

В. С. Томилов, Т. В. Волчек

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОВОЗОВ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ЗА СЧЕТ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ФАЗОВЫМ СООТНОШЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩИХ СИЛ
В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ**

Аннотация. Статья посвящена повышению энергетической эффективности и надежности коллекторных тяговых электродвигателей электровозов переменного тока путем применения адаптивного управления резистором постоянной шунтировки обмотки возбуждения. Показано, что пульсации выпрямленного напряжения в цепи возбуждения приводят к возникновению трансформаторной ЭДС, которая при фиксированном значении сопротивления шунта обеспечивает благоприятное фазовое соотношение ЭДС лишь в узкой области режимов вблизи номинального тока якоря. При отклонении от номинального режима условия коммутации нарушаются, возникает интенсивное искрение и увеличиваются потери в щеточных контактах.

Предложено решение, основанное на использовании управляемого электронного ключа в цепи резистора шунтировки, позволяющее адаптировать эквивалентное сопротивление шунтирующей ветви в зависимости от тока якоря. Расчетные оценки показывают, что при внедрении адаптивного управления потери в щеточном узле снижаются на 25–35 %, а общие потери в тяговом электродвигателе – на 4 %.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, тяговый электрический двигатель, коммутационная устойчивость, управляемый электронный ключ, искрение, круговой огонь.

Для цитирования: Томилов, В. С. Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока за счет адаптивного управления фазовым соотношением электродвижущих сил в тяговом электродвигателе / В. С. Томилов, Т. В. Волчек // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 135–142. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_135.

Введение

Железнодорожный транспорт остается одним из ключевых потребителей топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в транспортном комплексе. На его долю приходится около 1 % мирового энергопотребления и свыше 2 % энергии, расходуемой транспортным сектором. При этом в структуре затрат ОАО «РЖД» значительную часть занимают именно ТЭР на тягу поездов: по различным оценкам, до 80 % совокупного потребления ТЭР железными дорогами связано с обеспечением тяги. В условиях роста цен на энергоресурсы и жестких экологических требований вопросы повышения энергетической эффективности тяги поездов приобретают первостепенное значение [1].

Существенный вклад в энергопотребление железных дорог России вносят электровозы переменного тока с коллекторными тяговыми электродвигателями, оснащенные выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП). Несмотря на широкое внедрение рекуперативного торможения и современных схем управления, значительная часть эксплуатируемого парка электровозов переменного тока не соответствует актуальным требованиям по энергетическим показателям, регламентируемым действующими стандартами. Это проявляется в повышенном удельном расходе электроэнергии на тягу поездов и необходимости поиска внутренних резервов энергосбережения на уровне силового оборудования электровоза [2].

Одним из ключевых элементов, определяющих энергетические показатели электровоза, является тяговый электродвигатель (ТЭД). Для электровозов переменного тока, оборудованных коллекторными ТЭД пульсирующего тока, характерен сложный состав потерь мощности, включающий электрические, магнитные, механические и добавочные составляющие. Особое место среди них занимают потери в щеточных контактах, обусловленные как падением напряжения на контакте «щетка – коллектор», так и дополнительными потерями при искрении.

Практика эксплуатации показывает, что скользящий контакт «щетка – коллектор» является одним из наиболее уязвимых узлов коллекторных тяговых двигателей. Более 50 % отказов силового оборудования электровозов приходится на ТЭД, при этом свыше 40 % обусловлены именно перебросом

электрической дуги и возникновением искрения [3]. Это отражается не только на надежности и ремонтопригодности, но и на энергетической эффективности, поскольку ухудшение состояния контакта сопровождается ростом потерь мощности и снижением КПД тягового привода. Важнейшим следствием развития интенсивного искрения в этом узле является переход к режиму кругового огня по коллектору, сопровождающийся локальным перегревом, подгаром пластин и разрушением контактной поверхности. На рис. 1 приведен пример последствий воздействия кругового огня на коллекторно-щеточный узел тягового электродвигателя.



