

7. Optimization of the method of oxide coating of metallic iron powder particles / U. Berdiyev, O. Demedenko, M. Ashurov [et al.] // E3S Web Conf. – 2023. – Vol. 383. – P. 04039. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/20/e3sconf_tt21c2023_04039/e3sconf_tt21c2023_04039.html (дата обращения 13.04.2025).

8. The influence of production conditions on the electrophysical parameters of piezoceramics for different applications / A. P. Akhmedov, A., G. K. Sauchuk, N. P. Yurkevich [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 264. – P. 04020. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/40/e3sconf_conmechhydro2021_04020/e3sconf_conmechhydro2021_04020.html (дата обращения 15.05.2025).

9. Магнитокалорический эффект в соединениях $GdMn1-xTxSi$ ($T = Ti, Fe, Co$) / С. А. Никитин, Ю. А. Овченкова, М. Е. Блинова [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2022. – № 4. – С. 47–53.

10. Soft magnetic materials for electric machine construction / U. T. Berdiyev, A. K. Vetcher, F. F. Hasanov [et al.] // AIP Conf. Proc. – 2023. – Vol. 2612 (1). – P. 050014. – URL: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-abstract/2612/1/050014/2879774/Soft-magnetic-materials-for-electric-machine?redirectedFrom=fulltext> (дата обращения 10.04.2025).

УДК 629.423.31

Рациональный алгоритм снижения потерь мощности в тяговом асинхронном приводе магистральных локомотивов

Иксар Е. В., Каюмов С. Н.

Ташкентский государственный транспортный университет
Ташкент, Республика Узбекистан

В статье рассматриваются вопросы улучшения тягово-энергетических показателей магистральных локомотивов за счет более полного использования возможностей гибкого микропроцессорного управления и рационального алгоритма, обеспечивающего снижение электрических потерь в тяговом асинхронном приводе во всем диапазоне рабочей мощности.

К основным тягово-энергетическим показателям локомотивов, наряду с силой тяги в продолжительном режиме и сцепной массой относятся такие важные параметры, как осевая мощность и потери энергии во всем диапазоне скоростей и нагрузок [1–3]. На основании опыта промышленно разви-

тых стран и исследований, можно сделать вывод, что наиболее предпочтительным для перспективных локомотивов является привод с использованием тяговых асинхронных двигателей (ТАД). Данный тип двигателей позволяет наиболее полно использовать сцепную массу локомотива по сравнению с коллекторными тяговыми двигателями [4–6]. За счет отсутствия коллектора обеспечивает возможность увеличения активной длины ротора и высокую надежность, что дает возможность реализовать повышенную осевую мощность. Улучшение показателей тягового электропривода возможно при условии создания системы автоматического регулирования тягового электропривода, обеспечивающего реализацию всех тяговых и энергетических характеристик локомотива, достижимых за счет применения прогрессивных тяговых электрических двигателей (ТЭД) трехфазного тока. Немаловажным является возможная разработка использования, в частности для автотр поездов [7], а также высокотехнологичных современных материалов [8] для улучшения характеристик энергообеспечения.

В каждой зоне тяговой характеристики к тяговому электроприводу предъявляются разные требования. В первой необходимо поддержанием максимально возможного момента по условиям сцепления, которые постоянно меняются в зависимости от различных факторов, как внешних, так и внутренних. Суммарное время работы в этой зоне не велико по сравнению со второй зоной. Главным же показателем эффективности работы в этой зоне является быстрота управления $M_{эм}$ ТЭД в зависимости от изменения условий сцепления. Основным критерием работы тягового привода локомотива в первой зоне является поддержания постоянства момента и повышенная жесткость характеристик тяговых двигателей. Для набора скорости в локомотивах со ступенчатым регулированием напряжения, подаваемого на ТЭД, машинист постепенно переводит рукоятку контроллера (выполняет переходы с одной позиции на другую), при этом момент перевода рукоятки в новую позицию машинист выбирает таким образом, чтобы не допустить значительного скачка тока и силы тяги, а также превышения некоторой предельной величины $f_{к. max}$. В каждой зоне тяговой характеристики. К тяговому электроприводу предъявляются разные требования. В первой зоне, необходимо поддержание максимально возможного момента по условиям сцепления, которые постоянно меняются в зависимости от различных факторов, как внешних, так и внутренних. Тяговая характеристика с возможными ограничениями силы тяги выглядит следующим образом (на примере электровоза переменного тока) (рис. 1). Для определенной позиции контроллера (схемы соединения ТЭД, ступени напряжения трансформатора, ступени ослабления магнитного поля) задаются несколькими значениями тока двигателя от минимального значения $I_{д. min}$ до максимального $I_{д. max}$. по электро-

