

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.332.3

DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_42

*К. В. Богданова, Е. В. Добрынин***МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ПОДОГРЕВА ПРОВОДОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ**

Аннотация. Рассмотрены вопросы использования регулируемых источников питания для обеспечения профилактического противогололедного подогрева проводов контактной сети. Обозначены проблемы работы системы профилактического подогрева проводов контактной сети участка, возникающие при движении по нему поездов, связанные с остыванием подвески из-за изменения токов в тяговой сети. Представлен алгоритм управления источниками профилактического подогрева, обеспечивающий поддержание температуры проводов для исключения их обледенения без введения дополнительных ограничений в движение поездов. В алгоритме учтены границы температуры, в пределах которых поддерживается, нагрев проводов, а также переходные процессы, возникающие при переключениях, и ресурс оборудования.

Ключевые слова: электротяговые сети, контактная сеть, профилактический подогрев, система тягового электроснабжения, регулируемые источники питания.

Для цитирования: Богданова, К. В. Математическая модель автоматизированной системы профилактического подогрева проводов контактной сети / К. В. Богданова, Е. В. Добрынин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 42–47. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_42.

Образование гололедно-изморозевых отложений на проводах контактной сети приводит к нарушению токосъема и влечет за собой остановку движения поездов по участку, где произошло обледенение. Согласно «Инструкции по подготовке к работе и обеспечению надежности работы устройств электроснабжения в зимний период» [1] удаление льда с проводов производится, если его толщина начинает достигать 3 мм. В начальный период образования на контактном проводе слоя льда токосъем еще возможен, но он уже сопровождается искрением, что повышает износ контактного провода и полоза токоприемника. В момент трогания электровоза ток может составлять до 3 кА, и если этот момент будет сопровождаться образованием дуги, то возможен пережог контактного провода.

Чтобы снизить риск механической поломки токоприемника при движении во время начальной стадии обледенения проводов, вводится ограничение на скорость движения по участку. При этом движение поездов должно производиться с минимальным интервалом, чтобы не успел восстановиться слой льда, снятый токоприемником предыдущего локомотива. Когда слой льда достигает значения, при котором токосъем становится невозможным, движение по участку полностью останавливается до тех пор, пока не будет очищена ото льда контактная подвеска.

Существующие способы удаления льда с контактных проводов сопряжены с временным прекращением движения поездов по участку, поэтому более эффективным считается применение средств и способов, которые не допустят обледенения контактной подвески. К таким превентивным мерам относятся профилактический подогрев проводов и нанесение на них покрытий, снижающих адгезию льда. Последний способ, ввиду особенностей эксплуатации контактных проводов, имеет недостаток – нужно периодически обновлять защитный слой. При этом периодичность обработки поверхности зависит не от погодных условий, а от количества проходов токоприемников. Профилактический подогрев, в свою очередь, применяется только в те моменты времени, когда возникают условия вероятного образования гололедно-изморозевых отложений.

Профилактический подогрев проводов контактной сети имеет ряд преимуществ: во время его включения движение на участке не останавливается, кроме того, управление процессами включения, выключения и регулировки тока нагрева можно автоматизировать [2]. В свою очередь применение системы профилактического подогрева на железных дорогах не лишено недостатков: на большинстве тяговых подстанций постоянного тока в качестве источника нагрева используется второй преобразовательный агрегат, включаемый на пониженное напряжение последовательно с основным. Такая схема ограничивает возможность регулировки тока, который может иметь недостаточное значение для исключения обледенения проводов в условиях окружающей среды, либо, напротив, приводить к избыточному нагреву и перерасходу электроэнергии.

Рассмотрим систему профилактического подогрева проводов контактной сети участка, электрифицированного на постоянном токе. В настоящее время имеются разработки и примеры практической реализации источников питания для профилактического подогрева, которые регулируют ток и напряжение выхода (напряжение выхода 0–1600 В, номинальный ток 2000 А, максимальный – до 4000 А) [3]. Применение такого источника позволяет отрегулировать ток выхода на уровень, необходимый для поддержания температуры контактного провода (5–10 °С достаточно, чтобы исключить его обледенение) с учетом длины участка, сопротивления контактной сети и параметров окружающей среды [2, 4].

