

Эффективность противогололедных мероприятий на устройствах электроснабжения железных дорог

П.А. Бодров, Н.А. Попова

Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону

Аннотация: Основная часть электрифицированных железных дорог, а также трасс прохождения воздушных линий внешнего электроснабжения, линий автоблокировки и линий продольного электроснабжения расположена на местности с резко континентальным климатом, где климатические условия способствуют возможности гололедообразования. В статье рассмотрена эффективность применения противогололедных мероприятий на устройствах электроснабжения электрифицированных железных дорог.

Ключевые слова: тяговая сеть переменного тока, борьба с гололедом, плавка гололеда, профилактический подогрев, схема замещения, выбор параметров.

Введение. Исследование загруженности железных дорог страны на ближайший период показывает, что ряд направлений будет иметь рост скоростей движения поездов, повышение тяжеловесного и длинно составного движения грузовых поездов, развитие сортировочных [1-2]. Наибольшее увеличение объемов перевозок грузов прогнозируется на железнодорожных направлениях центр – периферия, обеспечивающие доставку грузов, в морские порты страны, а также в регионы, характеризующихся концентрацией "точек роста" грузовой базы.

Однако, для увеличения объёмов перевозок и повышения скорости движения поездов требуется значительное усовершенствование системы электроснабжения. Особенностью контактной сети, основного компонента системы железнодорожного электроснабжения является отсутствие резерва. Она работает в сложных условиях взаимодействия с токоприемниками локомотивов и подвержена сильным воздействиям атмосферных влияний. Один из самых тяжелых режимов работы контактной подвески является период гололёдообразования.

На данный момент существуют разные методы борьбы с гололёдными отложениями: электрические – плавка и профилактический подогрев проводов, механические удаление с отложениями на контактной поверхности, борьба при помощи химических средств [3].

Несмотря на многочисленные исследования применения электрических способов ликвидации гололеда, требуется разработка метеорологических карт и их уточнения с учётом ряда влияющих факторов для каждого участка железной дороги. Указанное мероприятие повысит эффективность реализации противогололёдных мероприятий [4-5].

Противогололедные мероприятия для участка контактной сети. На проводах и поддерживающих устройствах контактной сети гололёдно-изморозевые образования обычно возникают при неустойчивой погоде, в тот момент, когда происходит смена погода (похолодание резко сменяется оттепелью и наоборот), а также в туманную погоду или при ледяном дожде [1].

Отложения гололёда, изморози и мокрого снега на проводах опасно и может привести к нарушению нормальной эксплуатации контактной сети и аварийным ситуациям вследствие [6-7]:

- разрегулировки проводов, особенно на воздушных стрелках, и их сближения между собой;
- автоколебания проводов подвески, в результате которой возникают короткие замыкания между проводами, отжиги проводов, повреждения линейной аппаратуры и креплений;
- обрыва проводов и их механической перегрузки, особенно при наличии пережогов электрической дугой;
- перегрузки и поломки траверс, кронштейнов;
- перегрузка жестких (ригелей) и гибких поперечин;

- разрушения опор при обрывах проводов, а также при сочетании гололёдных отложений с сильным ветром.

К электрическим способам борьбы с гололедом относят: профилактический подогрев проводов контактной сети и плавку гололеда методом короткого замыкания.

Профилактический подогрев является упреждающей мерой борьбы с гололедом. Эффективность профилактического подогрева во многом зависит от своевременности его применения. Подогрев следует начинать до образования гололеда, для этого необходимо грамотно оценивать климатическую обстановку. Суть профилактического подогрева заключается в термическом действии уравнительного тока, который нагревает контактный провод. Если толщина стенки гололеда превышает 3 – 5 мм, то следует начинать процесс плавки. Плавка гололеда осуществляется по петлевой схеме, суть которой заключается в создании искусственного короткого замыкания между фазами смежных подстанций. При схеме плавки гололеда по схеме «петля до смежной подстанции», где межподстанционная зона питается от одной подстанции, на обходной шине смежной подстанции организовано искусственное короткое замыкание. Ток короткого замыкания, оказывая термическое действие на контактный провод, будет плавить гололед. Однако, ток плавки гололеда не должен превышать длительно допустимых значений токов для проводов и тросов контактной сети, а компенсирующие устройства не должны опускаться ниже установленного уровня.