Рис. 1. Последствия действия кругового огня по коллектору тягового электродвигателя

Таким образом, искрение в контакте «щетка – коллектор» необходимо рассматривать не только как источник дополнительных электрических потерь и снижения энергетической эффективности, но и как фактор, непосредственно ограничивающий надежность и ресурс тяговых электродвигателей.

В научной литературе накоплен значительный опыт по повышению энергоэффективности электровозов переменного тока за счет совершенствования силовых преобразователей, режимов рекуперативного торможения, систем компенсации реактивной мощности и модернизации многодвигательных тяговых приводов. В то же время вопросы количественной оценки вклада потерь в щеточном узле коллекторных ТЭД в общий баланс потерь электровоза и влияние искрения на энергетическую эффективность освещены недостаточно полно [4, 5].

В связи с этим актуальной представляется задача анализа структуры потерь в тяговом электродвигателе электровоза переменного тока с выделением потерь в щеточных контактах, а также уточнения влияния искрения на величину этих потерь и, как следствие, на энергетическую эффективность локомотива.

Потери мощности в тяговом электродвигателе электровоза переменного тока

Энергетическую эффективность тягового электродвигателя целесообразно характеризовать коэффициентом полезного действия, определяемым отношением полезной механической мощности на валу к подведенной электрической мощности

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}, \quad (1)$$

где P_1 – подведенная к двигателю электрическая мощность, Вт; ΔP – суммарные потери мощности в электродвигателе, Вт.

Суммарные потери мощности ΔP представляют собой сумму ряда составляющих

$$\Delta P = \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}, \quad (2)$$

где $\Delta P_{\text{эл}}$ – электрические потери в меди обмоток якоря и возбуждения, Вт; $\Delta P_{\text{щ}}$ – потери в щеточных контактах, Вт; $\Delta P_{\text{маг}}$ – магнитные потери в стали магнитопровода, Вт; $\Delta P_{\text{мех}}$ – механические потери (на трение и вентиляцию), Вт; $\Delta P_{\text{доб}}$ – добавочные (дополнительные) потери, Вт.

Такое разложение позволяет перейти от интегральной оценки КПД двигателя к анализу отдельных механизмов потерь и выявлению наиболее существенных составляющих в эксплуатационных режимах электровоза переменного тока.

Для магистральных грузовых электровозов, эксплуатируемых на сети ОАО «РЖД», характерны высокие значения токов якоря и сложные режимы работы тяговых двигателей, что приводит к значительной доле переменных по нагрузке потерь, зависящих от тока и частоты коммутации.

Электрические потери $\Delta P_{эл}$ традиционно рассматриваются как основная нагрузочная составляющая потеря, поскольку они прямо пропорциональны квадрату тока якоря и определяются сопротивлениями обмоток. На ТЭД электровозов переменного тока, питаемых от выпрямительно-инверторных преобразователей, дополнительное влияние оказывают высшие гармоники тока, приводящие к росту эквивалентных потерь в меди и стали.

Магнитные потери $\Delta P_{маг}$ зависят главным образом от конструкции магнитопровода и уровня магнитной индукции в зубцовой и спинковой зонах. В условиях пульсирующего питания они могут возрастать за счет увеличения удельных потерь на перемагничивание и вихревые токи в стали.

Механические потери $\Delta P_{мех}$ связаны с трением в подшипниковых опорах, трением щеток о коллектор, а также с вентиляционными потерями. Часть механических потерь непосредственно связана с работой коллекторно-щеточного узла (КЩУ), но в энергетическом балансе их обычно отделяют от чисто электрических потерь в контакте.

Добавочные потери $\Delta P_{доб}$ включают в себя коммутационные потери в меди обмотки якоря от действия главного и реактивного пазовых полей, а также увеличение потерь в стали от искажения магнитного поля машины при нагрузке. В обобщенном виде их можно представить в виде зависимости от тока якоря

$$\Delta P_{доб} = \alpha \times I_{я}^2 + \beta \times (I_{я} - I_{кр})^2 \times S_{искр}, \quad (3)$$

где $I_{я}$ – ток якоря, А; α, β – эмпирические коэффициенты; $I_{кр}$ – характерный ток (ток критического режима коммутации), А; $S_{искр}$ – показатель, связанный с интенсивностью искрения.