Однако, как показали исследования, изменения настройки уровня напряжения источника питания для получения тока профилактического подогрева под параметры межподстанционной зоны (МПЗ) и окружающей среды достаточно только в случае отсутствия движения поездов по участку [5]. На схеме рис. 1, а представлен случай для наиболее распространенной петлевой схемы профилактического подогрева (тяговая подстанция – пост секционирования (ТП – ПС)) и распределения тока при заходе на него электроподвижного состава (ЭПС). Ток от источника профилактического подогрева Вп, подключенного между запасной (ЗШ) и основной (+) шинами, в отсутствие ЭПС циркулирует по контуру, образуемому контактными подвесками двух путей и постом секционирования. Присутствие ЭПС на участке вызывает протекание токов его питания от основного преобразователя тяговой подстанции по контактным подвескам первого ($I_{\text{ЭПС I}}$) и второго ($I_{\text{ЭПС II}}$) путей. Наложение токов приводит к тому, что со стороны ТП величина тока уменьшается, а со стороны I пути через ПС – ток увеличивается. Как следствие – пока поезд проходит по участку, провода контактной подвески со стороны ТП успевают остыть, что создает условия для образования на них наледи.

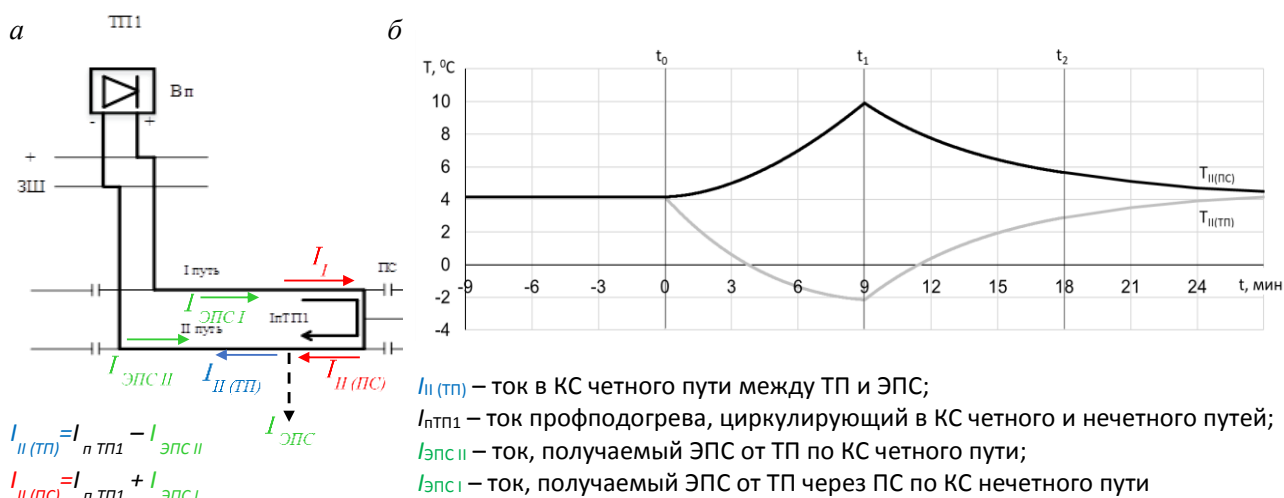


Рис. 1. Петлевая схема профилактического подогрева проводов контактной сети (а) и графики изменения температуры контактного провода четного пути при прохождении по нему поезда (б) со стороны ТП ($T_{II(ТП)}$) и со стороны ПС ($T_{II(ПС)}$):

t_0 – момент захода поезда на МПЗ; t_1 – момент прохода ПС; t_2 – момент выхода с МПЗ

Чтобы обеспечить величину тока $I_{ТП}$ в контактной сети достаточной для поддержания температуры контактного провода выше 0 °С, необходимо изменить ток, циркулирующий в контуре участка. Для этого требуется разработать систему и алгоритм управления напряжением источника профилактического подогрева [6, 7].

