикосновения.

При обосновании допустимых напряжений и исследовании условий электробезопасности необходи-

мо учитывать, что значения как допустимых, так и воздействующих напряжений являются функциями ряда случайных аргументов, распределения которых могут быть найдены методами статистического моделирования при расчете соответствующих схем замещения устройств электроснабжения и схем замещения ветви, имитирующих протекание тока через тело человека. В этом случае сравнение воздействующих U_v и допустимых U_d напряжений осуществляют как композицию распределений непрерывных случайных величин, а нормирование U_d — вычислением квантилей соответствующих распределений допустимого напряжения [5, 6].

Статистическая оценка условий и нормирование критериев электробезопасности основываются на прогнозе среднего числа опасных ситуаций $M(\Pi)$. Число опасных ситуаций пропорционально вероятности поражения одного человека $P(\Pi)$ и числу людей N , находящихся в опасной зоне, т. е. $M(\Pi) = NP(\Pi)$.

Расчет параметров средств объективной защиты и нормирование критериев электробезопасности базируются на вычислении предельной вероятности превышения воздействующими напряжениями допустимого уровня P_{uj} . Вероятность находят по соотношению для расчета среднего числа опасных режимов в год при допустимом числе опасных ситуаций $M(\Pi) = 0,04$ и обслуживании трех групп элементов цепи обратного тока (рельсового пути, напольных устройств автоблокировки и связи и КТП). Как показали исследования, расчеты P_{uj} в нашем случае могут выполняться при равенстве весовых коэффициентов α_{ij} , т. е. $P_{uj} = 0,013/m_j$. Ранее отмечалось, что для устройства железнодорожного электроснабжения целесообразно проводить нормирование допустимого напряжения на ЗУ относительно земли [5, 6].

Далее при расчетах допустимых напряжений рельсы — земля и опор контактной сети участков с безбалластным верхним строением пути приняты следующие допущения:

1. Коэффициент прикосновения к рельсовому пути распределен по нормальному закону с математическим ожиданием и средним квадратичным отклонением, равными 0,55 и 0,05 соответственно.

2. Сопротивление растеканию с ног человека из-за отсутствия статистических данных, в том числе после дождя и в случае загрязнения бетонного основания верхнего строения пути, распределено по равномерному закону в интервале 25–30 кОм со средним значением, равным 27,5 кОм.

Расчеты, выполненные на ЭВМ, позволили сделать вывод о логарифмически-нормальном распределении напряжений на ЗУ (рельсовом пути и опорах контактной сети). Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Методика оценки условий электробезопасности. Рассмотрим основные аспекты использования вероятностно-статистических методов для анализа условий электробезопасности в системе электроснабжения электрифицированных железных дорог.

При анализе условий электробезопасности в качестве количественной меры безопасности труда принимают вероятность поражения человека $P(\Pi)$ или вероятность непоражения $P(B)$. Случаи поражения и непоражения образуют полную группу несовместных событий, для которых справедливо соотношение $P(\Pi) + P(B) = 1$ [10]. Электротравмирования являются редкими событиями, чему соответствуют малые значения вероятностей $P(\Pi)$. Поэтому во избежание значительных ошибок в определении $P(\Pi)$ через значения $P(B)$ анализ электробезопасности проводят, основываясь на непосредственном вычислении вероятности поражения.

Вероятность поражения человека в результате воздействия на него электрического тока при обслуживании, например, проводников обратного тока есть ряд независимых событий, которые определяются вероятностями возникновения режима короткого замыкания (КЗ) в тяговой сети $P_{кз}$, прикосновения человека к рельсовому пути и соединенным с ним устройствам P_k , превышения допустимого по условиям обеспечения электробезопасности напряжения реальными значениями на устройствах электроснабжения $P\{U_h > [U]\}$, совпадения моментов воздействия импульса электрического тока и наиболее уязвимой фазы кардиоцикла $P_\phi(t_k \subset \tau)$ [5, 10, 11]

$$P(\Pi) = P_{кз} P_k P\{U_h > [U]\} P_\phi(t_k \subset \tau). \quad (3)$$

В выражении (3)

$$P_\phi(t_k \subset \tau) = \min\left\{\frac{2t_k + \tau}{t_c}; 1\right\},$$

где t_k — время срабатывания токовой защиты; τ — продолжительность фазы T кардиоцикла; t_c — период кардиоцикла.

Структура сомножителей формулы (3) позволяет сделать вывод о важном методологическом значении этого выражения при исследовании эффективности организационно-технических мероприятий, направленных на повышение безопасности труда. Количественное выражение составляющих безопасности дает возможность сравнивать различные варианты защитных устройств и мероприятий, выявлять опасные фазы технологического процесса и находить наиболее экономичные пути снижения травматизма.