Из данного выражения видно, что часть добавочных потерь тесно связана с качеством коммутации и наличием искрения под щетками, что создает методологическую связь между добавочными потерями и потерями в щеточных контактах.

В классическом подходе потери в щеточных контактах $\Delta P_{щ}$ относятся к электрическим потерям, поскольку обусловлены падением напряжения на контакте при протекании тока якоря. Однако для тяговых электродвигателей электровозов переменного тока, работающих при больших токах и в тяжелых коммутационных условиях, вклад этих потерь в общий баланс мощности может быть существенно недооценен.

Во-первых, щеточный контакт работает в условиях одновременного действия механических и электрических факторов – давление щетки, скорость скольжения, состояние поверхности коллектора, наличие политуры, воздействие вибраций и температурных градиентов. Во-вторых, при развитии искрения под щетками происходит резкий рост эквивалентного сопротивления контакта и, как следствие, увеличение падения напряжения и потерь мощности.

Таким образом, для корректной оценки энергетической эффективности тягового привода электровоза переменного тока представляется целесообразным рассматривать $\Delta P_{щ}$ как отдельную составляющую, функционально связанную с надежностью и состоянием коллекторно-щеточного узла.

Потери мощности в тяговом электродвигателе электровоза переменного тока

Потери мощности в щеточных контактах в установившемся режиме тяги определяются как

$$\Delta P_{щ} = I_{я} \times \Delta U_{щ,искр}, \quad (4)$$

где $I_{я}$ – ток якоря, А; $\Delta U_{щ,искр}$ – падение напряжения на щетке с учетом возможного искрения, В.

В отсутствие заметного искрения падение напряжения на щетке $\Delta U_{щ}$ для тяговых электродвигателей с угольными щетками составляет, как правило, порядка 1,5–2,5 В, что соответствует требованиям ГОСТ 2582–2013 на испытания ТЭД. При этом потери в щеточном контакте относятся к электрическим потерям и вносят вклад, пропорциональный току якоря.

С точки зрения энергетического баланса электровоза даже относительно небольшое падение напряжения на щетках приводит к заметным суммарным потерям, учитывая высокие значения токов якоря и большое количество ТЭД в составе локомотива. Поэтому стабилизация и снижение $\Delta U_{щ}$ за

счет оптимизации конструкции щеток и условий работы КЩУ является одним из значимых, хотя и локальных резервов повышения энергоэффективности.

При нарушении нормальных условий работы КЩУ возникает местное искрение под щетками и/или по поверхности коллектора. Скользящий контакт становится нестабильным, фактическая площадь токопроводящего контакта уменьшается, а часть тока протекает через дуговой разряд в воздушном промежутке.

С энергетической точки зрения это эквивалентно росту эквивалентного сопротивления контакта и дополнительному падению напряжения, связанному с наличием дугового разряда. В упрощенной форме влияние искрения на падение напряжения на щетках можно описать линейной зависимостью

$$\Delta U_{\text{щ.искр}} = \Delta U_{\text{щ}} + k_{\text{искр}} \times I_{\text{я}}, \quad (5)$$

где $\Delta U_{\text{щ}}$ – номинальное падение напряжения на щетке без искрения (обычно 1,5–2,5 В), В; $k_{\text{искр}}$ – эмпирический коэффициент, учитывающий рост потерь из-за искрения (порядка 0,001–0,005 В/А), В/А.

Коэффициент $k_{\text{искр}}$ отражает вклад дополнительного сопротивления дуги и нарушения сплошности контакта. Его значение зависит от типа ТЭД, конструкции и материала щеток, состояния коллектора и режима работы. По оценкам, полученным для тяговых двигателей с номинальным током порядка $I_{\text{я}} = 870$ А и падением напряжения на щетке $\Delta U_{\text{щ}} \approx 2$ В, увеличение падения напряжения при развитии искрения может составлять 10–50 % от номинального, т. е. порядка 0,2–1 В. Отсюда для $k_{\text{искр}}$ получается интервал порядка 0,00023–0,00115 В/А, который с учетом возможных пиковых токов и более интенсивного искрения расширяют до диапазона 0,001–0,005 В/А.