Плавка гололёда на контактной сети должна быть предусмотрена для всех районов, где возможно образование гололедных отложений на контактных проводах. При применении данного метода необходимо заранее выбрать соответствующие схемы и определить наибольшие значения токов. Результаты не должны превышать длительно допустимого значения для

проводов и тросов контактной сети при тех климатических условиях, при которых осуществляются электрические методы борьбы с гололедом. Для каждой линии должны быть составлены таблицы или монограммы времени плавки в зависимости от погодных условий и толщины гололедных отложений.

Для анализа влияния метеорологических условий на успешность противогололедных мероприятий на участке необходимо выполнить:

- рассчитать сопротивления тяговых подстанций;
- определить максимально допустимые токи для контактной подвески участка в режимах профилактического подогрева и плавки;
- рассчитать уравнительные токи на участке при схеме профилактического подогрева и установить их соответствие с минимальными токами профилактического подогрева при различных метеорологических условиях;
- рассчитать величины токов, действующих при схеме плавки на участке и определить время, которое потребуется для плавки гололеда этими токами, определить граничные метеорологические условия и установить возможность применения режима плавки.

Сопротивление тяговой подстанции определяется по формуле [1]:

$$Z_{\text{ТП}} = 2 \cdot 10^{-6} \cdot U_{\text{Т.НОМ}}^2 \cdot \left(\frac{1}{S_{\text{КЗ}}} + \frac{0,01 \cdot u_{\text{к}}}{n_{\text{Т}} \cdot S_{\text{Т.НОМ}}} \right), \quad (1)$$

где $U_{\text{Т.НОМ}}$ – номинальное напряжение трансформатора на стороне шин контактной сети, В;

$S_{\text{КЗ}}$ – мощность трехфазного короткого замыкания на вводе подстанции, МВ·А;

$u_{\text{к}}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

n_t – число трансформаторов, включенных в данную схему;

$S_{т.ном}$ – номинальная мощность трансформатора, МВ·А.

При плавке гололеда и профилактическом подогреве осуществляется нагрев проводов контактной сети током короткого замыкания и уравнительным током соответственно. Однако, провода и тросы не следует нагревать до температуры, при которой произойдет утрата их механических свойств (отжиг), недопустимое удлинение и возможный разрыв.

Чтобы не допустить избыточного нагрева необходимо определить наибольшее допустимое значение тока контактной сети участка на основе уравнения теплового баланса, которое учитывает, что в установившемся режиме теплоотдача с поверхности провода контактной сети в окружающую среду определяется мощностью потерь в этом проводе [5].

Все расчеты будут вестись для контактного провода марки МФ-100 и несущего троса марки М-120, которые смонтированы и эксплуатируются на исследуемом участке между тяговыми подстанциями

Анализируя значения, рассчитанные выше, можно сделать вывод:

- лимитирующим проводом при профилактическом подогреве является контактный провод МФ-100;
- лимитирующим проводом при плавке является также контактный провод.

Анализ влияния метеорологических условий на успешность применения профилактического подогрева для исследуемого участка.

Профилактический подогрев на исследуемом участке. Подогрев необходимо начинать до образования гололедного слоя на устройствах контактной сети при климатических условиях, в которых возможно его появление. В статье рассматривается схема профилактического подогрева, которая не требует остановки движения поездов на участке. Суть выбранной схемы профилактического подогрева заключается в термическом действии

уравнительного тока, который нагревает контактный провод. Уравнительный ток возникает в тяговой сети из-за разности напряжений на шинах смежных подстанций, которая достигается изменением уровня напряжения силовых трансформаторов с помощью устройств регулировки под нагрузкой [8].

