

Харисов И.Р., Карякин А.Л.

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург

ЗАКОНЫ И СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ УСИЛИЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МАГИСТРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

В статье приведен обзор методов управления тяговым электрическим приводом магистральных электровозов в режимах предельных тяговых усилий. Рассмотрены особенности процесса трения колеса и рельса. Приведены зависимости коэффициента сцепления от скольжения колесной пары с учетом погодных условий и наличия третьих тел в зоне контакта колеса и рельса. Приведена классификация динамических режимов электропривода в зависимости от положения рабочей точки коэффициента сцепления. Приведены основные принципы построения расчетной тяговой характеристики магистрального электровоза. На основании расчетной тяговой характеристики сформулированы требования к тяговому электрическому приводу магистральных электровозов. Проведен анализ современных видов тягового электрического привода, применяемых на магистральных электровозах. Рассмотрены электрический тяговый привод с двигателем постоянного тока с независимым возбуждением, электрический тяговый привод с автономным инвертором напряжения с попарным регулированием асинхронных тяговых двигателей и электрический тяговый привод с автономным инвертором напряжения с индивидуальным регулированием асинхронных тяговых двигателей. Рассмотрены системы управления тяговым асинхронным двигателем. Приведены механические характеристики скалярной системы управления асинхронным тяговым двигателем, векторной системы управления асинхронным тяговым двигателем и системы управления с прямым управлением моментом асинхронным тяговым двигателем. Проведен анализ систем управления тяговым усилием электрического тягового привода магистральных электровозов. На основании основных функциональных задач систем управления тяговым усилием произведена декомпозиция систем управления тяговым усилием. Разработана новая классификация способов управления тяговым усилием. На основании анализа теоретических и практических разработок в области тягового привода магистральных электровозов приведены требования к тяговому электрическому приводу магистральных электровозов.

Ключевые слова: электровоз, электропривод, тяговый электродвигатель, коэффициент сцепления, тяговое усилие, боксование, векторное управление, асинхронный двигатель

ВВЕДЕНИЕ

В целях усовершенствования отечественных локомотивов Правительством Российской Федерации намечены перспективы развития транспорта до 2030 года, принята Стратегия развития железнодорожного транспорта. Стратегией предусмотрен выпуск магистральных электровозов нового поколения с асинхронным тяговым двигателем. На сегодняшний день в отечественном локомотивном парке уже имеются современные локомотивы, оснащенные асинхронным тяговым двигателем (электровозы 2ЭС10, 2ЭС7, 2ЭС5). Стоит отметить, что комплекс тягового оборудования на данных электровозах полностью иностранного производства. В связи с этим возрастает актуальность разработки собственного комплекса тягового оборудования. Особый интерес представляют алгоритмы управления тяговым приводом, так как именно от качества алгоритмов управления будут зависеть тяговые характеристики электрического привода.

Данная статья посвящена обзору современных видов тягового электрического привода и алгоритмов управления тяговым приводом магистральных электровозов.

КОЭФФИЦИЕНТ СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЕСА И РЕЛЬСА

Поезда движутся в пределах ограничения сил трения колеса и рельса. Трение представляет собой явление, обусловленное сложными физико-механическими и механико-химическими процессами, протекающими в зонах фактического касания твердых тел, которое зависит от внешних условий, температуры, нагрузки,

шероховатости поверхностей трения, от изменений в третьем теле – пленке, а также от режимов скольжения и тех изменений, которые происходят в процессе скольжения.

Отмечают следующие особенности процесса трения колесной пары и рельса [1, 2]:

- двойственная природа трения;
- дискретность контакта;
- большие напряжения;
- наличие третьего тела;
- высокие температуры;
- кумулятивный характер разрушений.

Получить полное описание протекающих процессов во фрикционном контакте с учетом влияния всех факторов чрезвычайно сложно и избыточно. Однако для разработки системы управления тяговым приводом важно понимать, как образуется сила тяги и как эта сила реализуется.

Рассмотрим принцип возникновения силы тяги подвижного состава [2]. Момент, создаваемый тяговым двигателем, передается через зубчатую передачу на колесную пару, и в точке взаимодействия колеса с рельсом образуется контактное пятно. Контактное пятно делится на две области: область без скольжения и область со скольжением. С увеличением силы тяги область без скольжения уменьшается, а область со скольжением увеличивается. Именно в области со скольжением и образуется сила тяги. Способность области со скольжением реализовывать силу тяги называют коэффициентом сцепления [2].

Важную роль в решении задач математического описания локомотивной тяги играет характеристика сцепления – зависимость коэффициента сцепления

колесной пары от относительной скорости скольжения. Коэффициент сцепления определяется опытным путем по следующему выражению [3]:

$$\psi = \frac{F_K}{G_L}, \quad (1)$$

где ψ – коэффициент сцепления; F_K – сила тяги; G_L – сила тяжести локомотива.

Относительная скорость скольжения определяется как разность между окружной скоростью колесной пары и линейной скоростью подвижного состава [4]:

$$\lambda = \frac{|V_{\text{ОСКП}} - V_L|}{V_L} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где V_L – линейная скорость локомотива; $V_{\text{ОСКП}}$ – окружная скорость колесной пары.