Подстановка выражения для $\Delta U_{\text{щ.искр}}$ в формулу потерь в щеточном контакте дает

$$\Delta P_{\text{щ}} = I_{\text{я}} \times \Delta U_{\text{щ}} + k_{\text{искр}} \times I_{\text{я}}^2. \quad (6)$$

Таким образом, помимо линейной по току составляющей (номинальные потери в щеточном контакте), при искрении возникает квадратичная по току составляющая потеря, аналогичная по зависимости от тока джоулевым потерям в меди обмоток. Это принципиально важный момент с точки зрения тяжелых режимов работы ТЭД: при больших токах якоря дополнительная компонента $k_{\text{искр}} \times I_{\text{я}}^2$ может стать сопоставимой по величине с отдельными видами электрических и добавочных потерь.

Для количественной оценки вклада потерь в щеточных контактах в общий баланс потерь тягового электродвигателя был проведен расчет по формулам (1)–(4). Суммарные потери мощности составили $\Delta P \approx 40,45$ кВт. Результаты расчета потерь в щетках $\Delta P_{\text{щ}}$ и их доли в общих потерях двигателя представлены на рис. 2.

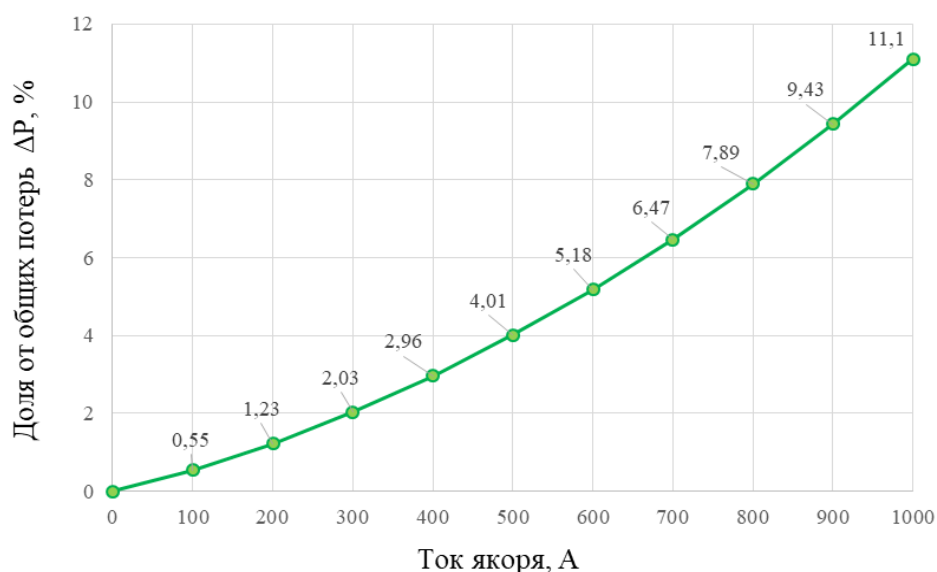


Рис. 2. Доля потери в щетках $\Delta P_{\text{щ}}$ от общих потерь в ТЭД в зависимости от тока якоря

Анализ полученных данных показывает, что при переходе от средних величин тока якоря к номинальным и более нагруженным режимам потери в щеточных контактах возрастают нелинейно и при $I_{\text{я}} = 900$ А превышают 9 % от суммарных потерь двигателя. При токах якоря 1000 А, характерных

для пусковых и более нагруженных режимов при вождении тяжеловесных поездов, доля щеточных потерь достигает 11,1 %, что значительно превышает типичный диапазон 3–8 %, указанный в технической литературе для коллекторных электрических машин. Такой рост обусловлен квадратичной по току составляющей потерь $k_{\text{искр}} \times I_{\text{я}}^2$, которая даже при средних паспортных значениях становится сопоставимой по величине с отдельными видами электрических и добавочных потерь.