Применительно к электрифицированным железным дорогам электротяговую сеть, а также схему за-

Таблица 1

Параметры логарифмически-нормальных законов распределения допустимого напряжения на опорах контактной сети и рельсовом пути

Table 1

Parameters of log-normal laws of the distribution of allowable voltage on the supports of catenary and the track

Вид заземляющего устройства	Характеристика распределения	Время воздействия, с					
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1,0
Опоры контактной сети	$\frac{m_{lgU_{3y}}}{\sigma_{lgU_{3y}}}$	$\frac{0,787}{0,208}$	$\frac{0,348}{0,131}$	$\frac{0,139}{0,134}$	$\frac{0,043}{0,131}$	$\frac{-0,01}{0,126}$	$\frac{-0,26}{0,145}$
	$\frac{M(U_{3y})}{\sigma(U_{3y})}$, кВ	$\frac{6,87}{3,5}$	$\frac{2,33}{0,723}$	$\frac{1,445}{0,457}$	$\frac{1,154}{0,356}$	$\frac{1,019}{0,302}$	$\frac{0,581}{0,200}$
Рельсовый путь	$\frac{m_{lgU_{3y}}}{\sigma_{lgU_{3y}}}$	$\frac{1,57}{0,225}$	$\frac{1,11}{0,167}$	$\frac{0,887}{0,166}$	$\frac{0,786}{0,163}$	$\frac{0,730}{0,159}$	$\frac{0,472}{0,170}$
	$\frac{M(U_{3y})}{\sigma(U_{3y})}$, кВ	$\frac{42,2}{23,4}$	$\frac{13,7}{5,45}$	$\frac{8,30}{3,30}$	$\frac{6,56}{2,55}$	$\frac{5,75}{2,18}$	$\frac{3,20}{1,30}$

мещения, имитирующую протекание тока через тело человека, можно рассматривать как сложные системы, изменение характеристик компонентов которых обуславливает вариацию воздействующих и допустимых напряжений. Исследование условий электробезопасности, обоснование и выбор средств защиты от электропоражения основываются на сведениях о значении вероятности $P\{U_B > U_{3y}\}$, именуемой в дальнейшем вероятностью безопасной работы.

Известно, что условия электробезопасности обслуживания устройств электроснабжения обеспечиваются, если соблюдается неравенство $U_B > U_{3y}$.

Как было указано выше, для количественной оценки электробезопасности необходимо знать распределение случайной величины $U = U_B - U_{3y}$, определяемой в дальнейшем из композиции двух случайных величин U_B и U_{3y} .

В табл. 2 приведены значения допустимых напряжений при условии практически отсутствия возникновения опасных ситуаций для человека, касающегося

Таблица 2

Значения допустимых напряжений (В) относительно земли для пути протекания тока «рука — ноги» на участках с безбалластным верхним строением пути

Table 2

Values of permissible voltages (V) relative to the earth for the track of current flows through “hand—foot” scheme in the sections with ballastless track superstructure

Объект прикосновения	Время отключения опасного режима, с				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Рельсовый путь, напольные устройства СЦБ	4300	3000	2800	2300	1200
Опоры контактной сети	2900	1350	850	450	400

рельсового пути и опор контактной сети с безбалластным строением пути.

Выбор конструктивных параметров заземлителей электроустановок, а также оценка технических решений по выполнению условий электробезопасности проводятся по результатам сравнения напряжений на электроустановках электрифицированных железных дорог, носящих случайный характер, с соответствующими нормативными значениями.

Моделирование напряжений рельсы — земля на участках с безбалластным верхним строением пути и заземлением опор, объединенных тросом группового заземления, на рельсовый путь. Напряжение рельсы — земля в СТЭ 2×25 кВ [12] на участках с безбалластным верхним строением пути и заземлением опор, объединенных тросом группового заземления, рассчитывается по формуле [13]

$$\dot{U}_3 = \left(1 - \frac{z_{к.р}}{z_p}\right) \left[z_{вр} \left(2\dot{I}_{ATi} \left(e^{-\gamma|e_{ATi}-x|} - e^{-\gamma x} \right) \right) + z_{вх.р} \dot{I}_{КЗ} \left(e^{-\gamma|e_{ATi}-x|} - e^{-\lambda x} \right) \right], \quad (4)$$

где x — текущая координата (отсчет ведется от места подключения искусственного заземлителя к рельсовому пути), км. Входящие в выражение (4) параметры определены в [13, с. 62].

Результаты расчетов напряжений рельсы — земля в точке КЗ для участка с пятью автотрансформаторами при двустороннем питании от двух однофазных трансформаторов на каждой подстанции приведены на рис. 4 [13]. Расчеты выполнены для тяговой сети типа ПБСМ1-70 + МФ-100 + А-185 с рельсами Р65 на железобетонных шпалах и при подключении к рель-

сам искусственного заземлителя. На рис. 2 приведены результаты расчетов напряжений рельсы — земля в точке КЗ электротяговых сетей 2×25 кВ в зависимости от сопротивления автотрансформатора и вычисленные с учетом сопротивления фундаментов опор и переходного сопротивления рельсы — земля (r_n).

На напряжения рельсы — земля влияют случайные факторы: места КЗ, r_n , мощность питающей системы. При расчетах координата точки КЗ принималась равномерно распределенной в интервале 0–20 км [5, 13].