Усредненные характеристики коэффициента сцепления представлены на **рис. 1** согласно [5, 6].

В зависимости от положения рабочей точки коэффициента сцепления (см. **рис. 1**) динамические режимы классифицируют на следующие виды [7]:

- квазистационарные режимы – режимы тяги или торможения, в которых рабочая точка находится на восходящем участке;
- нестационарные режимы – режимы тяги или торможения, в которых рабочая точка находится на падающем участке;
- режимы реализации предельных тяговых усилий – режимы работы вблизи максимума характеристики сцепления.

ТЯГОВЫЙ ПРИВОД МАГИСТРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

Тяговый привод подвижного состава проектируют на основе расчетной тяговой характеристики локомотива [8] (**рис. 2**). Тяговая характеристика разделена на две зоны: зону с ограничением по сцеплению и зону с ограничением по мощности.

Форму тяговой характеристики в зоне ограничения по сцеплению определяют по выражению

$$F_K = 9,81N\psi_{\text{ТХ}}, \quad (3)$$

где N – нагрузка на ось; $\psi_{\text{ТХ}}$ – коэффициент сцепления для расчета тяговой характеристики.

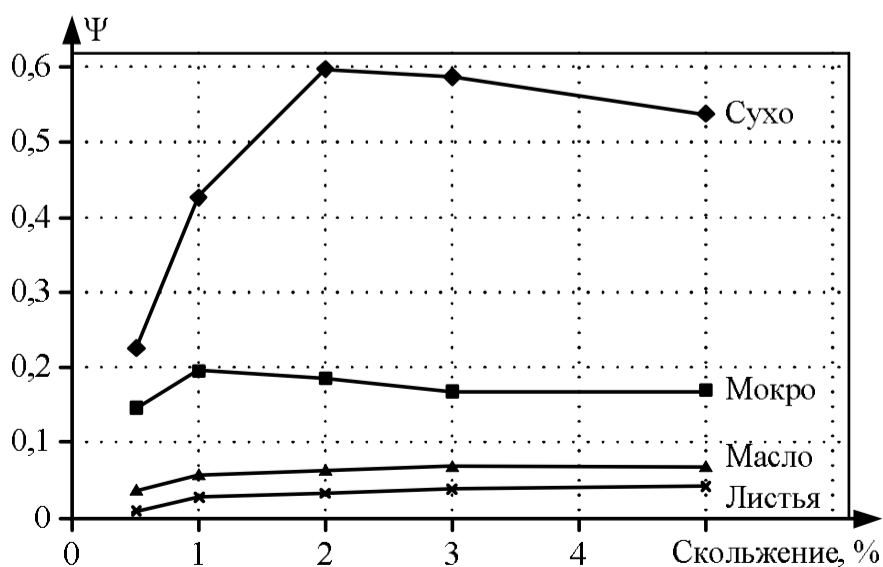


Рис. 1. Зависимость коэффициента сцепления от скорости скольжения

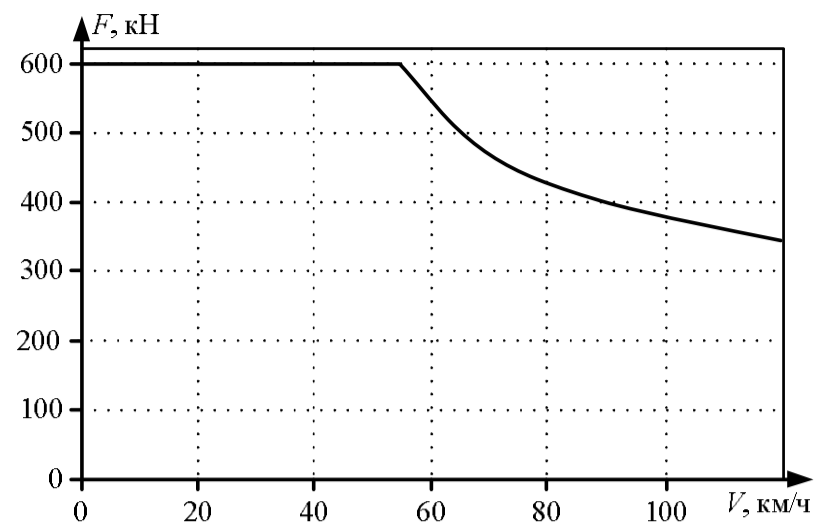


Рис. 2. Тяговая характеристика подвижного состава

При этом коэффициент сцепления тяговой характеристики зависит от скорости движения поезда и определяется по выражению

$$\psi_{\text{ТХ}} = \psi - 0,00168V, \quad (4)$$

где M – линейная скорость электровоза (секции), км/ч.

Форму тяговой характеристики в зоне ограничения по мощности определяют по выражению

$$F_K = \frac{P_{\text{ДВ}} \eta_{\text{РЕД}} 3,6}{V}, \quad (5)$$

где $P_{\text{ДВ}}$ – мощность на валу тягового электродвигателя; $\eta_{\text{РЕД}}$ – КПД редуктора.

