
ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 629.423.31

Анализ режимов сушки увлажненной изоляции тяговых двигателей локомотивов с позиции энергосбережения

М. Ю. Хажеева¹, Е. Ю. Дульский¹, В. Н. Иванов¹, В. А. Кручек²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 664074, Иркутск, Чернышевского, 15

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Хажеева М. Ю., Дульский Е. Ю., Иванов В. Н., Кручек В. А. Анализ режимов сушки увлажненной изоляции тяговых двигателей локомотивов с позиции энергосбережения // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 1. — С. 7–17. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-7-17

Аннотация

Цель: В данной статье рассмотрены современные проблемы, требующие повышения надежности тяговых двигателей локомотивов, эксплуатируемых в горных рельефах и в сложном климате. В процессе эксплуатации подвижного состава отрицательные экстремальные температуры оказывают большое влияние на изоляцию оборудования. Путем изменения длительности циклов и периодов работы нагревательных элементов с течением времени в каждом последующем цикле характеризуются технологические процессы протекания сушки. **Методы:** Сравнение имеющихся режимов энергоподвода в процессе сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей методом подбора управления специальной установкой. Использование известных уравнений для построения кривой нагрева и охлаждения в процессе сушки. **Результаты:** В результате приведенных сравнений режимов энергоподвода предложен комбинированный метод регулирования сушкой увлажненной изоляции. Полученные результаты позволяют производить качественную сушку увлажненной изоляции на основе фактической степени увлажнения материала. К каждому рассматриваемому режиму энергоподвода построены графики зависимостей мощности нагревателей и вентилятора калориферной установки от времени сушки, на которых видно, как изменяются показатели кривых нагрева изоляции и энергопотребления. **Практическая значимость:** Полученные результаты указывают на необходимость использования трехциклового метода сушки увлажненной изоляции на основе фактического значения увлажненности изоляции оборудования. Указанный метод энергоподвода позволяет решить актуальную проблему тем, что улучшается качество высушиваемого оборудования, сокращаются расходы на электроэнергию и увеличивается продолжительность работы.

Ключевые слова: Сушка изоляции, электрокалориферный метод, режимы сушки изоляции, переменный энергоподвод, степень увлажнения, надежность тягового двигателя.

В процессе длительной эксплуатации тягового подвижного состава на территориях со сложными климатическими условиями, обусловленными резкими перепадами температур, возникает процесс увлажнения изоляции силового оборудования путем проникновения влаги во внутрь. Результатом является снижение диэлектрической прочности силового оборудования, что может привести к ее электрическому пробую.

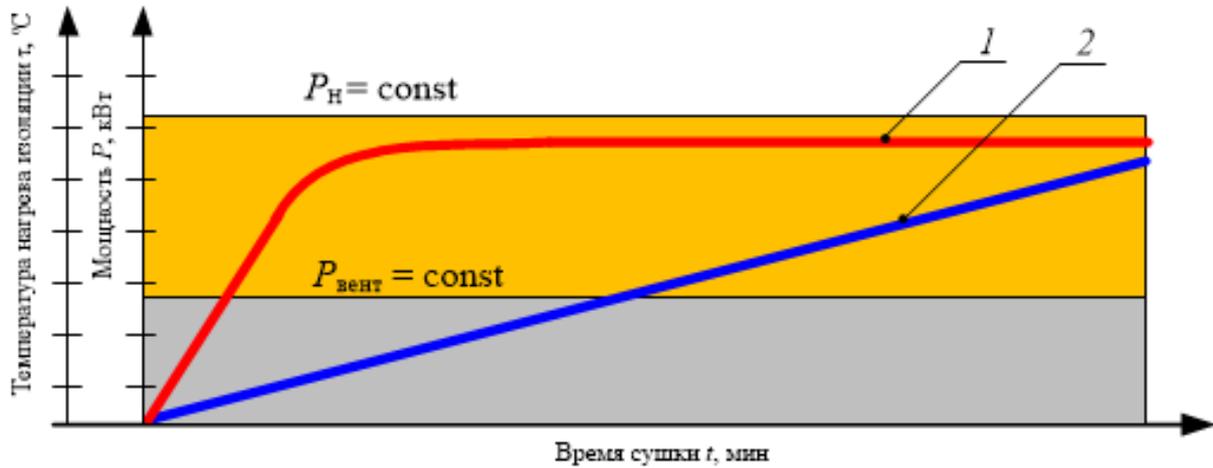


Рис. 1. График работы электронагревателя калорифера при постоянном режиме:
1 — кривая нагрева изоляции; 2 — кривая энергопотребления

Проникновение влаги вглубь изоляционного материала осуществляется на капиллярном уровне, в случаях если в ней образуются микрополости и сквозные каналы, обусловленные возникновением микротрещин и полостей между слоями изоляции в процессе усадки, вызванной старением или некачественным ремонтом, в частности намоткой новой изоляции и ее укладки в пазы сердечника (якоря или статора). Помимо этого, полости могут образовываться из-за некачественной пропитки изоляции [1].