Влияние пульсаций магнитного потока на возникновение искрения на коллекторе

Одним из ключевых факторов, вызывающих искрение, является потеря коммутационной устойчивости тяговых электродвигателей [5]. Наиболее актуальна данная проблема для коллекторных двигателей пульсирующего тока, питаемых выпрямленным напряжением. Наличие пульсации выпрямленного напряжения и тока в силовой цепи электровоза приводит к периодическим изменениям тока якоря и напряжения на выводах ТЭД.

Для снижения пульсации тока на электроподвижном составе традиционно применяют сглаживающий реактор. Однако жесткие массогабаритные и конструктивные ограничения не позволяют полностью подавить переменную составляющую тока, в результате чего коэффициент пульсации тока якоря $\Delta I_{\text{я}}$ в реальных условиях эксплуатации достигает 25–30 % [6]. Пульсации тока в цепи возбуждения, в свою очередь, вызывают периодическое изменение магнитного потока тягового электродвигателя и индуцируют в обмотках тягового двигателя трансформаторную электродвижущую силу (ЭДС), которая определяется выражением

$$e_{\text{т}} = -\omega_{\text{с}} \times \frac{d\Phi}{dt}, \quad (7)$$

где $\omega_{\text{с}}$ – число витков обмотки главных полюсов тягового электродвигателя; Φ – магнитный поток; t – время, с.

Рассматривая векторную диаграмму переменных составляющих магнитодвижущей и электродвижущей силы в тяговом электродвигателе, можно сделать вывод о том, что трансформаторная ЭДС, с одной стороны, может способствовать уменьшению дисбаланса между реактивной и коммутирующей ЭДС за счет удачно подобранной фазы и величины трансформаторной ЭДС. С другой стороны, при резких изменениях тока якоря, характерных для пуска и переходных процессов, вследствие того, что в это время производная магнитного потока по времени достигает значительных величин, сформируется наивысшее значение трансформаторной ЭДС большой амплитуды и, если в это время ее фаза окажется неблагоприятной по отношению к реактивной и коммутирующей ЭДС, возникнет искрение под щетками ТЭД [7].

Помимо сглаживающего реактора для снижения пульсаций тока в цепи возбуждения тягового электродвигателя также используется резистор постоянной шунтировки. Снижение пульсаций тока возбуждения достигается за счет того, что активное сопротивление шунтирующего резистора значительно меньше сопротивления обмотки возбуждения и основная переменная составляющая тока отводится в цепь резистора постоянной шунтировки [8–10].

Применяемый на электровозах переменного тока резистор постоянной шунтировки обмотки возбуждения подбирается, как правило, исходя из условий обеспечения удовлетворительной коммутации вблизи номинального режима работы тягового электродвигателя. При этом величина постоянного сопротивления $R_{\text{шш}}$ обеспечивает приемлемое фазовое соотношение трансформаторной ЭДС с реактивной и коммутирующей ЭДС в зоне номинального тока якоря. Однако при существенном отклонении тока от номинального – в режимах трогания с места и разгона, либо при движении на высоких скоростях изменяются углы между векторами ЭДС на векторной диаграмме [8–10]. Это приводит к нарушению оптимальных условий коммутации, росту интенсивности искрения на коллекторе и увеличению вероятности перехода к режиму кругового огня. Таким образом, фиксированное значение сопротивления резистора постоянной шунтировки обеспечивает требуемый эффект компенсации трансформаторной ЭДС лишь в относительно узкой области режимов и не позволяет поддерживать удовлетворительные коммутационные условия во всем эксплуатационном диапазоне токов якоря.

Предлагаемый способ адаптивной компенсации трансформаторной ЭДС

В целях расширения диапазона режимов, в которых достигается эффективная компенсация влияния трансформаторной ЭДС на процесс коммутации, в работе предлагается использовать управляемый электронный ключ в цепи резистора постоянной шунтировки. Схемотехнически такое решение реализуется за счет введения в шунтирующую цепь полупроводникового элемента, позволяющего изменять эквивалентное сопротивление шунта в функции тока якоря (рис. 3).