механической характеристике для данной позиции и каждого заданного значения тока $I_{д. i}$ определяют скорость движения V_i и касательную силу тяги, развиваемую одним двигателем $f_{кд. i}$. Определенные значения $f_{кд. i}$ умножают на количество ТЭД локомотива n и получают значения касательной силы тяги, развиваемой локомотивом $f_{к. i}$. Полученный набор значений ($f_{к. i}, V_i$) наносят на тяговую характеристику и соединяют плавной кривой. Аналогичным образом строят зависимость $f_{к. i}(V_i)$ для остальных позиций. На тяговую характеристику наносят значения силы тяги по условиям сцепления колес с рельсами, а также наносят ограничение силы тяги по току коммутации (пусковому току $I_{дп}$). Наибольший допустимый (максимальный) ток по коммутации при номинальном напряжении – ток, который при стендовых испытаниях не вызывает опасного для работы электродвигателя искрения под щетками [3]. В соответствии с ГОСТ 2582-81 установлен наибольший ток по коммутации для тяговых двигателей, равный их двойному часовому току. В эксплуатационных условиях наибольший ток по коммутации понижают до $(1,3-1,5) I_{дч}$ в связи с более тяжелыми условиями работы электродвигателей по сравнению с работой на стенде вследствие динамических воздействий, колебаний напряжения сети, повышенной влажности воздуха.

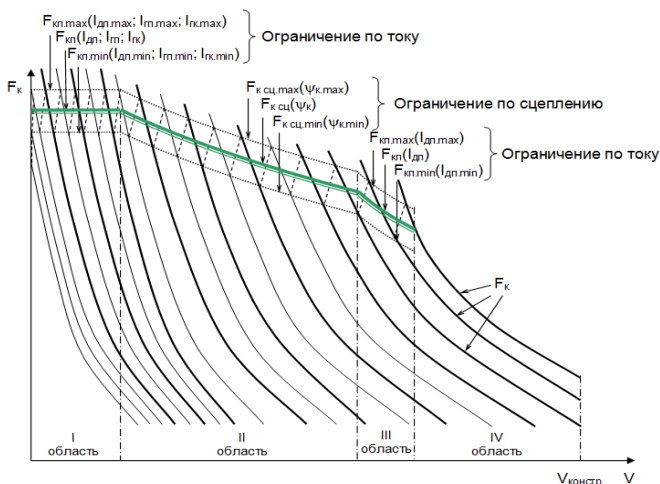


Рис. 1. Обобщенный вид тяговой характеристики:

- пусковые (маневровые и переходные) позиции;
- ходовые позиции;
- переходы между позициями;
- — рекомендуемые границы области переходов;
- средняя линия области переходов;
- границы областей ограничений

Благодаря индуктивности ТЭД скачки тока сглаживаются, а скорость движения успевает измениться, что находит свое отражение в наклоне линий переходов. Превышение величины $f_{к. max}$ может привести к нежелательным последствиям в работе тяговых машин или буксованию. Для упрощения выполнения тяговых расчетов в *i-iii* областях берут не фактические значения силы тяги, а значения по некоторой усредненной ограничивающей (фиктивной) линии, которая на рисунке отображена зеленым цветом. В тоже время в наиболее развитых программах тяговых расчетов для моделирования движения в режиме регулировочной тяги используются характеристики ходовых позиций, лежащих ниже этой ограничивающей линии.

Для всех локомотивов сила тяги не должна превышать предельного значения, установленного по прочности автосцепок. Для предупреждения разрыва поездов наибольшая суммарная сила тяги локомотивов, находящихся в голове поезда, при трогании поезда с места определяется исходя из максимально допустимого продольного усилия на автосцепке, равного 950 кН, а наибольшая суммарная сила тяги при разгоне и движении по труднейшему подъему, определяется исходя из максимально допустимого продольного усилия на автосцепке, равного 1300 кН.

Для локомотивов с тяговыми асинхронными двигателями (ТАД) и статическими преобразователями наиболее благоприятным является режим работы при условии максимума кпд ТАД. Одной из особенностей асинхронной электрической машины является отсутствие явно выраженных магнито и моментобразующих токов (как, например, у двигателя постоянного тока с независимым возбуждением) – обе эти функции выполняет ток статора.