Рассмотрим участок с петлевой схемой профилактического подогрева ТП-ПС, где по четному и нечетному путям проходят по одному ЭПС. На рис. 2 представлены схемы протекания токов в тяговой сети: слева от ТП по питающим линиям к ЭПС и ПС.

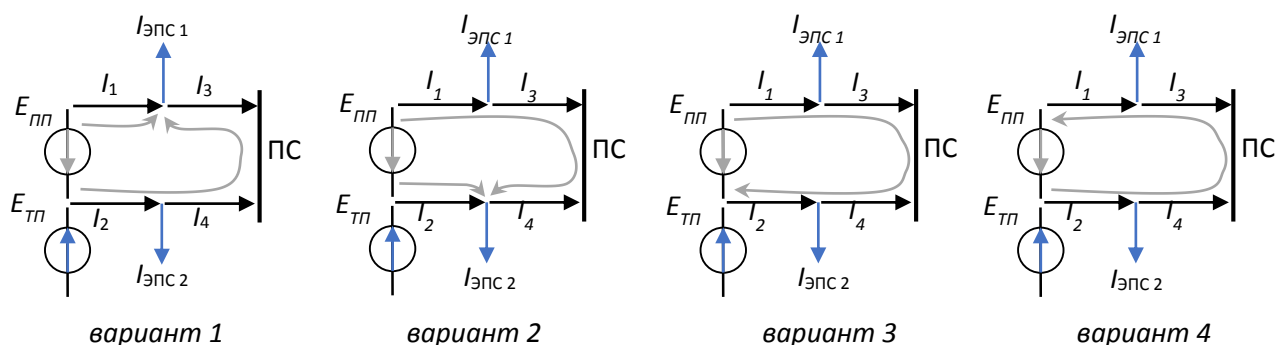


Рис. 2. Варианты протекания тока в тяговой сети

Для обеспечения профилактического нагрева контактных проводов, предотвращающего образование на них гололедно-изморозевых отложений, токи I_1 – I_4 , должны иметь значения по модулю не ниже $I_{ПП}$. Методика обеспечения нагрева, т. е. выполнение указанного условия заключается в выборе одного из четырех вариантов и расчете напряжения источника питания $E_{ПП}$ системы профилактического подогрева, обеспечивающего выполнение этого варианта:

$$E_{ПП} = -I_1 \cdot R_1 - I_3 \cdot R_3 + I_4 \cdot R_4 + I_2 \cdot R_2,$$

где R_1 – R_4 – сопротивления участков тяговой сети, где протекают соответствующие токи I_1 – I_4 .

Уравнения, описывающие протекания токов на рассматриваемом участке, представлены в таблице. Выбор варианта производится по ряду условий:

- 1 – ни один из токов не должен превышать значение, допустимое для контактной подвески;
- 2 – напряжение на токоприемниках ЭПС не должно опускаться ниже 2700 В:

$$U_{ЭПС 1} = E_{ТП} - E_{ПП} - I_1 \cdot R_1 \geq 2700,$$

$$U_{ЭПС 2} = E_{ТП} - I_2 \cdot R_2 \geq 2700;$$

3 – напряжение в тяговой сети не должно превышать 4000 В. Такое превышение может наблюдаться в вариантах 2 и 3, где для реализации указанных направлений протекания тока нужно будет поменять полярность источника профилактического подогрева;

4 – потери в тяговой сети должны быть минимальны $\sum_{k=1}^4 I_k^2 \cdot R_k \rightarrow \min$. Условие применяется, если при соблюдении предыдущих требований подходит больше одного варианта.