Кривые изменения напряжений рельсы — земля позволяют отметить следующие особенности распределения потенциалов в СТЭ 2×25 кВ. Так, эти напряжения в месте КЗ имеют точку максимума $U_{p\max}$ на каждом автотрансформаторном участке. Уменьшение коэффициентов трансформации автотрансформаторов приводит к заметному возрастанию максимальных значений напряжения рельсы — земля. По мере удаления i -го участка от подстанции величина $U_{p\max}$ снижается незначительно и для соседних участков отличается на 15–20%. В то же время характер изменения напряжений рельсы — земля в месте подключения обмотки автотрансформаторов к рельсовому пути существенно зависит от номера АТ и удаленности его от тяговой подстанции. Максимальные значения напряжений рельсы — земля для АТ1, как показывают расчеты, в 1,5–1,8 раза больше, чем для ближайшего к нему АТ2. При изменении схемы питания тяговой сети, например в случае отключения АТ1, максимальные значения напряжений рельсы — земля у АТ2 возрастают незначительно [5].

Полученные значения напряжений на устройствах электроснабжения, гальванически связанных с рельсовым путем, позволяют оценить вероятностные характеристики этих напряжений. Переходные сопротивления рельсы — земля, сопротивления системы внешнего электроснабжения, удельного электрического сопротивления земли и т. д. с минимальными значениями подвержены рассеиванию даже в пределах одной фидерной зоны. Для последующего моделирования напряжений рельсы — земля учтем, что сопротивление внешнего электроснабжения носит случайный характер. Наибольшие значения токов КЗ, а также напряжений рельсы — земля при прочих равных условиях соответствуют максимальным мощностям S_{\max} систем первичного электроснабжения. Распределение сопротивления Z_c было определено в результате обработки значений S_{\max} для тяговых подстанций Восточно-Сибирской железной дороги [14]. При этом, учитывая относительно небольшой объем выборки ($n = 86$), проверка возможности сглаживания статистического распределения логарифмически-нормальным законом была выполнена по критерию мощности nw^2 . Значение параметра $nw^2 = 0,059$ ока-

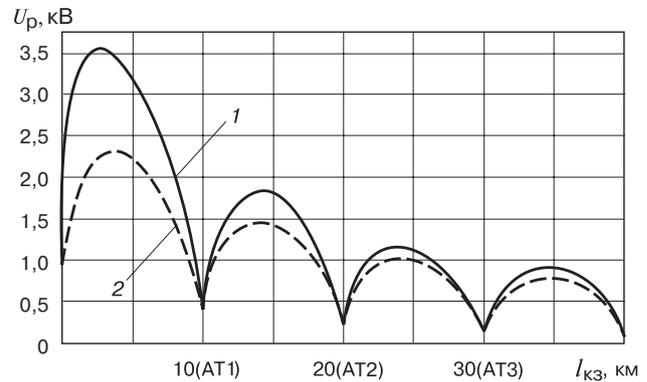


Рис. 2. Результаты расчетов напряжений рельсы — земля в точке КЗ электротяговых сетей 2×25 кВ при $r_n = 4$ Ом·км: 1 — $Z_{АТ} = 4,0$ Ом; 2 — $Z_{АТ} = 4,5$ Ом

Fig. 2. Results of voltage calculations for rail — earth section in the earthed point of electric traction networks 2×25 kV at $r_n = 4$ Ohm·km: 1 — $Z_{АТ} = 4,0$ Ohm; 2 — $Z_{АТ} = 4,5$ Ohm

залось значительно меньше критического, что позволило принять логарифмически-нормальный закон в качестве аппроксимирующего распределения с параметрами: математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение логарифма сопротивления первичной системы электроснабжения $m_{lgZ_c} = -0,09995$ и $\sigma_{lgZ_c} = 0,23633$ соответственно. Данному распределению Z_c соответствуют математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение сопротивления $m_{Z_c} = 0,92$ и $\sigma_{Z_c} = 0,54$ Ом. Доверительный интервал изменения Z_c , соответствующий доверительной вероятности $\beta = 0,95$, равен $I_{\beta=0,95} = [0,374 - 1,69]$ Ом.

Проведено статистическое моделирование значений напряжений рельсы — земля в СТЭ 2×25 кВ на участке пути со следующими характеристиками: длина межподстанционной зоны 60 км, электротяговая сеть типа МФ-100 + ПБСМ1-70 + А-185, рельсы типа Р65, автотрансформаторы установлены через 10 км, питание участка двустороннее от двух однофазных трансформаторов мощностью по 16 МВ·А на каждой подстанции [5]. Результаты моделирования приведены на рис. 3. Там же для сравнения уровней напряжений рельсы — земля приведены данные моделирования для традиционной системы 25 кВ.

Соответствие статистических распределений теоретическим определялось по критериям Пирсона и Романовского. Оказалось, что в различных точках рельсового пути распределения напряжений рельсы — земля при КЗ в СТЭ 2×25 кВ могут быть сглажены четырехмоментным распределителем Пирсона 1-го типа с плотностью вероятности

$$f(U_p) = f_0 (U_p + U_{p1})^{q1} (U_{p2} - U_p)^{q2},$$

при $f_0 = 0,2958$; $U_{p1} = -0,0662$; $U_{p2} = 2,537$; $q_1 = 2,8163$; $q_2 = 1,162$ [5].