Исходя из формы тяговой характеристики, в [9] сформулированы следующие требования к тяговому приводу подвижного состава:

- рабочие характеристики электропривода должны покрывать всю область тяговой характеристики;
- система автоматического регулирования должна обеспечить работу в длительном режиме в любой точке тяговой области;
- система автоматического регулирования должна обеспечить требуемую жесткость характеристики в случаях наличия боксования.

Дополнительно можно сформулировать следующее требование: электромеханическая постоянная времени электрического привода должна быть такой величины, чтобы изменение момента асинхронного тягового двигателя было быстрее, чем изменение приведенного к валу двигателя момента сцепления.

Под последним требованием понимается, что эквивалентная передаточная функция тягового электропривода имеет вид

$$W_{\text{ЭМ}}(p) = \frac{1}{T_{\text{ЭМ}} p + 1}, \quad (6)$$

где $T_{\text{ЭМ}}$ – электромеханическая постоянная времени; электромеханическая постоянная времени удовлетворяет условию

$$T_{\text{ЭМ}} < \frac{J_{\text{СУМ}}}{R_K^2 |X|}, \quad (7)$$

где $J_{\text{СУМ}}$ – суммарный момент инерции, приведенный к оси колесной пары; R_K – радиус колесной пары по кругу катания; X – жесткость характеристики сцепления.

Вышеизложенным требованиям к тяговому приводу удовлетворяют следующие известные виды тягового электрического привода:

- тяговый привод с двигателем постоянного тока независимого возбуждения;
- тяговый привод с автономным инвертором напряжения попарного регулирования асинхронными тяговыми электродвигателями;
- тяговый привод с автономным инвертором напряжения индивидуального регулирования асинхронными тяговыми электродвигателями.

В настоящее время тяговый привод с двигателем постоянного тока с независимым возбуждением применяется на отечественных магистральных электровозах серий 2ЭС4 и 2ЭС6. Схема с независимым возбуждением получила распространение за счет высокой жесткости механической характеристики, что особенно важно в случаях возникновения буксования. Регулирование тока возбуждения в таком приводе осуществляется по следующему выражению:

$$I_{в} = I_{вз} + kI_{я}, \quad (8)$$

где $I_{вз}$ – минимально задаваемое значение тока возбуждения; k – коэффициент компаундирования обратной связи по току якоря; $I_{я}$ – ток якоря для группы тяговых двигателей.

Преимуществом такого типа привода является относительная технологическая простота изготовления. К недостаткам такого привода можно отнести наличие щеточно-коллекторного узла и большой расход цветных металлов на единицу мощности. Однако вследствие высоких затрат на обслуживание двигателя данный тип тягового привода вытесняется тяговыми приводами с асинхронными тяговыми двигателями.

Также получила распространение структура тягового привода с автономным инвертором напряжения группового (попарного) регулирования асинхронными тяговыми электродвигателями [10] (рис. 3). В данном типе привода питание двигателей одной тележки локомотива осуществляется от одного автономного инвертора напряжения. Данный тип привода применяется в основном на пассажирских локомотивах. Так, например, такой тип привода применяется на электропоездах серий ЭС2Г и ЭГ2Тв. К преимуществам данного привода относится простота и надежность такой схемы. Однако данная схема не применима на магистральных грузовых электровозах вследствие отсутствия возможности индивидуального управления моментом тяговых двигателей.

Структура тягового привода с автономным инвертором напряжения индивидуального регулирования асинхронными тяговыми электродвигателями представлена на рис. 4.

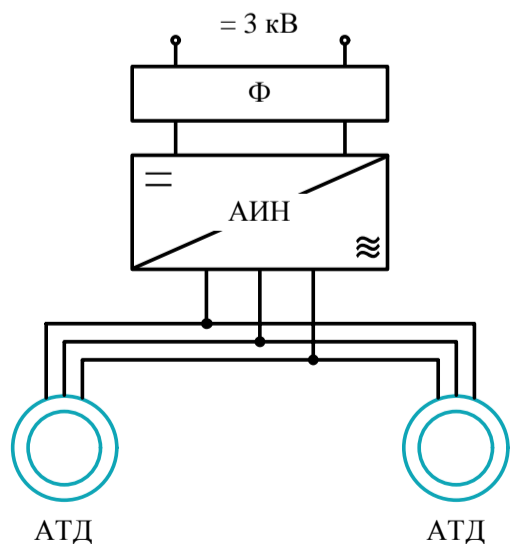


Рис. 3. Структура тягового привода с автономным инвертором напряжения группового (попарного)

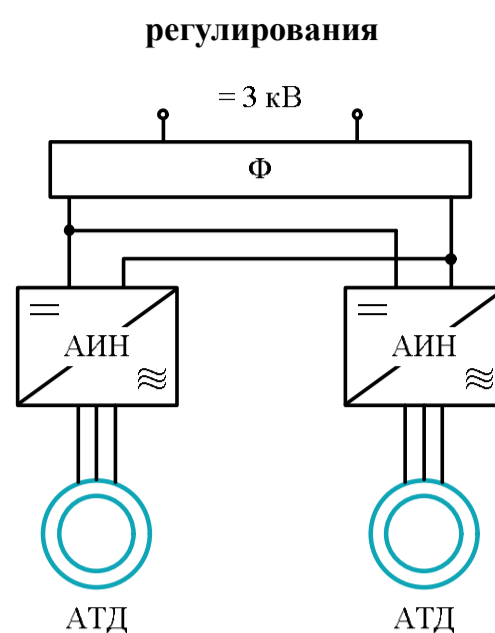


Рис. 4. Структура тягового привода с автономными инверторами напряжения индивидуального регулирования