Таким образом, наличие микрополостей в изоляции в процессе эксплуатации тягового подвижного состава из-за постоянного воздействия вибрации приводит к еще большему увеличению количества и размеров микротрещин, образующих между собой каналы для перемещения влаги за счет капиллярного эффекта, что будет подробно рассмотрено в дальнейших статьях.

Фактическое увлажнение и температура изоляции тяговых двигателей локомотивов в процессе эксплуатации как в статике, так и в динамике напрямую зависят от совокупного влияния ее структуры, в частности влаго- и теплопереноса во внутренних слоях, а также от влияния внешних факторов на тепломассообмен на ее поверхности.

Для точного моделирования процесса тепломассообмена изоляции в процессе ее эксплуатации и ремонта, в частности сушки, требуется решить систему нелинейных дифференциальных уравнений с соответствующими граничными условиями, зависящими в первую очередь от режима сушки [2].

Таким образом, данная статья посвящена анализу существующих режимов сушки увлажненной изоляции тяговых двигателей локомотивов.

Далее проанализируем особенности различных режимов сушки увлажненной изоляции тяговых двигателей локомотивов на примере использования депо-вских электрокалориферных установок, позволяющих осуществлять сушку изоляции без выкатки колесных пар [3].

Одним из наиболее простых в реализации является режим с постоянным энергоподводом, который характерен непрерывной работой нагревательных элементов и вентилятора электрокалорифера в течение всего процесса сушки изоляции. График работы электронагревателя калорифера при постоянном режиме приведен на рис. 1.

При моделировании системы постоянного энергоподвода можно воспользоваться известным уравнением, которое будет описывать кривую нагрева [4]:

$$\tau_{\text{пост}} = \tau_{\text{пред}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}} \right) + \tau_{\text{нач}} e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}}, \quad (1)$$

где $\tau_{\text{пред}}$ — предельная температура нагрева, зависящая от класса изоляции, °С;
 t — время сушки, мин;

$T_{\text{н}}$ — постоянная времени нагрева изоляции, мин;

$\tau_{\text{нач}}$ — начальная температура (зависит от окружающей среды и предыдущих режимов работы двигателя), °С.

Данный режим является наиболее простым с точки зрения реализации и управления, а также контроля и на сегодняшний день является штатным методом, применяемым в депо.

Главными недостатками данного режима можно отметить:

- высокую скорость нагрева изоляции, что может привести к растрескиванию,
- отсутствие пауз, необходимых для перераспределения температуры во внутренних слоях изоляции и протекания эффективного удаления влаги из них;
- существенные затраты электроэнергии.

Более эффективным методом сушки изоляции, если провести сравнение с предыдущим, является прерывистый режим энергоподвода, а именно тем, что отличается возможностью чередовать периодами включения и отключения нагревательных элементов, при этом допускается работа вентилятора как в постоянном, так и непрерывном режиме. Этот режим предоставляет возможность управления мощностью нагревателя, что снижает потребление электроэнергии и гарантирует качественную сушку изоляции, так как в периоды паузы во внутренних слоях изоляции происходит перераспределение и выравнивание температуры, что способствует ускорению процесса удаления влаги в последующих циклах нагрева.

График работы электронагревателя калорифера при прерывистом режиме изображен на рис. 2.

Для построения кривой нагрева при прерывистом режиме важно учитывать, что при нагреве (период работы электронагревателя калорифера) кривая строится по выражению (1), а при охлаждении (период паузы) — по выражению [5]:

$$\tau_{\text{охл}} = \tau_{\text{нач}} e^{-\frac{t}{T_{\text{н}}}}. \quad (2)$$

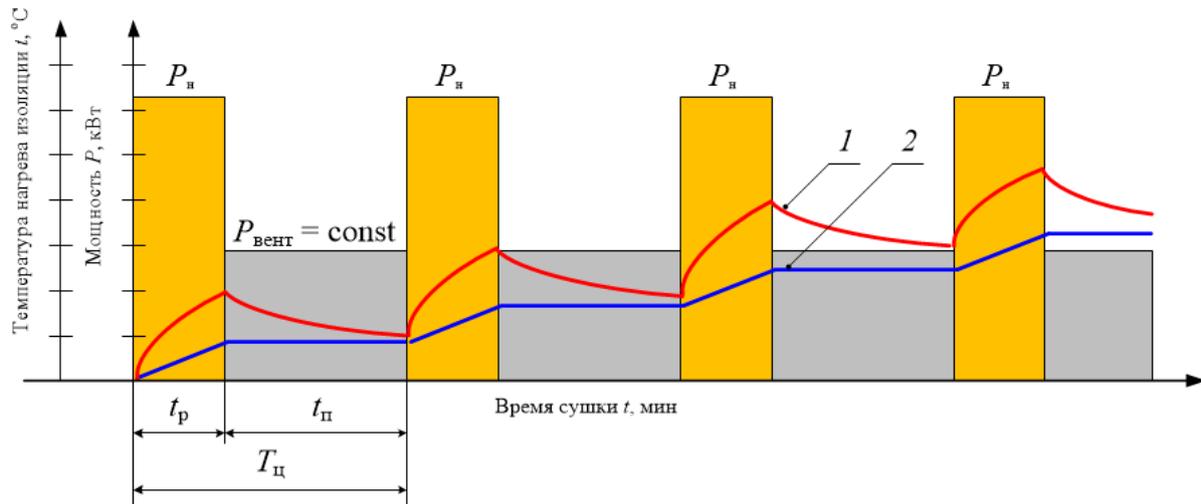


Рис. 2. График работы электронагревателя калорифера при прерывистом режиме: 1 — кривая нагрева изоляции; 2 — кривая энергопотребления; t_p — период работы электронагревателя калорифера; $t_п$ — период паузы; $T_ц$ — период цикла

Чередование конкретных периодов работы и паузы может осуществляться за счет отключения нагревательных элементов с помощью автоматизированной системы управления работой электрокалориферной установки, которая может быть собрана на различной элементной базе.

В течение промежутка времени t_p нагревательные элементы получают питание, что сопровождается обдувом изоляции горячим воздухом. В течение промежутка времени $t_п$ питание с нагревателей снимается. При этом, если вентилятор продолжает работать, изоляция обдувается холодным или теплым воздухом, а если вентилятор также обесточивается, то изоляция охлаждается от естественной конвекции.

Среднее значение мощности электронагревателя зависит от соотношения величин t_p и $T_ц$. Изменяя значения t_p и $T_ц$, можно регулировать процесс протекания сушки увлажненной изоляции [6].

На рис. 2 представлен вариант прерывистого энергоподвода с постоянными значениями времени периода работы и паузы, цикла в целом.

В зависимости от длительности периодов работы и паузы можно выделить следующие разновидности прерывистого режима:

- широтный,
- частотный,
- амплитудный,
- комбинированный.

Далее в статье будет подробно рассмотрен каждый из всех перечисленных прерывистых режимов энергоподвода.

Широтный режим энергоподвода основан на поддержании постоянного периода цикла $T_ц$, в течение которого электронагреватель включается и отключается,