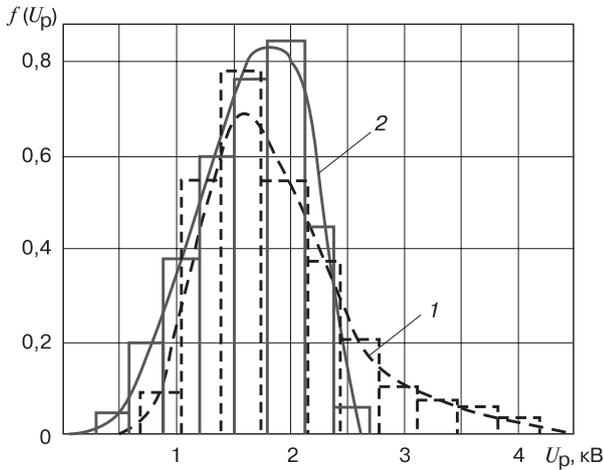


Рис. 3. Гистограммы плотности распределения напряжений рельсы — земля в месте КЗ в системе 25 кВ (1) и 2×25 кВ (2)

Fig. 3. Histograms of stress distribution density of rail — earth section at short circuit in 25 kV (1) and 2×25 kV (2) systems

Для традиционной системы закон распределения напряжений рельсы — земля логарифмически-нормальный [5].

Анализ напряжений рельсы — земля при коротких замыканиях в тяговой сети 2×25 кВ с искусственным заземлителем. Результаты расчетов напряжений искусственный заземлитель — земля в точке КЗ для участка с пятью автотрансформаторами при двустороннем питании от двух однофазных трансформаторов на каждой подстанции приведены на рис. 4. Расчеты сделаны для тяговой сети типа ПБСМ1-70 + МФ-100 + А-185 с рельсами Р65 на железобетонных шпалах и при подключении к рельсам искусственного заземлителя.

Кривые изменения напряжений искусственный заземлитель — земля позволяют отметить следующие особенности распределения потенциалов в СТЭ 2×25 кВ и заземленными на искусственный заземлитель (см. ниже раздел «Рекомендации по заземлению опор контактной сети СТЭ 2×25 кВ на участках с безбалластным верхним строением пути») опорами контактной сети. В месте КЗ напряжение искусственный заземлитель — земля имеет точку максимума $U_{з\max}$ на каждом автотрансформаторном участке [13].

По мере удаления 1-го участка от подстанции величина $U_{з\max}$ снижается незначительно и для соседних участков отличается на 10–15%. В месте подключения искусственного заземлителя к рельсовому пути эти напряжения уменьшаются примерно на 30–40%. Тем самым установлена эффективность использования предлагаемой системы заземления для уменьшения напряжений искусственный заземлитель — земля, рельсы — земля для СТЭ 2×25 кВ с отсоединенными от рельсов опорами [13].

Расчет вероятности превышения реально действующими напряжениями допустимых значений. В общем виде плотность распределения интересующей нас случайной величины $U = U_b - U_d$ запишется

$$f(U_b - U_d) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(U_b) f(U_b - U_d) dU_b. \quad (5)$$

В формуле (5) действующее напряжение входит под знаком логарифма, поэтому в расчетах должно соблюдаться условие $U_b \geq 0$. Как показали проведенные исследования [5, 7, 8], значения действующих напряжений (их максимальные значения) при КЗ не превышают 5 кВ, поэтому пределы интегрирования $\pm\infty$ следует изменить от нуля до 5 кВ. С учетом этого, подставляя в формулу (5) выражения плотностей распределений, получим

$$f(U_b - U_d) = \frac{(\lg e)^2}{2\pi\sigma_{\lg U_b} - \sigma_{\lg U_b}} \int_0^{5000} \frac{1}{U_b^2 - U_b U} \times \exp\left[-\frac{(\lg U_b - M_{\lg U_b})^2}{2\sigma_{\lg U_b}^2} - \frac{(\lg(U_b - U) - M_{\lg U_b})^2}{2\sigma_{\lg U_b}^2}\right] dU_b.$$

По изложенной методике [7] рассчитана плотность распределения вероятности превышения действующими напряжениями допустимых значений. Результаты расчетов по данному выражению приведены на рис. 5. Вычисление интегралов производилось численным методом. Кривые плотности $f((U_b - U_d) = U)$ получены в области отрицательных значений, где соблюдаются условия электробезопасности.

Из представленных на рис. 5 результатов можно сделать вывод о том, что вероятность превышения действующими напряжениями допустимых значений в СТЭ 2×25 кВ с экранирующим проводом выше аналогичной вероятности превышения в системе с искусственным заземлителем.

Следует отметить, что анализ условий электробезопасности выполнен для случая прикосновения обслуживающего персонала к рельсовому пути. При прикосновении к опорам контактной сети СТЭ с экранирующим проводом является наиболее опасной по сравнению с известными системами переменного тока, и в большей степени это относится к системе, где для заземления опор используется искусственный заземлитель.

Рекомендации по заземлению опор контактной сети СТЭ 2×25 кВ на участках с безбалластным верхним строением пути

Общие сведения. 1. Сопротивление растекания фундаментов опор контактной сети на электрифицированном участке с безбалластным верхним строением пути (например, участок Москва — Казань) не превышает 30 Ом, поскольку эквивалентное удельное

электрическое сопротивление земли в районах средней полосы России колеблется в узких пределах и равно 150–200 Ом·м [6].