Упрощенная схема замещения тяговой сети при организации профилактического подогрева участка показана на рис. 1.

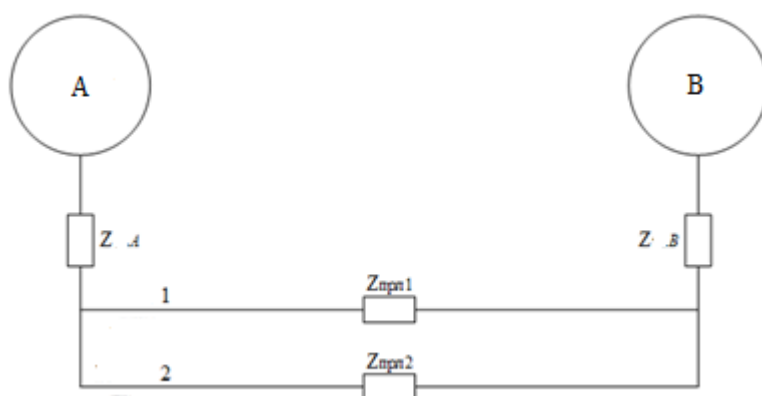


Рис. 1 – Упрощенная схема замещения участка

Уравнительный ток определяется по формуле [1]:

$$I_{\text{уп}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{U_A - U_B}{Z_{\text{тп}A} + Z_{\text{тп}B} + Z_{\text{пр}1} \cdot l_1 + Z_{\text{пр}2} \cdot l_2} \right), \quad (2)$$

где U_A , U_B – напряжения на шинах тяговых подстанций участка, на котором осуществляется профилактический подогрев, В;

$Z_{\text{тп}A}$, $Z_{\text{тп}B}$ – сопротивления тяговых подстанций, Ом;

$Z_{\text{пр}1}$, $Z_{\text{пр}2}$ – удельные сопротивления 1 км тяговой сети при параллельной схеме питания исследуемого участка, для первого и второго пути соответственно, Ом/км;

l_1, l_2 – длины участков профилактического подогрева, для первого и второго пути соответственно, км.

Обозначим напряжение на шинах тяговой подстанции А как U_A , а на тяговой подстанции В – U_B . Согласно требованиям правил технической эксплуатации железных дорог России, максимальное напряжение на токоприемнике электроподвижного состава не должно превышать 29 кВ, а минимальный уровень напряжения на любом блок-участке не должен опускаться ниже 21 кВ. Таким образом, для создания уравнительного тока, на подстанции В с помощью РПН установим уровень напряжения на шинах на уровне 29 кВ, а на подстанции А на уровне 21 кВ. На участке принята однородная контактная подвеска марки М120 + МФ100 и однородные рельсовые нити, выполненные рельсами марки Р65, для такой тяговой сети среднее значение сопротивления составляет 0,21 Ом/км [1]. Исследована достаточность ли полученных величин уравнительного тока для того, чтобы не допустить гололедообразования на контактной сети. Для того, чтобы сделать такой вывод необходимо рассчитать минимальный ток профилактического подогрева. Для того, чтобы гололед не осаждался на проводе, температура провода должна быть несколько выше 0°C. Такой температурой принято считать +1°C, +2°C. Расчет будем вести для контактного провода МФ-100, так как главной задачей борьбы с гололедом является обеспечение качественного токосъема и непрерывного движения поездов.