Уравнения протекания токов в тяговой сети

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
$I_3 = -I_{ПП}$	$I_4 = -I_{ПП}$	$I_2 = -I_{ПП}$	$I_1 = -I_{ПП}$
$I_4 = -I_3$	$I_3 = -I_4$	$I_4 = I_2 - I_{ЭПС 2}$	$I_3 = I_1 - I_{ЭПС 1}$
$I_2 = I_4 + I_{ЭПС 2}$	$I_1 = I_3 + I_{ЭПС 1}$	$I_3 = -I_4$	$I_4 = -I_3$
$I_1 = I_{ЭПС 1} + I_3$	$I_2 = I_{ЭПС 2} + I_4$	$I_1 = I_{ЭПС 1} + I_3$	$I_2 = I_{ЭПС 2} + I_4$

Варианты 1 и 2 возможны в том случае, если ток ЭПС (1 или 2 соответственно) больше двойного тока профилактического подогрева. В остальных случаях обеспечение нужного уровня тока в контактной сети возможно за счет вариантов 3 или 4. Но при этом высока вероятность того, что не будут выполнены условия по максимальному току и уровням напряжения.

Для расширения диапазона работы схемы профилактического подогрева предлагается устанавливать два дополнительных источника питания, подключенных в питающие линии. Тогда относительно потенциала основного преобразовательного агрегата $E_{ТП}$ возможно регулировать напряжение от максимума 4000 В на одном фидере до минимума $2700 + I_2 \cdot R_2$ (для варианта 3 это значение может быть ниже 2700 В). Расширение диапазона работы источника дает возможность не вводить дополнительных ограничений на массу поездов, пропускаемых по участку во время профилактического подогрева, как это происходит при традиционных схемах, поскольку источник работает еще и как вольтодобавочное устройство.

В том случае, если ни при одном из вариантов не могут быть выполнены обозначенные условия, в алгоритме управления применяются последовательные уступки:

1 – по одному из целевого нагрева исключаются участки контактной сети, нагрев которых превышает верхнюю границу диапазона температур, в котором обеспечивается профилактический подогрев; 2 – по одному из целевого нагрева исключаются участки контактной сети, нагрев которых имеет наибольшую температуру.

Учитывая теплоемкость контактного провода, можно утверждать, что его охлаждение происходит относительно медленно. В условиях, когда на проводах возможно образование гололеда, остывание провода, например, с 5°C до нуля будет происходить в течение 2–7 минут. То есть профилактический подогрев участков контактной сети можно производить поочередно. При этом время между переключениями вариантов будет составлять от десятков секунд до минут, что позволит сохранять ресурс оборудования.

В случае поочередного прогрева участков проводов изменяются требования к величинам тока профилактического подогрева. А именно: ток профилактического подогрева должен обеспечивать уже не поддержание температуры, а нагрев с температуры включения до верхней границы контролируемого диапазона. Ток в этом случае рассчитывается по условию, чтобы скорость нагрева была не ниже скорости охлаждения. Это условие выполняется, если мощность нагрева будет более чем в 2 раза выше мощности охлаждения.

Переключение между вариантами сопровождается не только изменением уровня напряжения источников профилактического подогрева, но и сменой их полярности. Чтобы избежать скачков напряжения на токоприемниках электровозов, регулировку следует выполнять плавно и синхронно на двух источниках одновременно. То есть скорость изменения напряжения на источниках не должна приводить к резкому изменению напряжения на токоприемнике ЭПС, что сказалось бы на его ускорении, а значит, и на резком изменении тока нагрузки или привело бы к круговому огню на коллекторах двигателей. Как отмечалось выше, тепловая инертность проводов контактной сети позволяет выбрать скорость регулировки напряжения, обеспечивающую выполнение всех описанных условий.

Также следует отметить, что для исключения частых переключений между вариантами система должна работать на поддержание температуры проводов не на одном заданном уровне, а в диапазоне значений: как только достигается верхний предел температуры, нагрев этого участка отключается, как только достигается нижний предел – включается нагрев этого участка. При этом система должна работать на опережение, то есть в режиме нагрева всегда должны находиться один или два участка, даже если охлаждение их еще не достигло нижней границы, но отключаться также по верхней. Это позволяет избежать одновременного охлаждения всех участков и перехода системы в состояние быстрых переключений. Если верхнюю границу сделать плавающей, то тем самым можно изменить и интервал между переключениями вариантов. На рис. 3 представлен вариант изменения температуры нагрева проводов контактной сети для ситуации, практически идентичный рис. 1, но с управлением источниками профилактического подогрева, где видно, что переключения между прогреваемыми участками выполнялось в противофазе, что обеспечивало поддержание температуры всей подвески при ограниченном количестве переключений (и выполнении условий по допустимому току и напряжению).