Расчет сопротивления растекания фундаментов опор приведен в [7]. Получено, что для двухслойной модели земли сопротивление фундамента опоры составляет 26,4 Ом.

2. Установлено, что сопротивление дополнительного заземлителя (металлическая арматура диаметром 15–20 мм, погруженная на глубину 1–1,25 м ниже основания фундамента опоры) не превышает величину, равную 50 Ом.

3. Необходимо дополнительный заземлитель сваркой (обязательно) соединить с арматурой фундамента опоры. При таком соединении эквивалентное сопротивление системы фундамент опоры — дополнительный заземлитель не превышает 35 Ом даже при промерзании грунта на глубину 1 м.

4. При использовании для заземления опор искусственного заземлителя, расположенного в земле на глубине 0,5–0,7 м и состоящего из двух параллельно включенных металлических шин сечением каждой 4×50 мм, его переходное сопротивление относительно земли в зимнее время года не превышает 3 Ом·км [6].

Следовательно, при расчетах в случае металлического соединения арматуры фундамента с дополнительным проводом переходное сопротивление дополнительный провод — земля при числе опор, равном 16 на 1 км, не превышает 2 Ом·км.

В случае использования искусственного заземлителя при его соединении с металлической арматурой опоры эквивалентное сопротивление опоры — искусственный заземлитель — земля не превышает 1,2 Ом.

5. Коэффициент прикосновения к опоре составляет 0,45–0,5, к рельсовому пути с обычным строением балластной призмы он равен 0,9 [6].

Система заземления опор

А. Система заземления опор при использовании дополнительного провода. В том случае, если невозможно на реальном участке расположить искусственный заземлитель возможна следующая система заземления.

А.1. Арматура фундамента опоры сваркой посредством металлической шины объединяется в единую металлическую конструкцию. На высоте примерно 0,5 м от уровня земли делается вывод металлической шины на внешнюю поверхность опоры.

А.2. Дополнительный провод на одном изоляторе подвешивается на металлической консоли опоры, которая сваркой посредством заземляющего спуска соединяется непосредственно с металлической шиной, вывод которой расположен на поверхности опоры.

А.3. Все металлические конструкции опоры контактной сети соединяются с арматурой фундамента опоры посредством заземляющего спуска.

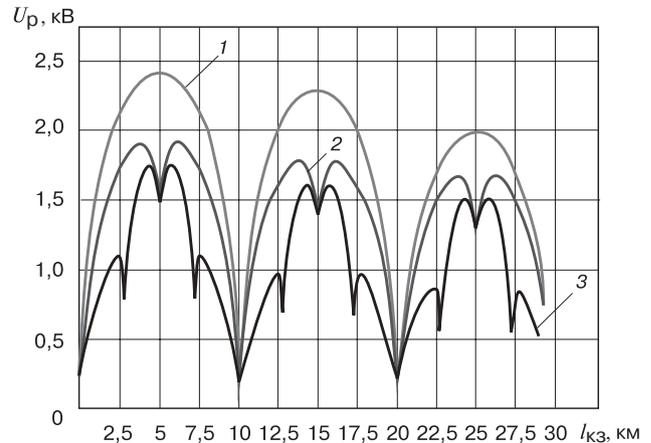


Рис. 4. Результаты расчетов напряжений искусственный заземлитель — земля в точке КЗ [13]:
 1 — искусственный заземлитель подключен к рельсовому пути у автотрансформаторных пунктов; 2 — дополнительно к п. 1 искусственный заземлитель подключен в середине между автотрансформаторными пунктами; 3 — дополнительно к п. 1 искусственный заземлитель подключен в трех местах
 Fig. 4. Results of stress calculations artificial earthing switch — earth at the contact earth point [13]:
 1 — artificial earthing switch is connected to the track at the automatic transformer points; 2 — in addition to p.1 artificial earthing switch is connected in the middle between automatic transformer points; 3 — in addition to p.1 artificial earthing switch is connected in three places

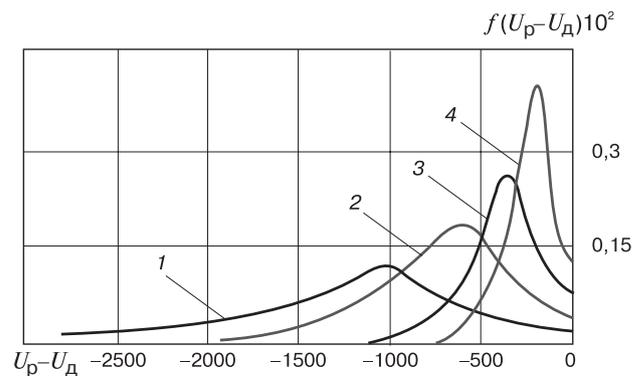


Рис. 5. Результаты расчета плотности распределения вероятности превышения воздействующими напряжениями допустимых значений:
 1 — система электроснабжения 2×25 кВ с искусственным заземлителем; 2 — система электроснабжения 25 кВ; 3 — система электроснабжения 2×25 кВ с экранирующим проводом; 4 — система электроснабжения 2×25 кВ
 Fig. 5. Results of calculation of probability distribution density of permissible values exceedance by acting voltages:
 1 — 2×25 kV power supply system with an artificial earthing switch; 2 — 25 kV power supply system; 3 — 2×25 kV power supply system with screening wire; 4 — 2×25 kV power supply system

А.4. Дополнительной провод по всей длине электрифицированного участка подключается на тяговой подстанции к фазе С силового тягового трансформатора и к нулевой точке автотрансформатора на автотрансформаторных пунктах питания.