Значение минимального тока, который способен нагреть контактный провод до температуры, которая предотвратит гололедообразование рассчитывается по формуле [1]:

$$I_{\phi \min} = \frac{1}{k_i} \cdot \left[\frac{(t_{\text{пр}} - t_{\text{окр}}) \cdot \pi}{r_{0\text{пр}}} \cdot (A \cdot k_v \cdot d_{\text{пр}}^a \cdot V^a + d_{\text{пр}} \cdot \alpha_{\text{лф}}) \cdot 10^{-3} \right]^{0,5}, \quad (3)$$

где k_i – коэффициент распределения тока для контактного провода, 0,488;

$t_{\text{пр}}$ – температура провода, принимаем 2°C;

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °C;

$r_{0\text{пр}}$ – сопротивление одного метра провода при температуре 0°C, для контактного провода МФ-100 принимается $0,163 \cdot 10^{-3}$;

A, a – аэродинамические коэффициенты, для контактных проводов фасонного сечения принимается $A = 70,29$, $a = 0,6$;

k_v – коэффициент, учитывающий направление ветра по отношению к оси провода, принимаем 0,5;

$d_{\text{пр}}$ – диаметр провода, для МФ-100 – 12,77 мм;

V – скорость ветра, м/с;

$\alpha_{\text{лф}}$ – составляющая коэффициента теплоотдачи за счет лучеиспускания при температуре провода около 0°C, для проводов марки МФ принимается равным 3,7.

Для того чтобы провести анализ зависимости тока профилактического подогрева от метеорологических условий на участке необходимо выполнить расчет по формуле при следующих климатических условиях:

- температура окружающей среды $t_{\text{окр}}$ варьируется от 0 до –10°C;
- скорость ветра V при гололеде варьируется от 1 до 15 м/с.

Расчеты представлены в табл. 1. На основании данных табл. 1 построим графики зависимости минимального тока профилактического подогрева от температуры окружающей среды и скорости ветра (рис. 2).

Таблица №1

Минимальные значения тока профилактического подогрева

Скорость ветра, м/с	Минимальный ток профилактического подогрева, А, при температуре окружающей среды, °С										
	0	–1	–2	–3	–4	–5	–6	–7	–8	–9	–10
1	184	226	261	292	319	345	369	391	412	432	452
2	218	267	308	345	378	408	436	462	487	511	534
3	242	296	342	382	419	452	484	513	541	567	592
4	261	319	369	412	452	488	522	553	583	612	639
5	277	339	392	438	479	518	554	587	619	649	678
6	291	356	411	460	504	544	582	617	650	682	712
7	303	372	429	480	525	568	607	644	678	711	743
8	315	385	445	498	545	589	629	668	704	738	771
9	325	398	460	514	563	608	650	690	727	763	797
10	335	410	474	529	580	626	670	710	749	785	820
11	344	421	486	544	596	643	688	730	769	807	842
12	352	432	498	557	610	659	705	748	788	827	863
13	360	441	510	570	624	674	721	765	806	845	883
14	368	451	521	582	638	689	736	781	823	863	902
15	375	460	531	593	650	702	751	796	839	880	919

Анализируя полученные зависимости можно сделать вывод, что величин уравнительного тока, рассчитанных ранее, достаточно для предотвращения гололедообразования на контактном проводе только при температурах окружающей среды от 0°С, до –3°С и при скорости ветра от 0 до 1 м/с.

При дальнейшем ухудшении метеорологической обстановки, а именно при дальнейшем понижении температуры и увеличении скорости ветряного потока, для обеспечения нагрева контактного провода до температуры, которая препятствует гололедообразованию, требуются значительно большие токи.