Существует несколько способов регулирования скорости ТАД: 1) с заданным напряжением статора и постоянным абсолютным скольжением ротора; 2) ТАД с заданным главным потокосцеплением; 3) ТАД с заданным потокосцеплением статора. Заданный момент нагрузки двигателя реализуется магнитным потоком и активной составляющей тока ротора, от соотношения которых зависит значение электрических потерь мощности в асинхронном двигателе. Существует такое соотношение между магнитным потоком и током ротора, когда ток статора становится минимальным при неизменном моменте нагрузки. Для обеспечения этого условия необходимо при каждом значении момента нагрузки подбирать соответствующие величины магнитного потока и частоты тока ротора в зависимости от насыщения стали двигателя. Отклонение частоты тока ротора в сторону меньших значений приводит к увеличению электрических потерь мощности в асинхронном двигателе, а отклонение в большую сторону к увеличению тока статора из-за возрастания тока ротора при малых значениях магнитного потока, что так же ведет к увеличению электрических потерь.

Для сохранения минимума электрических потерь мощности в широком диапазоне значений момента нагрузки необходимо по мере возрастания нагрузки двигателя увеличивать ток ротора и магнитный поток. Для локомотивов с асинхронными тяговыми двигателями и статическими преобразователями частоты наиболее благоприятным является режим работы при условии максимума КПД асинхронного двигателя. Известно, что заданный момент нагрузки двигателя реализуется магнитным потоком и активной составляющей тока ротора, от соотношения которых зависит значение электрических потерь мощности в асинхронном двигателе. Существует такое соотношение между магнитным потоком и током ротора, когда ток статора становится минимальным при неизменном моменте нагрузки. Для обеспечения этого условия необходимо при каждом значении момента нагрузки подбирать соответствующие величины магнитного потока и частоты тока ротора в зависимости от насыщения стали двигателя. Отклонение частоты тока ротора в сторону меньших значений приводит к увеличению электрических потерь мощности в асинхронном двигателе, а отклонение в большую сторону – к увеличению тока статора из-за возрастания тока ротора при малых значениях магнитного потока, что так же ведет к увеличению электрических потерь. Для сохранения минимума электрических потерь мощности в широком диапазоне значений момента нагрузки необходимо по мере возрастания нагрузки двигателя увеличивать ток ротора и магнитный поток. Для определения минимума электрических потерь мощности при заданной частоте и варьировании значения U и ω , предлагается использовать с алгоритм расчета, приведенный на рис. 2. Исходными данными для расчета являются заданная мощность $P_{эм}$, действительная частота вращения ω_M . По этим параметрам определяется требуемый момент асинхронного двигателя. В тех случаях, когда есть возможность выбрать режим работы локомотива, необходимо учесть его КПД или использовать предлагаемую систему управления, позволяющую снизить потери при работе на частичных мощностях, так как локомотив работает на частичных нагрузках. Тяговый двигатель рассчитывается на минимум электрических потерь для значений мощности близких к номинальной, при этом с уменьшением мощности КПД двигателя резко снижается, так как увеличивается относительное значение электрических потерь мощности. Если момент больше чем ограничение, то сигнал поступает в систему векторного управления. Если же момент меньше или равен ограничению, то сигнал по заданному моменту поступает в систему управления по минимуму электрических потерь. Первая – зона поддержания постоянного максимального момента $M_{эм} = \text{const}$, она используется для пуска в непродолжительных режимах. Вторая зона накладывает ограничение по реализуемой мощности $P_{эм} = \text{const}$. В этой зоне располагается точка, соответствующая движению с расчетной R ($V_{расч} F_{расч}$) скоростью,

ограничивающей минимальную скорость движения в длительном режиме при заданной мощности. В каждой зоне тяговой характеристики к тяговому электроприводу предъявляются разные требования. В первой – необходимо поддержание максимально возможного момента по условиям сцепления, которые постоянно меняются в зависимости от различных факторов как внешних, так и внутренних. Суммарное время работы в первой зоне не велико по сравнению со второй зоной. Главным же показателем эффективности работы в этой зоне является быстрота управления $M_{эм}$ ТАД в зависимости от изменения условий сцепления. Основным критерием работы тягового привода локомотива в первой зоне является повышенная жесткость характеристик тяговых двигателей. В отличие от первой вторая зона удалена от кривой ограничения. Поэтому здесь не требуется высокой жесткости характеристик как при работе на ограничении по сцеплению. Тягово-энергетические характеристики в этой зоне оказывают существенное влияние на расход энергии. Поэтому при работе на гиперболической характеристике наиболее целесообразно использовать принцип управления по минимуму электрических потерь мощности в системе инвертор – двигатель. Статорные и роторные переменные в системе координат $(d-q)$ представлены их амплитудными значениями и не содержат гармонических составляющих. Если вектор потокосцепления ротора ориентировать по оси d , то проекция вектора, т. е. частота тока ротора при заданном потокосцеплении, определяет электромагнитный момент асинхронного двигателя.