Главным преимуществом такого типа привода является его высокая автономность и индивидуальное регулирование момента. К недостаткам относятся высокая стоимость и сложность исполнения. Однако недостатки перекрывает возможность индивидуального регулирования момента, которая позволяет реализовывать максимальное тяговое усилие, вследствие чего данная схема получила широкое распространение на магистральных электровозах. Такой тип привода применяется на отечественных электровозах серий 2ЭС10, 2ЭС7, 2ЭВ120 и зарубежных электровозах Siemens Vectron и Siemens Smarton.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ

Система автоматического управления тяговым приводом должна обеспечивать движение в любой точке тяговой характеристики в продолжительном режиме, осуществлять регулирование тягового усилия поезда при существующих ограничениях на ускорение поезда и мощность. Также система автоматического управления тяговым приводом поезда должна обеспечивать достаточный темп снижения или повышения тягового усилия для избегания глубоких буксований и юза колесных пар. Структурная схема системы автоматического управления приведена на рис. 5.

В структурной схеме условно выделены две подсистемы: система управления тяговым усилием и система управления тяговым двигателем [11].

Обычно в качестве систем автоматического управления тяговым двигателем применяют скалярную, векторную систему автоматического управления и систему автоматического управления с прямым управлением моментом.

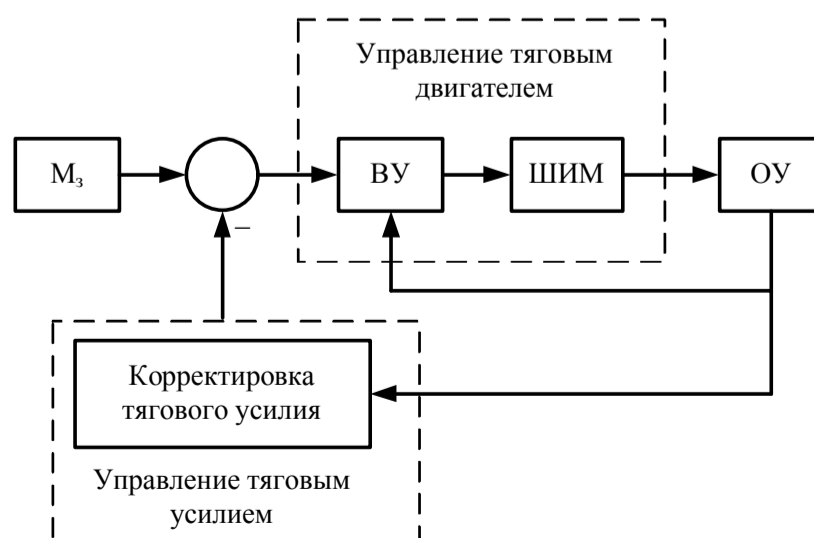


Рис. 5. Структурная схема системы автоматического управления тяговым приводом

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Скалярное управление

Отличительной особенностью скалярной системы управления является то, что к двигателю прилагается напряжение определенной частоты и амплитуды, соотношение между которыми описывается законом или зависимостью [12]. Один из возможных вариантов семейства механических характеристик представлен на рис. 6.

Самым простым и часто применяемым для тягового электрического привода является закон скалярного управления [13]:

$$\frac{U_s}{f_1} = \text{const.} \quad (9)$$

Однако вследствие того, что асинхронный двигатель представляет собой сложную электродинамическую систему, изменение напряжений и частоты следует проводить плавно, чтобы избежать колебательных переходных процессов в токе двигателя. Для устранения колебательных процессов в структуру скалярного управления встроен задатчик интенсивности. Наличие задатчика интенсивности в структуре скалярного управления затрудняет управление в режимах боксования, а главное, увеличивается электромеханическая постоянная времени. Вследствие большой электромеханической постоянной времени привода со скалярной системой управления данная система не применяется на современных локомотивах.

Векторное управление

Впервые принципы работы векторного управления были изложены Феликсом Блашке и Карлом Хассе [14]. Под системой векторного управления понимают системы, работающие при постоянстве потокосцепления ротора. В системе векторного управления регулируются два ортогональных тока – моментобразующий и потокообразующий, за счет этого повышается быстродействие системы управления. Семейство механических характеристик представлено на рис. 7. Также необходимым требованием является то, что система управления должна быть с датчиком угловой частоты вращения вала электродвигателя, так как это увеличивает качество переходных процессов и позволяет достаточно точно регулировать скорость во всем диапазоне скоростей движения [15]. К преимуществам векторного управления можно отнести возможность применения различных вариантов широко-импульсной модуляции. Благодаря своим преимуществам векторную систему управления применяют на локомотивах серий 2ЭС10, 2ЭС7 и ЭС2Г.