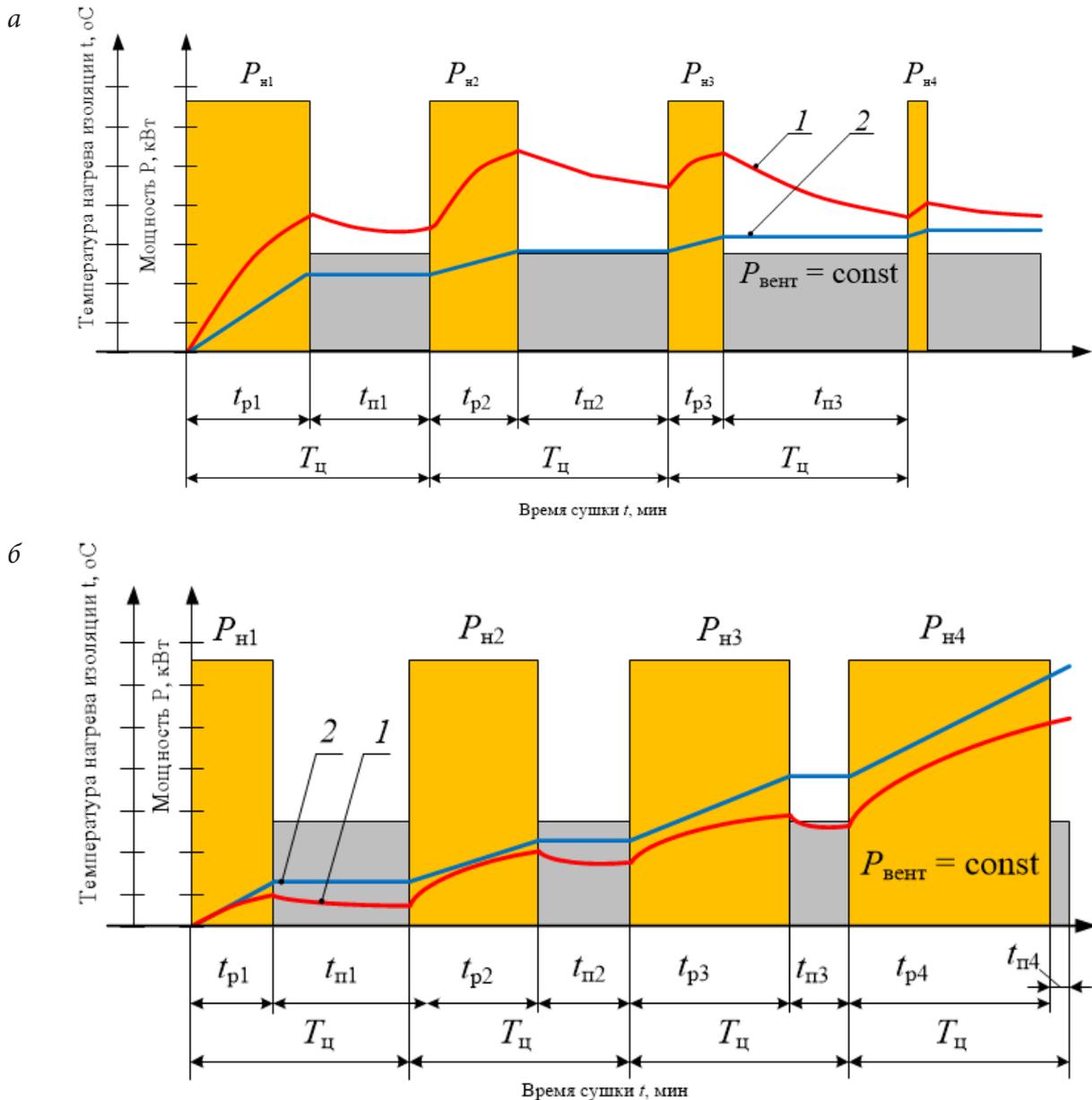


Рис. 3. Широтный режим управления энергоподводом:
 а — с уменьшением средней мощности потребления;
 б — с увеличением средней мощности потребления

а изменяются лишь период времени работы t_p и паузы $t_{п}$. При этом может происходить увеличение длительности периода работы с уменьшением длительности паузы, что приводит к постепенному увеличению значения средней мощности электронагревателя, либо уменьшение длительности периода работы с увеличением длительности паузы, что приводит к постепенному снижению значения средней мощности электронагревателя (рис. 3).

Далее рассмотрим частотный режим энергоподвода, при котором период цикла $T_{ц}$ постоянно изменяется, увеличиваясь либо уменьшаясь. Происходит это за счет изменения времени работы электронагревателя t_p или времени паузы $t_{п}$