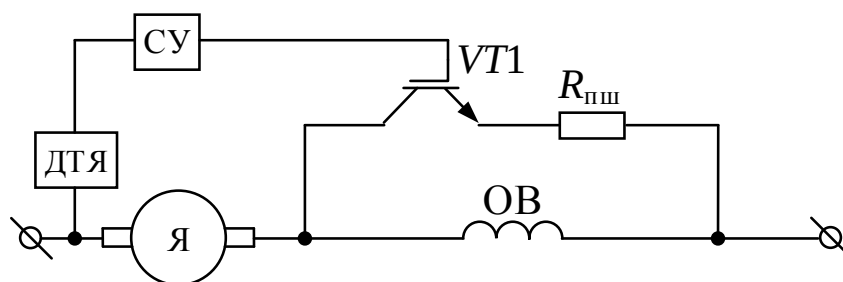


Рис. 3. Упрощенная электрическая принципиальная схема адаптивного электронного ключа в цепи резистора постоянной шунтировки обмотки возбуждения

При этом при токе, близком к номинальному, эквивалентное сопротивление шунтирующей цепи выбирается таким, чтобы обеспечить оптимальное фазовое соотношение трансформаторной, реактивной и коммутационной ЭДС, а при отклонении тока якоря в сторону больших или меньших значений производится корректировка сопротивления шунта, направленная на сохранение удовлетворительных условий коммутации.

Предлагаемое решение позволяет «подстраивать» долю переменной составляющей тока, ответвляющейся в шунтирующую цепь, в зависимости от фактического режима работы тягового электродвигателя. При повышенных токах якоря снижение эквивалентного сопротивления шунтирующей цепи обеспечивает более глубокое шунтирование переменной составляющей тока возбуждения и уменьшение амплитуды трансформаторной ЭДС. В режиме движения с малыми токами, напротив, увеличение эквивалентного сопротивления позволяет избежать избыточного шунтирования и сохранять достаточную жесткость магнитной системы. В результате достигается выравнивание фазовых соотношений между трансформаторной, реактивной и коммутационной ЭДС в широком диапазоне токов якоря, что приводит к снижению интенсивности искрения под щетками, уменьшению вероятности возникновения кругового огня по коллектору и, как следствие, к повышению надежности и энергетической эффективности тяговых электродвигателей.

Проведенный расчет для тягового электродвигателя мощностью 765 кВт показал, что при номинальном токе якоря и повышенных токах, характерных для участков с затяжными подъемами, доля потерь в щеточном узле в штатной схеме составляет 8–10 % от суммарных потерь двигателя (см. рис. 2). Таким образом, щеточные потери в нагруженных режимах становятся сопоставимыми по величине с отдельными составляющими добавочных потерь и оказывают измеримое влияние на общий КПД двигателя. Причина такого роста кроется в нелинейной зависимости потерь в щеточных контактах от тока якоря, при развитии искрения под щетками появляется квадратичная по току составляющая потеря, которая при токах выше номинального дает вклад в потери в щеточном узле примерно в 1,5–2 раза больший, чем в номинальном режиме. Применение адаптивного управления эквивалентным сопротивлением шунтирующей цепи позволяет снизить эту долю до 5–6 %, что соответствует уменьшению потерь в щеточном узле на 25–35 %. Общее снижение потерь в тяговом электродвигателе составляет примерно 4 %, включая сокращение добавочных коммутационных потерь, что эквивалентно приросту КПД около 1 % в нагруженных режимах.

Заключение

1 Анализ показал, что потери в щеточных контактах коллекторных ТЭД при токах якоря 800–900 А достигают 8–10 % от суммарных потерь двигателя, что значительно влияет на энергетическую эффективность электропоездов переменного тока.

2 Трансформаторная ЭДС, возникающая из-за пульсаций магнитного потока в цепи возбуждения, при фиксированном сопротивлении резистора постоянной шунтировки обеспечивает оптимальное фазовое соотношение лишь вблизи номинального режима. При отклонении от номинала коммутация нарушается и риск возникновения искрения возрастает.