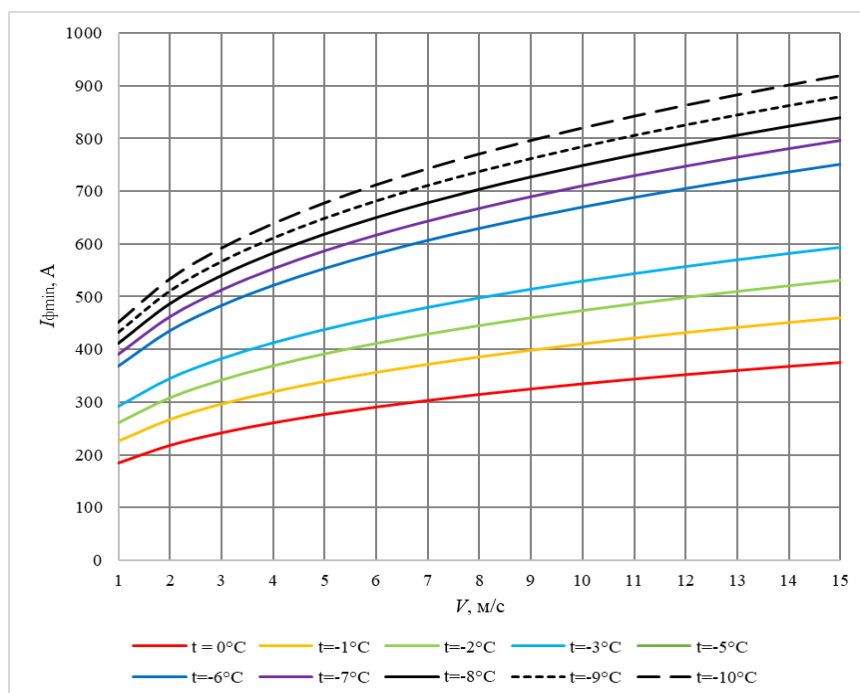


Рис. 2. – Графики зависимости минимального тока профилактического подогрева от температуры окружающей среды и скорости ветра

Стоит отметить, при профилактическом подогреве движение поездов по участку не запрещено, следовательно, уравнильный ток в контактной сети будет складываться с тяговым током и усиливать нагревательный эффект. Однако, персоналу тяговых подстанций в период осуществления профилактического подогрева следует следить за показаниями амперметров, которые [9-10] определяют ток, протекающий по питающим присоединениям контактной сети, чтобы не допустить превышения результирующим током наибольшего допустимого значения тока контактной сети, чтобы не допустить перегрева или отжига проводов и устройств тягового электроснабжения.

Выводы

1. Опасность гололедных отложений на устройствах контактной сети заключается в том, что гололедные образования увеличивают механическую нагрузку на элементы конструкций тяговой сети, что может приводить к

деформации этих элементов, и соответственно, к нарушению габарита приближения строений, что влечет за собой аварии с тяжелыми последствиями для инфраструктуры железных дорог. Гололедный слой на нижней части контактного провода значительно ухудшает электрический контакт между токоприемником электроподвижного состава и проводом, а при толщине стенки льда более 20 мм – прерывает, что может приводить к возникновению искрения и электрической дуги (рис. 2) и, как следствие усиленного нагрева, к таким негативным последствиям как подгар, поджог контактного провода, а в некоторых случаях и к пережогу, отжигу провода.

2. Из представленных в статье данных следует, что профилактический подогрев проводов контактной сети следует применять как упреждающую меру и начинать его до ухудшения метеорологической обстановки, для этого персонал дистанции должен проводить постоянный мониторинг климатических условий в периоды, в которые возможно отложение гололеда. Если образование гололеда все же произошло, то следует начинать процесс плавки гололеда на участке. Таким образом, можно сделать вывод, что процесс плавки наиболее эффективен при малых толщинах стенки гололеда и теряет свою эффективность при увеличении гололедного слоя. Поэтому, процесс плавки следует начинать немедленно при обнаружении персоналом или диагностической аппаратурой гололедных образований на проводах контактной сети, так как при дальнейшем усложнении метеорологической обстановки значительно ухудшается эффективность электрических методов с гололедообразованием, что может привести к негативным последствиям в виде повреждений устройств и конструкций контактной сети и связанного с ней оборудования.