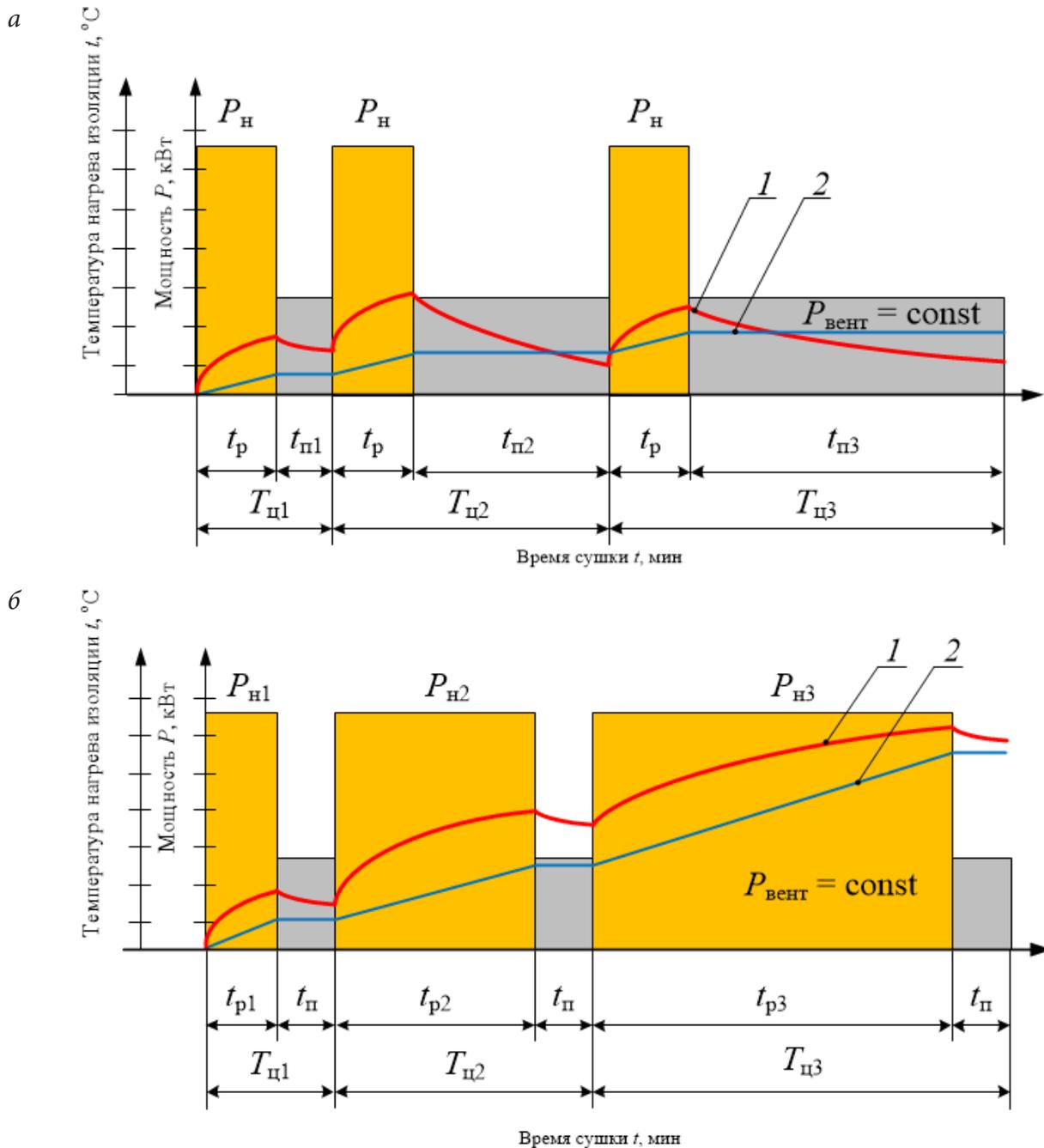


Рис. 4. Частотный принцип управления энергоподводом:
a — с увеличением периода паузы $t_{п}$, *б* — с увеличением периода паузы $t_{п}$

(рис. 4). При этом отличия могут заключаться в постоянстве одного из параметров: времени работы электронагревателя или времени паузы.

При амплитудном режиме энергоподвода регулируются значения уровня (амплитуды) мощности, подводимой к электронагревателям или вентилятору. Данный режим позволяет осуществлять сушку изоляции при более тонких настройках, к примеру с изменением температуры нагрева изоляции при сушке. При этом с точки зрения элементной базы для регулирования мощности возможно применять различные управляемые преобразователи.