Дополнительный провод между автотрансформаторными пунктами в двух местах соединяется со средними точками путевых дроссель-трансформаторов, устанавливаемых для выравнивания токораспределения по рельсовым нитям.

Путевые дроссель-трансформаторы располагаются на расстоянии, примерно соответствующем $\frac{1}{3}$ расстояния между ближайшими автотрансформаторами.

Недостатки рассматриваемой системы заземления. 1. Электрический расчет по программе КОРТЭС СТЭ 2×25 кВ с дополнительным проводом, на который заземлены опоры контактной сети, показывает на незначительное (менее 0,5%) влияние обратного провода на уменьшение падения напряжения на токоприемнике ЭПС. То же самое касается и снижения потерь электроэнергии (менее 1,5%).

2. На участках между АТП при отсутствии ЭПС ток в обратном проводе не превышает 50 А. Это доказывает его неэффективность в части снижения электромагнитного влияния и уменьшения погонного сопротивления. При наличии большего количества АТП эффективность дополнительного провода снижается.

3. При нарушении изоляции контактной сети (питающего провода) в середине между точками соединения дополнительного провода с рельсовым путем напряжение арматуры опоры относительно земли достигает нескольких киловатт (примерно на 50% выше, чем напряжение рельс — земля).

Следовательно, напряжение прикосновения к опоре существенно превышает нормируемые значения.

Однако, учитывая незначительную вероятность совпадения независимых событий (КЗ на опоре, нахождение в опасной зоне монтеров пути и контактной сети, малую длительность КЗ, попадания в фазу T кардиоцикла человека и т. д.), математическое ожидание числа опасных ситуаций незначительно превышает аналогичную величину в случае прикосновения персонала к рельсовому пути [5].

4. Потенциал точки земли в месте возможного нахождения кабеля связи (на расстоянии 2,5 м и ближе к фундаменту опоры) может при нарушении изоляции контактной сети (питающего провода) достигать 2 кВ, что может привести к термическому поражению кабельных линий за счет протекания сопровождающего тока КЗ. Аналогичная ситуация возникает и при разряде токов молнии в контактную сеть и питающий провод [7].

5. Отсутствует защита, фиксирующая обрыв дополнительного провода. При высоких скоростях движения вероятность обрыва провода возрастает.

6. Нет технических решений по плавке гололеда в схеме, когда дополнительный провод соединен с арматурой опор.

Устранить отмеченные в п. 3, 4, 5 и 6 недостатки можно, если для заземления опор контактной сети использовать искусственный заземлитель.

Б. Система заземления опор с применением искусственного заземлителя на электрифицированных участках СТЭ 2×25 кВ. Считаем, что на реальном участке СТЭ 2×25 кВ возможно и целесообразно использовать искусственный заземлитель, предложенный учеными АО «ВНИИЖТ» и РУТ (МИИТ) для заземления опор контактной сети.

Б.1. Искусственный заземлитель располагается в земле на расстоянии не более 2 м от фундамента опор. Допускается его расположение непосредственно в створе расположения опор, где отсутствуют кабельные сети.

Б.2. Искусственный заземлитель располагается непосредственно в земле на глубине 0,5–0,7 м и состоит из двух параллельно включенных металлических полос сечением каждой 4×50 мм.

Допускается вместо металлических полос использовать два металлических прутка (арматура) диаметром более 18 мм.

Металлические полосы через каждые 20 м сваркой объединяются друг с другом.

Б.3. Арматура фундамента опоры сваркой посредством металлической шины объединяется в единую металлическую конструкцию. На высоте примерно 0,5 м от уровня земли делается вывод металлической шины на внешнюю поверхность опоры.

Б.4. Все металлические конструкции опоры контактной сети соединяются с арматурой фундамента опоры посредством заземляющего спуска, который подключается непосредственно к металлической шине, вывод которой расположен на поверхности опоры.

Допускается металлические конструкции опор заземлять на секционированный трос группового заземления, длина которого не превышает 400 м. Трос группового заземления соединяется в середине с искусственным заземлителем.

Б.5. Искусственный заземлитель у каждой опоры с помощью болтового соединения подключается к заземляющему спуску, который соединен с арматурой фундамента опоры.

Б.6. Искусственный заземлитель по всей длине электрифицированного участка подключается на тяговой подстанции к фазе C силового тягового трансформатора и к нулевой точке автотрансформатора на автотрансформаторных пунктах питания.

Искусственный заземлитель между автотрансформаторными пунктами в двух местах соединяется со средними точками путевых дроссель-трансформаторов, устанавливаемых для выравнивания токораспределения по рельсовым нитям.

Путевые дроссель-трансформаторы располагаются на расстоянии, примерно соответствующем $\frac{1}{3}$ расстояния между ближайшими автотрансформаторами.