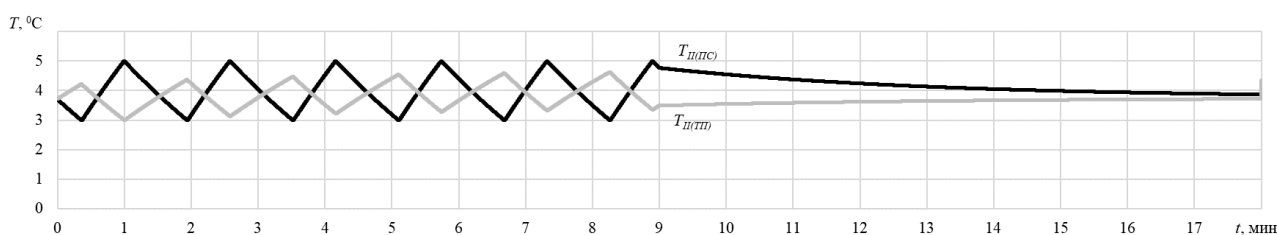


Рис. 3. Графики изменения температуры контактного провода четного пути при прохождении поезда со стороны ТП ($T_{П(ТП)}$) и со стороны ПС ($T_{П(ПС)}$):

0 мин – момент захода поезда на МПЗ; 9 мин – момент прохода ПС; 18 мин – момент выхода с МПЗ

Таким образом, проведенное исследование выявило, что источник питания для профилактического противогололедного подогрева проводов контактной сети может быть отрегулирован на режим поддержания температуры проводов, но при прохождении поезда этой настройки недостаточно. Чтобы исключить охлаждение даже части подвески, необходимо использовать регулируемые источники в каждой питающей линии. Рассмотренный алгоритм управления источниками профилактического подогрева позволяет обеспечить не только поддержание температуры проводов, что не дает им обледенеть, но и пропуск поездов без ввода ограничений. В отсутствие необходимости прогрева подвески эти

же источники питания могут выполнять роль вольтодобавочных устройств, что создает возможность увеличить пропускную способность участка.

Список литературы

1 Инструкция по подготовке к работе и обеспечению надежности работы устройств электрооборудования в зимний период : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 ноября 2019 г. № 2542/р. – Екатеринбург : УралЮрИзд-дат, 2023. – 68 с.

2 **Жарков, Ю. И.** Противогололедные режимы контактной сети / Ю. И. Жарков, Е. П. Фигурнов, Т. Е. Петрова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 2 (50). – С. 27–37. – EDN QAGBID.

3 **Мизинцев, А. В.** Инновации в развитии электроэнергетической инфраструктуры железнодорожного транспорта / А. В. Мизинцев // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 6 (37). – С. 50–53. – EDN ONRLEF.

4 **Батрашов, А. Б.** Совершенствование математической модели расчета электротепловых процессов в контактной подвеске постоянного тока / А. Б. Батрашов, А. В. Паранин, К. Г. Шумаков // Транспорт Урала. – 2019. – № 1 (60). – С. 90–96. – DOI 10.20291/1815-9400-2019-1-90-96.

5 Моделирование нагрева контактной подвески при профилактическом подогреве в условиях движения поездов / Е. В. Добрынин, К. В. Богданова, А. А. Комолов, Е. М. Плохов // Электротехника. – 2023. – № 10. – С. 24–28. – DOI 10.53891/00135860_2023_10_24.