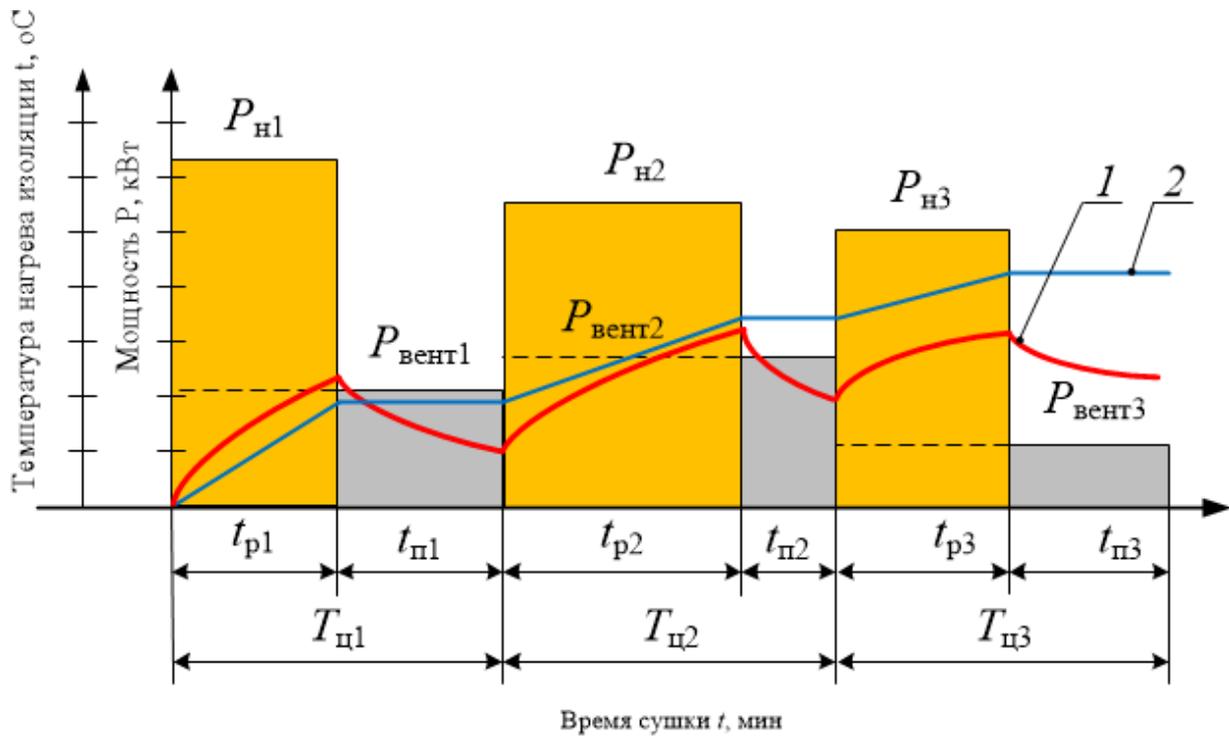


Рис. 5. Трехциклового способ сушки увлажненной изоляции

С позиции ресурсосбережения наилучшие результаты можно достигнуть, применяя комбинированные режимы энергоподвода, заключающиеся, к примеру, в совмещении широтного и амплитудного режимов.

Примером комбинированного режима энергоподвода является трехциклового амплитудно-широтного-прерывного способ сушки изоляции электрических машин [7]. Недостаток данного способа заключается в том, что при переключении на другой уровень энергоподвода и выборе цикла сушки изоляции не учитывается фактическое значение степени увлажнения изоляции.

В соответствии с результатами проведенных ранее научных исследований предлагается новый трехциклового способ сушки увлажненной изоляции [8]. График работы электронагревателей калорифера при трехциклового способе сушки увлажненной изоляции приведен на рис. 5.

В каждом из циклов кривая нагрева изоляции меняет свою кривизну в зависимости от значения мощности, подводимой к нагревателям, что представлено схематично на рис. 6.

Особенностью данного режима является интенсивное удаление влаги при начальных циклах сушки, особенно с поверхности изоляции за счет максимально допустимого нагрева, обусловленного предельно допустимой температурой для используемого класса изоляции [9]. Дальнейшее использование чередования периодов нагрева и паузы с достаточным обдувом обеспечивает эффективный термо- влагоперенос от внутренних слоев изоляции к поверхностным, что обеспечивает более быструю сушку. А наличие обратной связи температуры нагрева

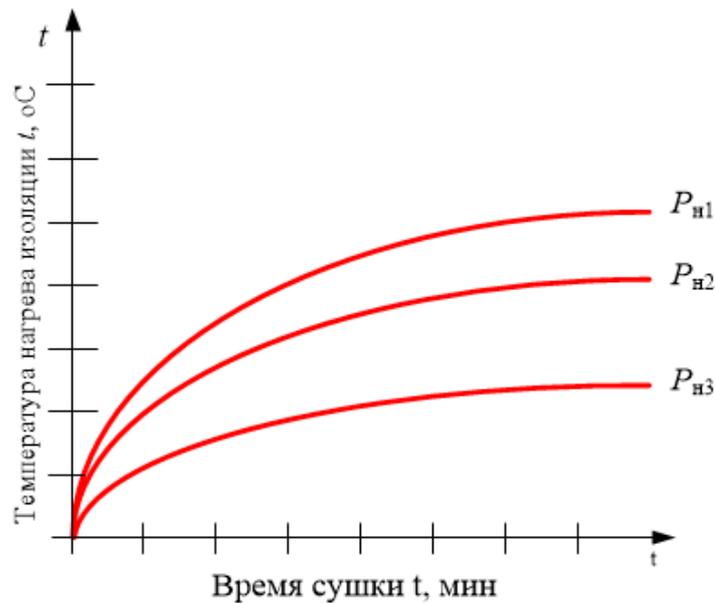


Рис. 6. Кривые нагрева изоляции в процессе сушки при изменении мощности, подводимой к нагревателям

по фактической влажности еще больше ускоряет процесс сушки и минимизирует расход электроэнергии, что в конечном итоге оказывает улучшение показателей надежности изоляции тягового двигателя локомотива.