Заземление металлических конструкций опор на искусственных сооружениях. На искусственных сооружениях, находящихся на электрифицированном участке, необходимо арматуру поддерживающих конструкций мостов (эстакад) и фундаментов свай для повышения надежности объединить в единую металлическую конструкцию двумя металлическими шинами 4×50 мм.

Металлические шины могут располагаться непосредственно под пешеходными площадками искусственных сооружений (мостов).

Металлические шины через каждые 10 м между собой соединяются посредством металлических полос. Металлические шины подключаются к искусственному заземлителю (дополнительному проводу) опор на перегоне.

При протяженности искусственных сооружений более 2,5 км металлические шины в середине подключаются к нулевой точке специально установленного путевого дроссель-трансформатора. Подключение в этом случае к рельсовому пути дополнительного провода, расположенного на опорах контактной сети вне искусственных сооружений, выполняется на расстоянии не более 2 км от места расположения путевого дроссель-трансформатора.

Входное сопротивление системы заземления металлических конструкций мостов (эстакад) не превышает аналогичной величины сопротивления рельсы — земля. Это позволяет считать, что существующие токовые (дистанционные) защиты с высокой надежностью отключат КЗ, возникающие при нарушении изоляции контактной сети.

Из-за соединения искусственного заземлителя (дополнительного провода) с рельсовым путем магнитная составляющая тока, стекающая с фундаментов опор, не превышает допустимых значений, отслоения бетона от арматуры, термического поражения фундаментов опор не наступает.

Заключение. 1. Обоснована методика расчета условий электробезопасности при обслуживании рельсового пути и заземленных на него посредством искусственного заземлителя опор контактной сети на электрифицированных по системе 2×25 кВ участков с безбалластным верхним строением пути.

Установлено, что допустимые по условиям обеспечения электробезопасности напряжения носят случайный характер и распределены по логарифмически-нормальному закону.

При расчетах допустимых напряжений рельсы — земля учтено, что как коэффициент прикосновения к рельсовому пути носит вероятностный характер (распределен по равномерному закону), так и сопротивления растеканию с ног человека имеют случайный характер.

2. Предложен проект допустимых значений напряжений рельсы — земля, опор контактной сети участков с безбалластным строением пути. В обосновании предлагаемых допустимых значений напряжений практически исключено возникновение опасных ситуаций для персонала, обслуживающего рельсовый путь на участках с безбалластным верхним строением пути.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мировой рейтинг высокоскоростных поездов: [по материалам портала Railway Performance Society (www.railperf.org.uk); Railway Gazette International, 2017, no. 7, pp. 28–31] // Железные дороги мира. 2017. № 10. С. 57–63.
2. Назаров О.Н., Косарев А.Б. Научная поддержка развития высокоскоростного движения // Железнодорожный транспорт. 2008. № 4. С. 23–26.
3. Лapidус Б.М. Железнодорожный бизнес. Как встать на главный путь. М.: Принт Маркет, 2011. 382 с.
4. Система тягового электроснабжения 2×25 кВ / Б.М. Бородулин [и др.]. М.: Транспорт, 1989. 247 с.
5. Косарев А.Б., Косарев Б.И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2008. 480 с.
6. Косарев Б.И. Электробезопасность в тяговых сетях переменного тока. М.: Транспорт, 1989. 227 с.
7. Косарев А.Б. Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока. М.: Интекст, 2004. 272 с.
8. Конча А.А., Косарев А.Б. Система тягового электроснабжения с экранирующим проводом и отсоединенными от рельсов опорами контактной сети // Электричество. 1997. № 2. С. 19–25.
9. Карякин Р.Н. Тяговые сети переменного тока. М.: Транспорт, 1987. 279 с.
10. Косарев А.Б., Косарев Б.И., Сербиненко Д.В. Электромагнитные процессы в системах энергоснабжения железных дорог переменного тока. М.: ВМГ-Принт, 2015. 348 с.
11. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. М.: Наука, 1964. 772 с.
12. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрических железных дорог. М.: Транспорт, 1965. 464 с.
13. Научное сопровождение развития высокоскоростных магистралей в России / под ред. А.Б. Косарева, О.Н. Назарова. М.: РАС, 2018. 119 с.
14. Дарчиев С.Х., Косарев Б.И., Мориц И.В. Устройства электроснабжения БАМа. М.: Транспорт, 1989. 218 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КОСАРЕВ Александр Борисович,
д-р техн. наук, профессор, первый заместитель
генерального директора АО «ВНИИЖТ»

БАРЧ Анна Владимировна,
директор центра «Охрана труда, экология и промышленная
безопасность», АО «ВНИИЖТ»

РОЗЕНБЕРГ Ефим Наумович,
д-р техн. наук, профессор, первый заместитель генерального
директора АО «НИИАС»

Статья поступила в редакцию 31.05.2018 г., актуализирована
02.10.2018 г., принята к публикации 15.10.2018 г.

Ensuring electrical safety of power supply systems of electrified AC railways for high-speed lines

A. B. KOSAREV¹, A. V. BARCH¹, E. N. ROZENBERG²

¹ Joint Stock Company “Railway Research Institute” (JSC “VNIIZhT”), Moscow, 129626, Russia

² Joint Stock Company “Design & Research Institute for Information Technology, Signaling and Telecommunication on Railway Transport” (JSC NIIAS), Moscow, 109029, Russia

Abstract. High-speed railways are fast-growing and promising type of traffic. In Russia development of high-speed railway service is associated with the solution of a number of problems, including infrastructure. Authors propose to use earth connection of the railway catenary with the help of an artificial earthing switch on currently designed high-speed line Moscow—Kazan for 2×25 kV power supply system.