6 **Патент № 2800142 С1** Российская Федерация, МПК H02G 7/16. Система профилактического подогрева контактной сети / Е. В. Добрынин, К. В. Богданова. – № 2022129698 ; заявл. 16.11.2022 ; опублик. 19.07.2023, Бюл. № 20. – EDN TVPIZO.

7 **Добрынин, Е. В.** Адаптивная система профилактического подогрева проводов контактной сети / Е. В. Добрынин, К. В. Богданова // Наука и образование транспорту. – 2023. – № 1. – С. 269–271. – EDN RMLGBM.

References

1 Instructions for preparing for work and ensuring the reliability of electrical supply devices in winter: approved by Order of JSC “Russian Railways” dated November 14, 2019 No. 2542/r. – Yekaterinburg : UralUrIzdat, 2023. – 68 p.

2 **Zharkov, Yu. I.** Anti-icing modes of the contact network / Yu. I. Zharkov, E. P. Figurnov, T. E. Petrova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2013. – No. 2 (50). – P. 27–37. – EDN QAGBID.

3 **Mizintsev, A. V.** Innovations in the development of electrical power infrastructure of railway transport / A. V. Mizintsev // Transport of the Russian Federation. – 2011. – No. 6 (37). – P. 50–53. – EDN ONRLEF.

4 **Batrashov, A. B.** Improvement of the mathematical model for calculating electrothermal processes in a direct current contact suspension / A. B. Batrashov, A. V. Parinin, K. G. Shumakov // Transport of the Urals. – 2019. – No. 1 (60). – P. 90–96. – DOI 10.20291/1815-9400-2019-1-90-96.

5 Modeling of contact suspension heating during preventive heating under train traffic conditions / E. V. Dobrynin, K. V. Bogdanova, A. A. Komolov, E. M. Plokhov // Electrical engineering. – 2023. – No. 10. – P. 24–28. – DOI 10.53891/00135860_2023_10_24.

6 Patent No. 2800142 C1 Russian Federation, IPC H02G 7/16. System of preventive heating of the contact network / E. V. Dobrynin, K. V. Bogdanova. – No. 2022129698; appl. 11/16/2022; publ. 07/19/2023, Bull. No. 20. – EDN TVPIZO.

7 **Dobrynin, E. V.** Adaptive system for preventive heating of contact network wires / E. V. Dobrynin, K. V. Bogdanova // Science and education in transport. – 2023. – No. 1. – P. 269–271. – EDN RMLGBM.

K. V. Bogdanova, E. V. Dobrynin

MATHEMATICAL MODEL OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR PREVENTIVE HEATING OF CONTACT NETWORK WIRES

Abstract. The issues of using adjustable power sources to provide preventive anti-icing heating of contact network wires are considered. It is indicated the problems of the system of preventive heating of the wires of the section contact network that arise when trains move along it, associated with the cooling of the suspension due to changes in currents in the traction network. It is presented an algorithm for controlling sources of preventive heating which ensures that the temperature of the wires is maintained to prevent their icing without introducing

additional restrictions on the train movement. The algorithm takes into account the temperature limits which the heating of the wires is maintained, as well as transient processes that occur during switching, and the service life of the equipment.

Keywords: electric traction networks, contact network, preventive heating, traction power supply system, regulated power supplies.

For citation: Bogdanova, K. V. Mathematical model of an automated system for preventive heating of contact network wires / K. V. Bogdanova, E. V. Dobrynin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No 2. – P. 42–47. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_2_42.

Сведения об авторах

Богданова Ксения Викторовна

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта»,
преподаватель,
e-mail: titorenkok@mail.ru

Добрынин Евгений Викторович

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС),
кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта»,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой,
e-mail: eu_geniy@list.ru

Information about the authors

Bogdanova Ksenia Viktorovna

Samara State Transport University (SSTU),
Chair «Power Supply of Railway Transport»,
Lecturer,
e-mail: titorenkok@mail.ru

Dobrynin Evgeniy Viktorovich

Samara State Transport University (SSTU),
Chair «Power Supply of Railway Transport»,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, Head of the Chair,
e-mail: eu_geniy@list.ru