На основании проведенного анализа существующих режимов сушки была составлена классификация, представленная на рис. 7. Классифицировать режимы сушки можно на три вида: широтный, частотный и амплитудный.



Рис. 7. Классификация режимов сушки

Протекание технологического процесса сушки, как указывалось выше, в полной мере зависит от выбора режима энергоподвода. Таким образом, в дальнейших работах планируется математически обосновать выбор того или иного режима, с привязкой не только к температуре и времени сушки, а также с привязкой к начальному состоянию увлажнения изоляции.

Список источников

1. Маслов В. В. Влагостойкость электрической изоляции / В. В. Маслов. — М.: Энергия, 1973, — 208 с.
2. Хажеева М. Ю. Исследование существующих методов сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей локомотива / М. Ю. Хажеева, Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2024. — № 2. — С. 508–516.
3. Дульский Е. Ю. Эффективная система управления электрокалориферной установкой для сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей / Е. Ю. Дульский, А. И. Романовский, И. А. Ролле и др. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — Иркутск, 2019. — № 4(64). — С. 80–87.
4. Соболев В. М. Режимы сушки увлажненной изоляции тяговых электродвигателей / В. М. Соболев, В. М. Левитский // Электрическая и тепловозная тяга. — 1975. — № 1. — С. 13–24.
5. Нестеренко А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха / А. В. Нестеренко. — М.: Высшая школа, 1971. — 460 с.
6. Хажеева М. Ю. Разработка автоматизированной системы ресурсосберегающего управления электрокалориферной установкой для сушки изоляции тяговых электрических машин / М. Ю. Хажеева, А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский // Известия Транссиба. ОМГУПС. — Омск, 2021. — № 3(47). — С. 61–68.
7. Патент № 2494517 Российская Федерация, МПК H02K 15/12. Трехцикловой амплитудно-широотно-прерывистый способ сушки изоляции электрических машин / В. В. Сидоров, Е. М. Лыткина, Д. В. Коноваленко и др. — Заявл. 09.12.2011; опубл. 27.09.2013. — Бюл. № 27.
8. Патент № 2815728 Российская Федерация, МПК H02K 15/12. Трехцикловой способ сушки увлажненной изоляции электрических машин / А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский, П. Ю. Иванов и др. — Заявл. 14.12.2022; опубл. 21.03.2024. — Бюл. № 9.
9. Коноваленко Д. В. Рациональные режимы сушки увлажненной изоляции обмоток тяговых электрических машин: специальность 05.22.07 «Рациональные режимы сушки увлажненной изоляции обмоток тяговых электрических машин»: дисс. ... канд. техн. наук / Д. В. Коноваленко; Иркутский гос. ун-т путей сообщения. — Иркутск, 2007. — 193 с.

Дата поступления: 24.10.2024

Решение о публикации: 12.12.2024

Контактная информация:

ХАЖЕЕВА Марина Юрьевна — аспирант; m.hkazheeva@mail.ru

ДУЛЬСКИЙ Евгений Юрьевич — д-р техн. наук, доц.; e.dulskiy@mail.ru

ИВАНОВ Владимир Николаевич — канд. техн. наук; v.n.ivanov40161@yandex.ru

КРУЧЕК Виктор Александрович — д-р техн. наук, проф.; victor.kruchek@yandex.ru

Investigating Drying Modes of the Traction Motor Moistened Insulation on Locomotives from the Perspective of Energy Efficiency

M. Yu. Khazheeva¹, E. Yu. Dulskiy¹, V. N. Ivanov¹, V. A. Kruchek²

¹Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskogo Str., Irkutsk, 190029, Russian Federation

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Khazheeva M. Yu., Dulskiy E. Yu., Ivanov V. N., Kruchek V. A. Investigating Drying Modes of the Traction Motor Moistened Insulation on Locomotives from the Perspective of Energy Efficiency. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 1, pp. 7–17. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-7-17

Summary

Purpose: This paper dwells upon the current problems of improving locomotive traction engine reliability in mountainous terrain and extreme weather conditions. Extremely negative temperatures have a great impact on the insulation of the power equipment during the operation of the rolling stock. The technological process of drying includes changing the cycle duration and operation periods of heating elements over time in each subsequent cycle. **Methods:** Comparing the power supply modes in the process of drying the traction motor moistened insulation by selecting a special unit control. Using the available equations to construct a heating and cooling curve during the drying process. **Results:** On comparing the power supply modes, a combined method for regulating drying of moistened insulation is proposed. The results obtained make it possible to produce high-quality drying of moistened insulation based on the actual degree of the material moisture content. The graphs of heating unit and fan power dependence on drying time have been built for each power supply mode under consideration. They show how the indicators of heating curves of insulation and energy consumption change. **Practical significance:** The results obtained demonstrate the necessity of using a three-cycle method of drying the moistened insulation based on the actual moisture content of the equipment insulation. This method of energy supply can solve an urgent problem of improving the quality of the dried equipment, reducing energy costs and increasing the equipment durability.