Taking into account requirements for electrical safety conditions for maintenance of the track and earthed catenary supports, paper justifies method for calculating allowable voltages of rail—earth points and supports of catenary. Methods takes into account structural features of ballastless track superstructure used for high-speed lines. It is estimated that the voltages admissible under the electrical safety conditions are random in nature and distributed logarithmically normal. When calculating probability of safe operation, one should take into account random nature of both permissible stresses and those actually occurring on the track. It is estimated that the probability of safe operation in traction networks of sections with ballastless track superstructure does not exceed a similar value in electrified sections with the conventional structure of a ballast prism. Feasibility of using a 2×25 kV earth system using an artificial earth connection is confirmed, recommendations on its use are given. Authors substantiate allowable values of the rail—earth voltage and catenary supports, which practically exclude the occurrence of hazardous situations for personnel maintaining the track in sections with ballastless track superstructure.

Keywords: electrical safety; touch factor; probability of safe operation; railway track; ballastless track; catenary supports; earthing conductor; traction power supply system; automatic transformers; current; voltage

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-6-337-346>

REFERENCES

1. Mirovoy reyting vysokoskorostnykh poezdov: po materialam portala Railway Performance Society (www.railperf.org.uk); Railway Gazette International, 2017, no. 7, pp. 28–31 [World rating of high-speed trains: based on the Railway Performance Society portal (www.railperf.org.uk); Railway Gazette International]. Zheleznnye dorogi mira [Railways of the world], 2017, no. 10, pp. 57–63.
2. Nazarov O. N., Kosarev A. B. Nauchnaya podderzhka razvitiya vysokoskorostnogo dvizheniya [Scientific support for the development of high-speed traffic]. Zheleznodorozhnyy transport, 2008, no. 4, pp. 23–26.
3. Lapidus B. M. Zheleznodorozhnyy biznes. Kak vstat' na glavnyy put' [Railway business. How to get on the main track]. Moscow, Print Market Publ., 2011, 382 p.
4. Borodulin B. M., Veksler M. I., Marskiy V. E., Pavlov I. V. Sistema tyagovogo elektrosnabzheniya 2×25 kV [2×25 kV traction power system]. Moscow, Transport Publ., 1989, 247 p.

5. Kosarev A. B., Kosarev B. I. Osnovy elektromagnitnoy bezopasnosti sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta [Basics of electromagnetic safety of railway power supply systems]. Moscow, Intext Publ., 2008, 480 p.

6. Kosarev B. I. Elektrobezopasnost' v tyagovykh setyakh peremennogo toka [Electrical safety in AC traction networks]. Moscow, Transport Publ., 1989, 227 p.

7. Kosarev A. B. Osnovy teorii elektromagnitnoy sovmestimosti sistem tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka [Fundamentals of electromagnetic compatibility theory of alternating current traction power systems]. Moscow, Intext Publ., 2004, 272 p.

8. Koncha A. A., Kosarev A. B. Sistema tyagovogo elektrosnabzheniya s ekraniruyushchim provodom i otsoedinennymi ot rel'sov oporami kontaktnoy seti [Traction power supply system with screening wire and catenary supports disconnected from the rails]. Elektrichestvo [Electricity], 1997, no. 2, pp. 19–25.

9. Karyakin R. N. Tyagovye seti peremennogo toka [Traction AC networks]. Moscow, Transport Publ., 1987, 279 p.

10. Kosarev A. B., Kosarev B. I., Serbinenko D. V. Elektromagnitnye protsessy v sistemakh energosnabzheniya zheleznikh dorog peremennogo toka [Electromagnetic processes in the systems of power supply of AC railways]. Moscow, VMG-Print Publ., 2015, 348 p.

11. Ango A. Matematika dlya elektro- i radioinzhenerov [Mathematics for electrical and radio engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1964, 772 p.

12. Markvardt K. G. Elektrosnabzhenie elektricheskikh zheleznikh dorog [Power supply of electric railways]. Moscow, Transport Publ., 1965, 464 p.

13. Kosarev A. B., Nazarov O. N. Nauchnoe soprovozhdenie razvitiya vysokoskorostnykh magistralей v Rossii [Scientific support of the development of high-speed highways in Russia]. Moscow, RAS Publ., 2018, 119 p.

14. Darchiev S. Kh., Kosarev B. I., Morits I. V. Ustroystva elektrosnabzheniya BAMa [BAM power supply devices]. Moscow, Transport Publ., 1989, 218 p.

ABOUT THE AUTHORS

Alexander B. KOSAREV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, First Deputy General Director of the JSC “VNIIZhT”

Anna V. BARCH,

Director of the Center “Labor protection, ecology and industrial safety”, JSC “VNIIZhT”

Efim N. ROZENBERG,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, First Deputy General Director of the JSC NIIAS

Received 31.05.2018

Revised 02.10.2018

Accepted 15.10.2018

■ E-mail: barch.anna@vniizht.ru (A. V. Barch)