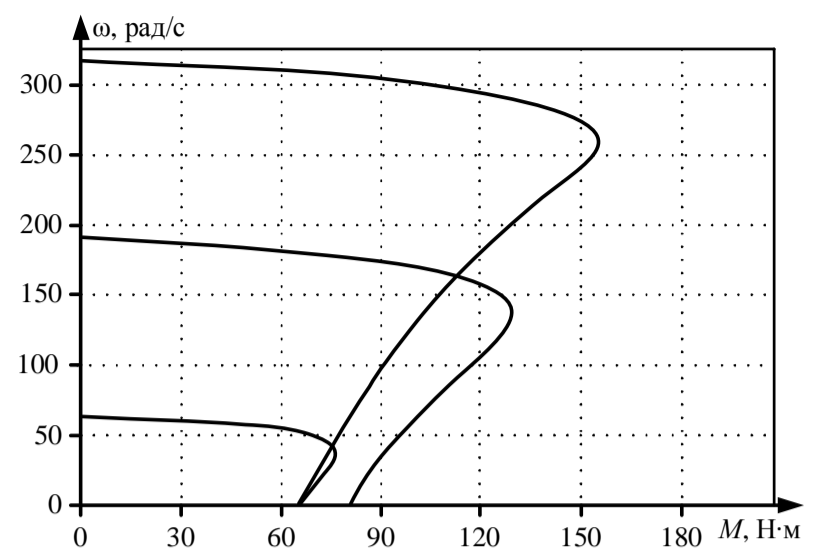


Рис. 6. Механические характеристики скалярной системы управления

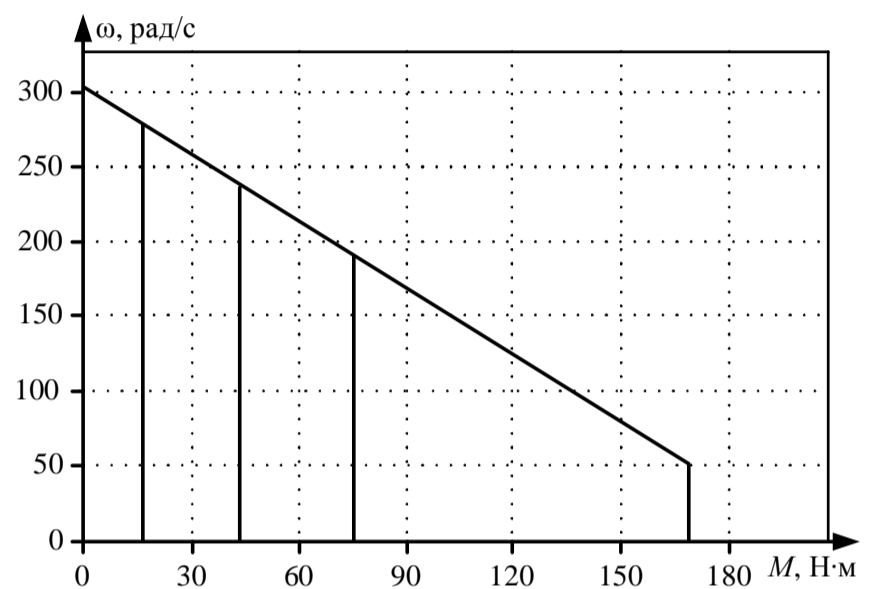


Рис. 7. Механические характеристики системы векторного управления

Прямое управление моментом

Прямое управление моментом было предложено И. Такиши и Т. Ногучи в 1986 году [16]. Основным принципом работы является то, что на основании выходов дискретных регуляторов и таблицы истинности формируются управляющие воздействия на автономный инвертор напряжения [17, 18]. Механическая характеристика представлена на рис. 8.

Безусловно, главным преимуществом системы прямого управления моментом является простота системы и отсутствие необходимости подстройки параметров [19]. Однако главным недостатком является наличие релейных регуляторов, что приводит к повышению пульсаций момента асинхронного тягового двигателя [20].

Стоит отметить, что система векторного управления требует подстройки параметров в процессе работы и достаточно больших вычислительных ресурсов цифровых систем управления, что можно отнести к недостаткам. Однако современный уровень микропроцессорной техники позволяет обеспечить требуемую производительность вычислительного устройства, а робастные алгоритмы управления позволяют компенсировать влияние параметрических возмущений. Практическая применимость векторной системы управления, в совокупности с относительно малыми пульсациями электромагнитного момента, делают эту систему наиболее предпочтительной.