Литература

1. Фигурнов Е.П., Жарков Ю.И., Попова Н.А. Схемы замещения системы внешнего электроснабжения электрифицированного транспорта напряжением 27.5 кВ // Электричество №8 2020. ISSN 0013-5380. С.29-36
2. Лысенко В.Г., Кубкина О.В., Попова Н.А. Определение границ участка тяговой сети с устойчивым коротким замыканием Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения // 2020 №1(74) ISBN 0201-727X С. 145-152
3. Li, V.N., S.V. Klimenko Determination of thermal softening of overhead wire exposed to an electric arc effect // Russian electrical engineering. – 2016. – V.87. – №2. – Pp. 77 – 79. DOI: 10.3103/S1068371216020115
4. Зарудский Г.К., Сыромятников С.Ю. Уточнение выражений для расчета температуры проводов воздушных линий электропередачи сверхвысокого напряжения // Вестник МЭИ «Электроэнергетика». – 2008. – №2. – С. 37 – 42.
5. Харчевников В.И. Площадь поверхности проводов воздушных линий электропередачи и контактной сети // Электрические станции. – 2017. – №1. – С. 38 – 41.
6. Фигурнов Е.П., Харчевников В.И. Опыты по нагреву неизолированных проводов воздушных линий // Электрические станции. – 2016. – №11. – С. 41 – 47.
7. Галкин А.Г., Митрофанов С.А. Совершенствование методов, информационных технологий и технических средств системы диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог: монография Екатеринбург: УрГУПС, 2012. — 226, [2] с. ISBN 978-5-94614-236-6
8. Figurnov, E.P., Kharchevnikov, V.I. Experiments on Heating Uninsulated Wires of Overhead Transmission Lines. Power Technol Eng 51, 119–124 (2017).

9. Капкаев, А.А., Бойко А.В. О возможности применения бесконтактной передачи электроэнергии для питания маломощных потребителей от проводников контактной сети электрических железных дорог переменного тока // Инженерный вестник Дона, 2019, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6158
10. Хакиев, З.Б., А.С. Каспржицкий, Г.И. Лазоренко СВЧ метод определения положения контактного провода электрифицированных железных дорог // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2367

References

1. Figurnov E.P., Zharkov Yu.I., Popova N.A. E`lektrichestvo №8 2020. ISSN 0013-5380. pp.29-36.
2. Ly`senko V.G., Kubkina O.V., Popova N.A. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya 2020 №1(74). pp. 145-152. ISBN 0201-727X
3. Li, V.N., S.V. Klimenko 2016. V.87. №2. pp. 77 – 79. DOI: 10.3103/S1068371216020115
4. Zarudskij G.K., Sy`romyatnikov S.Yu. Vestnik ME`I «E`lektroe`nergetika». 2008. №2. pp. 37 – 42.
5. Xarchevnikov V.I. E`lektricheskie stancii. 2017. №1. pp. 38 – 41.
6. Figurnov E.P., Xarchevnikov V.I. E`lektricheskie stancii. 2016. №11. pp. 41 – 47.
7. Galkin A.G., Mitrofanov S.A. Sovershenstvovanie metodov, informacionny`x texnologij i texnicheskix sredstv sistemy` diagnostiki kontaktnoj seti e`lektrifitsirovanny`x zhelezny`x dorog [Improving the methods, information technologies and technical means of the diagnostic system of the contact network



of electrified railways]: monografiya. Ekaterinburg: UrGUPS, 2012. 226, [2] p. ISBN 978-5-94614-236-6

8. Figurnov, E.P., Kharchevnikov, V.I. Experiments on Heating Uninsulated Wires of Overhead Transmission Lines. Power Technol Eng 51, p.119–124 (2017).

9. Каркаев, А.А., Бойко А.В. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6158

10. Хакiev, Z.B., A.S. Kasprzhiczkiy, G.I. Lazorenko Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2367.

Дата поступления: 14.08.2025

Дата публикации: 25.09.2025