Исходными данными для расчета являются заданная мощность $P_{эм}$, действительная частота вращения ω_m . По этим параметрам определяется требуемый момент асинхронного двигателя:

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_m}.$$

Затем он сравнивается с заданным ограничением. Если момент больше чем ограничение, то сигнал поступает в систему векторного управления. Если же момент меньше или равен ограничению, то сигнал по заданному моменту поступает в систему управления по минимуму электрических потерь. По данным датчиков тока фаз статора определяется частота тока статора тока ротора, которая необходимо для определения магнитного потока. Полученные данные поступают в блок минимума потерь мощности. Система преобразования энергии моделируется методами теории цепей.

При питании от сети переменного тока эта система состоит из тягового трансформатора, входных $4q$ -S-преобразователей, звена постоянного тока, автономных инверторов напряжения. Дифференциально-алгебраические

уравнения процессов в силовых цепях основаны на законах Кирхгоффа. Они формируются в следующем виде:

$$f(X_{n+1}, X_n, t_{n+1}) = 0. \quad (1)$$

Решение уравнений (1) выполняется при помощи формулы численного дифференцирования;

$$h(X_{n+1}) = X_{n+1} = -\frac{1}{\Delta t} \sum_{n=0}^K \alpha X_{n+1}.$$

По данным датчиков тока фаз статора определяется частота тока статора ω_c .

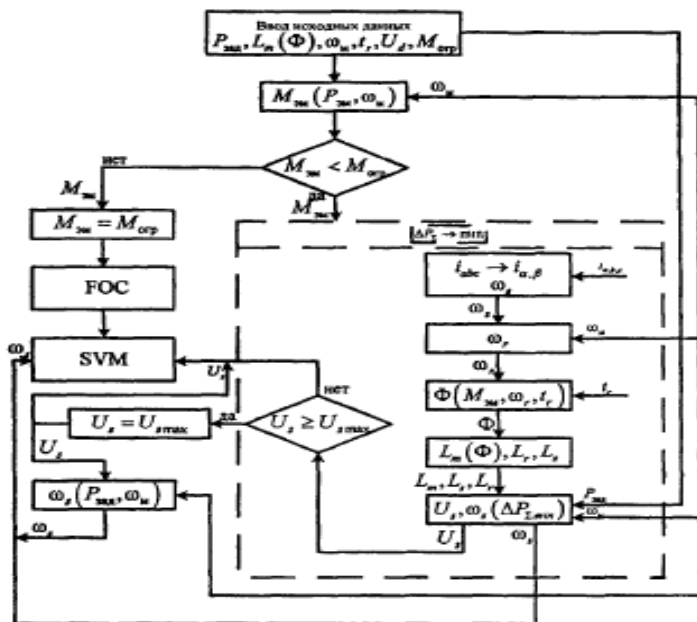


Рис. 2. Алгоритм амплитудно-частотного управления асинхронным тяговым двигателем по критерию минимума электрических потерь мощности

Далее из разности ω_r и ω_c вычисляется частота тока ротора ω_r , которая необходима для определения магнитного потока статора:

$$\Phi = \frac{2\pi}{\sqrt{3 \cdot 3,44K\omega_c}} \sqrt{\frac{M \left[R^2 + (\omega L_s)^2 \right]}{Z\omega R}}.$$

По значению магнитного потока определяется индуктивность контура намагничивания L_s , с помощью которой можно определить индуктивность статора L_s .