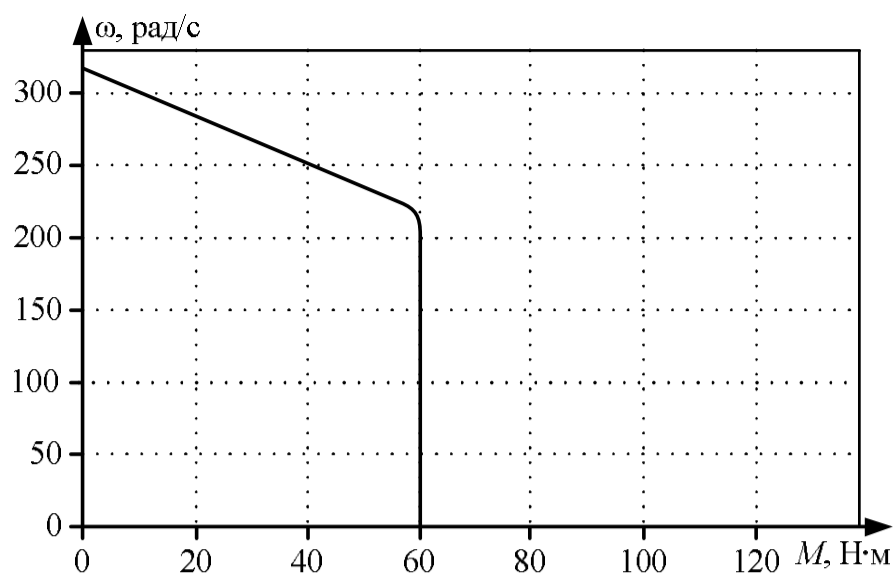


Рис. 8. Механическая характеристика системы управления по структуре прямого управления моментом

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ УСИЛИЕМ

Цель системы управления тяговым усилием заключается в приближении расчетного коэффициента сцепления ψ_p к максимуму коэффициента сцепления. Идеализированно цель системы управления можно описать следующим выражением:

$$\psi = \psi_p 0,95. \quad (10)$$

Существует множество различных систем автоматического управления скольжением. Все системы объединяет схожий принцип действия. Упрощенно можно сказать, что все системы автоматического управления тяговым усилием после обнаружения избыточного скольжения, устраняют избыточное скольжение путем снижения тягового усилия. Таким образом удастся избежать процессов глубокого скольжения, износа колесных пар и головки рельса.

Для более детального понимания рассмотрим последовательность алгоритма работы классической системы управления тяговым усилием [21]:

- обнаружение боксования;
- уменьшение момента тягового двигателя;
- обнаружение прекращения боксования;
- повышение момента до расчетной величины;
- повышение момента тягового двигателя до момента задания.

Данный алгоритм работы классической системы управления тяговым усилием требует решения следующих задач:

- определение линейной скорости поезда;
- определение боксования;
- определение расчетного момента;
- определение величины и скорости изменения момента тягового двигателя.

Далее рассмотрим различные способы решения задач системы автоматического управления.

Определение линейной скорости

Линейная скорость поезда в системах автоматического управления скольжения необходима для корректного определения скольжения колесной пары. Наиболее простым способом определения линейной скорости является измерение угловой частоты вращения необмотанной оси с последующим ее переводом в окружную скорость. Данный способ применяют на пассажирских поездах, где есть возможность измерения угловой частоты вращения на пассажирских вагонах [21]. К преимуществам такого способа относится простота определения линейной скорости вследствие того, что измеря-

мая ось не участвует в процессе образования тяги, а соответственно, не имеет избыточного скольжения. Главным недостатком такого способа является то, что он не применим к магистральным грузовым локомотивам вследствие отсутствия эксплуатационной и экономической возможности комплектования грузовых вагонов датчиками угловых частот вращения осей.

Наиболее применяемым способом на грузовых магистральных локомотивах является способ определения минимальной угловой частоты из всех измеряемых угловых частот вращения «обматеренных» осей [22].

Преимущество такого способа является относительно точное определение линейной скорости. К недостаткам относится невозможность определения линейной скорости в случае синхронного скольжения обмотеренных осей.

Еще одним способом является измерение линейной скорости по средствам спутниковой навигации GPS или ГЛОНАСС [23]. Преимуществом такого способа является возможность определения линейной скорости на грузовых локомотивах, недостатками – относительно большое время запаздывания сигнала и возможность пропадания сигнала (пропадание сигнала в туннеле).

Определение начала боксования

Своевременное определение начала боксования необходимо для подавления процессов избыточного скольжения. В случае неблагоприятного сочетания факторов свободное развитие процесса избыточного скольжения за 1,5–2,5 с может привести к критическим динамическим нагрузкам и поломкам в механической части привода [24, 25]. Существует несколько способов определения боксования:

1. Определение порогового скольжения колесной пары.
2. Определение порогового ускорения колесной пары.
3. Определение скольжения по электрическим параметрам тягового двигателя [26].

Как правило, используют комбинацию первых двух способов в случае датчикового управления тяговым приводом [25]. В случае бездатчикового управления применяют третий способ.

Определение расчетного момента

Под определением расчетного момента понимается способ определения максимального момента задания. Корректное определение расчетного момента позволяет достигать максимальной силы тяги по условиям сцепления. равнозначно определению расчетного момента будет определение оптимального скольжения (см. рис. 1). Вследствие того, что эквивалентный момент сцепления не может быть измерен, его вычисляют косвенным путем по выражению [27]

$$M_{\Sigma} = uM_{\Sigma M} - \frac{b}{u} \dot{\theta} - \frac{J_{\Sigma}}{u} \ddot{\theta}, \quad (11)$$

где u – передаточное число редуктора; $M_{\Sigma M}$ – электромагнитный момент двигателя; θ – угол поворота ротора тягового двигателя; b – коэффициент вязкости редуктора; J_{Σ} – суммарный момент инерции, приведенный к ротору тягового двигателя.