Keywords: Insulation drying, electric calorifire method, insulation drying modes, variable power supply, degree of moisture, traction motor reliability.

References

1. Maslov V. V. *Vlagostoykost' elektricheskoy izolyatsii* [Moisture resistance of electrical insulation]. Moscow: Energiya Publ., 1973, 208 p. (In Russian)
2. Khazheeva M. Yu., Dulsky E. Yu., Ivanov P. Yu. et al. Issledovanie sushchestvuyushchih metodov sushki uvlazhnennoj izolyatsii tyagovyh elektrodvigately lokomotiva [Investigation of existing methods of drying humidified insulation of traction electric motors of a locomotive]. *Izvestiya*

Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of the St. Petersburg University of Railway Engineering]. 2024, Iss. 2, pp. 508–516. (In Russian)

3. Dul'skiy E. Yu., Romanovskiy A. I., Rolle I. A. et al. Effektivnaya sistema upravleniya elektrokalfornoy ustanovkoj dlya sushki uvlazhnennoj izolyacii tyagovykh elektrodvigatelej [An effective control system for an electric heating system for drying humidified insulation of traction motors]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2019, Iss. 4(64), pp. 80–87. (In Russian)

4. Sobolev V. M., Levitskiy V. M. Rezhimy sushki uvlazhnennoj izolyacii tyagovykh elektrodvigatelej [Drying modes of wetted insulation of traction electric motors]. *Elektricheskaya i teplovoznaya tyaga* [Electric and diesel locomotive traction]. 1975, Iss. 1, pp. 13–24. (In Russian)

5. Nesterenko A. V. *Osnovy termodinamicheskikh raschetov ventilyacii i kondicionirovaniya vozduha* [Fundamentals of thermodynamic calculations of ventilation and air conditioning]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1971, 460 p. (In Russian)

6. Khazheeva M. Yu., Khudonogov A. M., Dul'skiy E. Yu. et al. Razrabotka avtomatizirovannoj sistemy resursosberegayushchego upravleniya elektrokalfornoy ustanovkoj dlya sushki izolyacii tyagovykh elektricheskikh mashin [Development of an automated system for resource-saving control of an electric heater unit for drying the insulation of traction electric machines]. *Izvestiya Transsiba. OMGUPS* [Transsib News. Omsk State University of Railways]. Omsk, 2021, Iss. 3(47), pp. 61–68. (In Russian)

7. Sidorov V. V., Lytkina E. M., Konovalenko D. V. et al. *Trekhtsiklovoy amplitudno-shirotno-preryvistyy sposob sushki izolyatsii elektricheskikh mashin* [Three-cycle amplitude-width-intermittent method of drying insulation of electric machines]. Patent RF, no. 2494517, 2013. (In Russian)

8. Khudonogov A. M., Dul'skiy E. Y., Ivanov P. Y. et al. *Trekhtsiklovoy sposob sushki uvlazhnennoj izolyatsii elektricheskikh mashin* [Three-cycle drying method for humidified insulation of electric machines]. Patent RF, no. 2815728. (In Russian)

9. Konovalenko D. V. *Ratsional'nye rezhimy sushki uvlazhnennoj izolyatsii obmotok tyagovykh elektricheskikh mashin: spetsial'nost' 05.22.07 "Ratsional'nye rezhimy sushki uvlazhnennoj izolyatsii obmotok tyagovykh elektricheskikh mashin": diss. ... kand. tekhn. nauk* [Rational modes of drying wet insulation of windings of traction electric machines: specialty 05.22.07 "Rational modes of drying wet insulation of windings of traction electric machines": diss. ... Cand. of Engineering Sciences]. Irkutsk, 2007, 193 p. (In Russian).

Received: October 24, 2024

Accepted: December 12, 2024

Author's information:

Marina Yu. KHAZHEEVA — Postgraduate Student; m.hkazheeva@mail.ru

Evgeniy Yu. DULSKIY — Dr. Sci. in Engineering, Associate Professor; e.dulskiy@mail.ru

Vladimir N. IVANOV — PhD in Engineering, Associate Professor; v.n.ivanov40161@yandex.ru

Victor A. KRUCHEK — Dr. Sci. in Engineering, Professor; victor.kruchek@yandex.ru