Реальная $L_m(\Phi)$ с учетом насыщения стали задается с помощью полинома Ньютона: для устранения динамической ошибки регулирования угла нагрузки в динамических режимах частоту тока статора необходимо формировать с учетом его изменения:

$$\omega_s = \omega + \omega_r + \frac{\partial \delta}{\partial t} \delta.$$

В этом случае будет устранено влияние изменения высокоинерционной-моментообразующей составляющей тока – потокоцепления ротора. Тогда время регулирования момента будет определяться быстродействием контура регулирования тока статора (принят безынерционным) и быстродействием контура регулирования угла нагрузки. Кривая насыщения магнитного потока задается в виде полинома:

$$L_n = L_{m0} + \frac{\Phi}{\Delta\Phi} \left[\Delta b + \left(\frac{\Phi}{\Delta\Phi} - 1 \right) \right] \left\{ \frac{\Delta\delta}{2} + \left(\frac{\Phi}{\Delta\Phi} - 2 \right) \left[\frac{\Delta\delta}{6} + \left(\frac{\Phi}{\Delta\Phi} - 3 \right) \left(\frac{\Phi}{\Delta\Phi} - 4 \right) \right] \frac{\Delta\delta}{120} \right\},$$

где L_n, L_{m0} – обобщенные индуктивности статора и ротора.

Отклонение от оптимальной частоты тока ротора в сторону больших значений при неизменном моменте нагрузки ведет к увеличению входного тока инвертора, а, следовательно, к увеличению тока транзисторов. Если же частоту тока ротора уменьшить путем увеличения напряжения при заданных значениях частоты тока статора и момента нагрузки, то входной ток инвертора сначала уменьшается при возрастающем фазном токе, а потом резко увеличивается. Резкое увеличение входного тока инвертора при малых частотах тока ротора объясняется насыщением магнитной цепи двигателя. С учетом полученных данных рассчитываются минимальные потери мощности $\Delta P_{\text{аин}}$ электрические потери в АИН; $\Delta P_{\text{стали}}$ – электрические потери в стали; ΔP_r – электрические потери в обмотке ротора; ΔP_s – электрические потери в обмотке статора; $\Delta P_{\text{ввг}}$ – электрические потери от высших временных гармонических составляющих:

$$\Delta P_{\Sigma} = U \left[\frac{R_r + L_r \omega - 2L_r \omega_r \omega_n + L_r \omega_n}{R_r R_s - (\omega_s - \omega_n) \omega_s (L_s L_n - L_n)} \right] R_s + \left(\frac{P_r (\omega_s - Z_p \omega_n)}{\omega_n Z_p R_r} \right) R_r + \Delta P_s.$$

Таким образом, предлагается использовать способ рационального амплитудно-частотного управления по критерию минимума электрических потерь мощности. За счет применения принципа адаптивного управления удастся снизить ток в двигателе уменьшить активные потери мощности вобмотках статора и ротора.

Литература

1. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электропоездов / Ю. А. Бахвалов, Г. А. Бузало, А. А. Зарифьян [и др.] – М. : Маршрут, 2006. – 374 с.
2. Киржнер, Д. Л. Требования к новому тяговому подвижному составу / Д. Л. Киржнер // Железнодорожный транспорт. – 2007. – № 8. – С. 13–14.
3. Колпахчя, П. Г. Анализ способов управления асинхронным тяговым двигателем на электроподвижном составе / П. Г. Колпахчян, П. Ю. Петров // Вестник ВЭЛНИИ. – 2005. – № 2(49). – С. 174–187.
4. Луков, Н. М. Автоматические системы управления локомотивов / Н. М. Луков, А. С. Космодамианский. – М. : ГОУ «УМЦ ЖДТ», 2007. – 429 с.
5. Iksar, E. An algorithm for controlling a traction asynchronous drive that minimizes electrical power losses / E. Iksar, M. Idriskhodjaeva // E3S Web Conferences. – 2020. – Vol. 216. – P. 01107. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/ref/2020/76/e3sconf_rses2020_01107/e3sconf_rses2020_01107.html (дата обращения 12.05.2025).
6. Karimov, R. Ch. Program for calculating the minimum electrical power loss in an asynchronous traction engine of mainline locomotives / R. Ch. Karimov, K. K. Usmonov, E. Iksar // International Journal of Advanced Science and Technology. – 2020. – Vol. 29, № 11. – P. 1416–1422.
7. Dielectric and microwave properties of ceramics of the Bi-Ti-O system / H. Sauchuk, N. Yurkevich, A. Akhmedov [et al.] // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – V. 401. – P. 05076. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/38/e3sconf_conmechhydro23_05076/e3sconf_conmechhydro23_05076.html (дата обращения 12.05.2025).
8. Akhmedov, A. P. Innovative public transport stop with autonomous power supply / A. P. Akhmedov, S. B. Khudoyberganov, N. P. Yurkevich // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы Республиканской научн.-технич. конференции, Минск, 20–21 мая 2021 г. / Белорус. Национальный технический университет [и др.] ; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск, 2021. – С. 181–184.