Из-за наличия шумов в измеренных сигналах скорости и электрических параметров эквивалентный момент сцепления фильтруют. В качестве фильтра могут применяться фильтр нижних частот или фильтр Калмана [28].

Также вследствие нелинейности процесса боксова-

ния в последнее время для определения эквивалентного момента сцепления используют регуляторы нечеткой логики [29].

Разработаны методы определения эквивалентного момента сцепления с применением методов искусственных нейронных сетей [30]. Однако вследствие высоких требований к вычислительным ресурсам цифровых средств управления данные методы еще не получили широкого распространения.

Определение величины и скорости изменения момента тягового двигателя

В классической системе управления темп снижения момента тягового двигателя является постоянным: $\Delta M_{ЭМ}/\Delta t = \text{const}$ [21]. В случае изменения момента с постоянным темпом имеет место недоиспользование тяговых свойств подвижного состава вследствие неучета текущей величины скольжения колесной пары.

Также существуют системы управления с ПИ-регулятором с отрицательной обратной связью по частоте вращения вала тягового двигателя [31]. Данный метод прост в своей реализации, однако требователен к точности вычисления линейной скорости. Стоит отметить, что данный способ управления моментом пришел из автомобильной промышленности.

Еще одним перспективным методом является метод регулирования на основе прогнозирования [32]. Несмотря на наличие работ по данному методу, отсутствуют результаты экспериментов непосредственно на подвижном составе. Также прогнозирование затруднено вследствие влияния большого числа факторов на величину коэффициента сцепления [1, 2].

КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ УСИЛИЕМ

Исходя из теоретического анализа, авторами предложена следующая классификация способов управления тяговым приводом с асинхронным тяговым приводом в режимах реализации предельных усилий (рис. 9). Классификация основана на том положении, что все способы можно разделить на три функциональные части или подсистемы: определение линейной скорости, определение боксования и регулирование тягового усилия. Причем классификация построена таким образом, что если объединить минимум один подблок из каждого функционального блока, то можно получить целостный способ управления тяговым приводом в режиме реализации предельных усилий. Например, объединив определение линейной скорости по измерению угловой частоты вращения необмотанной оси и определение боксования по пороговой скорости и регулирование с фиксированным темпом снижения без поиска максимума, то получим целостный способ управления тяговым усилием.