3 Применение управляемого электронного ключа в цепи резистора постоянной шунтировки позволяет адаптивно изменять сопротивление шунта в зависимости от тока якоря, поддерживая благоприятные условия коммутации во всем диапазоне режимов.

4 Расчеты показывают снижение потерь в щеточном узле на 25–35 %, общих потерь ТЭД – на 4–5 %, и прирост КПД около 1 % в нагруженных режимах.

5 Улучшение условий коммутации снижает вероятность возникновения режима кругового огня в коллекторе, повышая надежность и продлевая ресурс коллекторно-щеточного узла.

Список литературы

- 1 **Чернышова, Л. И.** Факторный анализ расхода электроэнергии на тягу поездов / Л. И. Чернышова // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2021. – № 11–2. – С. 326–330. – DOI 10.17513/vaael.1954. – URL: <https://vaael.ru/ru/article/view?id=1954> (дата обращения: 15.01.2026).
- 2 **Шрамко, С. Г.** Повышение эффективности эксплуатации электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения / С. Г. Шрамко // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – Вып. 4 (111). – С. 192–199. – DOI 10.21285/1814-3520-2016-4-192-199.
- 3 **Волчек, Т. В.** Совершенствование методов контроля состояния коллекторного тягового электродвигателя при его эксплуатации / Т. В. Волчек, В. С. Томилов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 4 (96). – С. 202–208. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_202.
- 4 **Мустафин, А. Ш.** Повышение энергетической эффективности грузовых электровозов семейства «Ермак» путем модернизации при заводском ремонте / А. Ш. Мустафин // Бюллетень результатов научных исследований. – 2022. – Вып. 2. – С. 75–91. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-2-75-91.
- 5 **Томилов, В. С.** Влияние блока балластных резисторов на КПД электрической цепи электровоза переменного тока / В. С. Томилов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3 (55). – С. 138–144. – DOI 10.20291/2079-0392-2022-3-138-144.
- 6 **Тихменев, Б. Н.** Электровозы переменного тока со статическими преобразователями / Б. Н. Тихменев. – Москва : Транспорт, 1958. – 268 с.
- 7 Разработка методики определения нарушения коммутационной устойчивости коллекторных тяговых электродвигателей / Т. В. Волчек, В. С. Томилов, Л. С. Курманова, Р. В. Волчек // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3 (99). – С. 72–79. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_72.
- 8 **Волчек, Т. В.** Повышение эффективности системы ослабления возбуждения тяговых электродвигателей электровозов переменного тока : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 29.30.00 / Волчек Татьяна Витальевна. – Москва, 2022. – 146 с.
- 9 **Иоффе, А. Б.** Тяговые электрические машины / А. Б. Иоффе. – Москва : Госэнергоиздат, 1967. – 248 с.

References

- 1 **Chernyshova, L. I.** Factor analysis of electric power consumption for train traction / L. I. Chernyshova // Journal of Altai Academy of Economics and Law. – 2021. – No. 11–2. – P. 326–330. – DOI 10.17513/vaael.1954. – URL: <https://vaael.ru/ru/article/view?id=1954> (date of access: 15.01.2026).
- 2 **Shramko, S. G.** Improving the efficiency of operation of AC electric locomotives in the regenerative braking mode / S. G. Shramko // Proceedings of Irkutsk State Technical University. – 2016. – Iss. 4 (111). – P. 192–199.
- 3 **Volchek, T. V.** Improving the methods for monitoring the condition of a collector traction electric motor during its operation / T. V. Volchek, V. S. Tomilov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2024. – No. 4 (96). – P. 202–208. – DOI 10.46973/0201-727X_2024_4_202.
- 4 **Mustafin, A. Sh.** Improving the energy efficiency of freight electric locomotives of the “Ermak” family by modernizing them during factory repairs / A. Sh. Mustafin // Bulletin of Scientific Research Results. – 2022. – Iss. 2. – P. 75–91. – DOI 10.20295/2223-9987-2022-2-75-91.
- 5 **Tomilov, V. S.** Influence of the ballast resistor block on the efficiency of the electric circuit of an AC electric locomotive / V. S. Tomilov // Herald of The Ural state university of railway transport. – 2022. – No. 3 (55). – P. 138–144. – DOI 10.20291/2079-0392-2022-3-138-144.
- 6 **Tikhmenev, B. N.** Electric locomotives of alternating current with static converters / B. N. Tikhmenev. – Moscow : Transport, 1958. – 268 p.
- 7 Development of a methodology for determining the violation of the switching stability of collector traction electric motors / T. V. Volchek, V. S. Tomilov, L. S. Kurmanova, R. V. Volchek // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 3 (99). – P. 72–79. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_72.
- 8 **Volchek, T. V.** Improving the efficiency of the excitation attenuation system of traction electric motors of AC electric locomotives : dissertation for the degree of candidate of technical sciences : 29.30.00 / Volchek Tatyana Vitalievna. – Moscow, 2022. – 146 p.
- 9 **Ioffe, A. B.** Traction electric machines / A. B. Ioffe. – Moscow : Gosenergoizdat, 1967. – 248 p.

10 Магистральные электровозы. Электрические машины и трансформаторное оборудование электровозов. / В. И. Бочаров, П. А. Золотарев, М. А. Козорезов [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1968. – 444 с.

10 Mainline electric locomotives. Electrical machines and transformer equipment of electric locomotives / V. I. Bocharov, P. A. Zolotarev, M. A. Kozorezov [et al.]. – Moscow : Mashinostroenie, 1968. – 444 p.

V. S. Tomilov, T. V. Volchek

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF AC ELECTRIC LOCOMOTIVES THROUGH ADAPTIVE CONTROL OF THE PHASE RELATIONSHIP OF ELECTRIC MOTOR FORCES IN THE TRACTION MOTOR

Abstract. This article explores improving the energy efficiency and reliability of commutator traction motors of AC electric locomotives by using adaptive control of the excitation winding's fixed shunt resistor. It is shown that rectified voltage pulsations in the excitation circuit generate a transformer EMF, which, with a fixed shunt resistance, provides a favorable EMF phase relationship only in a narrow range of operating conditions near the rated armature current. When deviating from the rated conditions, commutation conditions are disrupted, intense sparking occurs, and brush contact losses increase.

A solution is proposed based on the use of a controlled electronic switch in the shunt resistor circuit, allowing the equivalent resistance of the shunt branch to be adapted depending on the armature current. Estimates show that implementing adaptive control reduces brush losses by 15–20%, and overall traction motor losses by 4%.

Keywords: energy efficiency, traction motor, switching stability, controlled electronic switch, sparking, circular fire.

For citation: Tomilov, V. S. Increasing the energy efficiency of AC electric locomotives through adaptive control of the phase relationship of electric motor forces in the traction motor / V. S. Tomilov, T. V. Volchek // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 135–142. – DOI 10.46973/0201–727X_2026_1_135.

Сведения об авторах

Томилов Вячеслав Станиславович

Красноярский институт
железнодорожного транспорта –
филиал Иркутского государственного
университета путей сообщения
(КрИЖТ ИрГУПС),
кафедра «Эксплуатация железных дорог»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: vyach.tomiloff@yandex.ru

Волчек Татьяна Витальевна

Красноярский институт
железнодорожного транспорта –
филиал Иркутского государственного
университета путей сообщения
(КрИЖТ ИрГУПС),
кафедра «Эксплуатация железных дорог»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: tanya.vol4eck@yandex.ru

Information about the authors

Tomilov Vyacheslav Stanislavovich

Krasnoyarsk Institute of Railway
Transport,
Branch of the Irkutsk State Transport
University,
Chair “Railway Operation”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: vyach.tomiloff@yandex.ru

Volchek Tatyana Vitalievna

Krasnoyarsk Institute of Railway
Transport,
Branch of the Irkutsk State Transport
University (KrIRT IrSTU),
Chair “Railway Operation”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: tanya.vol4eck@yandex.ru