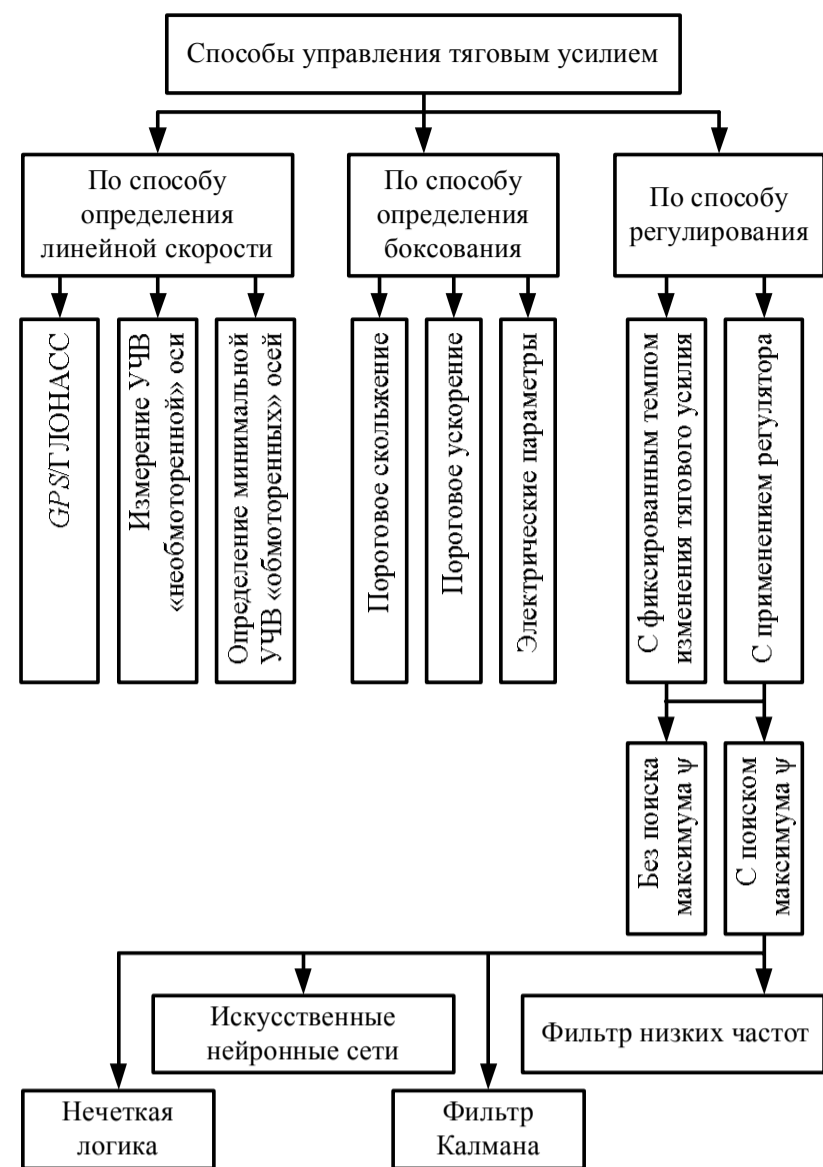


Рис. 9. Классификация способов управления тяговым приводом в режимах предельных усилий

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного анализа теоретических и практических разработок в области тягового электропривода магистральных электровозов позволяют сделать следующие основополагающие выводы:

- в качестве тягового на современном подвижном составе применяется асинхронный электродвигатель специального исполнения;

- в качестве системы управления асинхронным тяговым электродвигателем на современном подвижном составе применяются системы векторного управления;

- система управления тяговым усилием должна обеспечивать реализацию максимально возможной силы тяги;

- способы управления тяговым электроприводом в режимах предельных усилий являются комбинацией методов определения линейной скорости локомотива, начала режима боксования, регулирования электрических и механических координат электропривода;

- электромеханическая постоянная времени электрического привода должна быть такой величины, чтобы изменение момента асинхронного тягового двигателя было быстрее, чем изменение приведенного к валу двигателя момента сцепления.

Проведенный анализ литературных источников показал, что перспективными для применения в тяговом электроприводе магистрального электровоза являются комбинированные способы управления, сочетающие следующие методы управления тяговым усилием в соответствии с предложенной классификацией:

- способ вычисления линейной скорости по определению минимальной угловой частоты осей, оснащенных тяговыми электродвигателями;

- способ определения боксования по пороговому скольжению в сочетании с определением по пороговому ускорению;
- способ регулирования тягового усилия с применением регуляторов и поиском максимума коэффициента сцепления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самме Г.В. Фрикционное взаимодействие колесных пар локомотива с рельсами: монография. М.: Маршрут, 2005. 80 с.
2. Lewis R., Olofsson U. Wheel-rail interface handbook. Replica Press Pvt Ltd, 2009. 818 p.
3. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги. М.: Транспорт, 1983. 328 с.
4. Identification of a Nonlinear Wheel/Rail Adhesion Model for Heavy-Duty Locomotives / J. He, G. Liu, J. Liu, C. Zhang, X. Cheng // IEEE Access. 2018. Vol. 6. Pp. 50424-50432. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2868177
5. Hybrid re-adhesion control method for traction system of high-speed railway. / D.Y. Park, M.S. Kim, D.H. Hwang, J.H. Lee, Y.J. Kim // Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2001. Pp. 739-742. doi: 10.1109/ICEMS.2001.971782
6. Andreas S. Electric traction—motion power and energy supply: basics and practical Experience. Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2014. 416 p.
7. Павленко А.П. Динамика тяговых приводов магистральных локомотивов. М.: Машиностроение, 1991. 192 с.
8. Spiriyagin M., Cole C., Sun Y.Q., McClanachan M., Spiriyagin V., McSweeney T. Design and Simulation of Rail Vehicles. Boca Raton: CRC Press, 2014. 337 p. doi: 10.1201/b17029
9. Ротанов Н.А. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями. М.: Транспорт, 1991. 329 с.
10. Brenna M., Foadelli F., Zaninelli D. Electrical Railway Transportation Systems. Wiley-IEEE Press, 2018. 622 p.
11. Novel anti-slip/slide control algorithm for Korean high-speed train / H.J. Ryoo, S.J. Kim, G.H. Rim, Y.J. Kim, M.S. Kim // 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). IEEE, 2003. Pp. 2570-2574. doi: 10.1109/IECON.2003.1280651
12. Pati S., Patnaik M., Panda A. Comparative performance analysis of fuzzy PI, PD and PID controllers used in a scalar controlled induction motor drive // International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT). IEEE, 2014. Pp. 904-909. doi: 10.1109/ICCPCT.2014.7054799
13. Srilad S., Tunyasirirut S., Suksri T. Implementation of a Scalar Controlled Induction Motor Drives // SICE-ICASE International Joint Conference. IEEE, 2006. Pp. 3605-3610. doi: 10.1109/SICE.2006.314749
14. Blaschke F. The principle of field-orientation as applied to the transvector closed loop control system for rotating-field machines // Siemens Rev. 1972. Vol. 34 (1). Pp. 217-220.
15. Ключников А.Т., Турпак А.М. Бездатчиковое векторное управление асинхронным двигателем при расчёте в комплексной форме // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2020. № 33. С. 160-176. doi: 10.15593/2224-9397/2020.1.10
16. Takahashi I., Noguchi T. A new quick-response and high-efficiency control strategy of induction motors // IEEE Transactions on Industry Applications. 1986. Vol. 22(5). Pp. 820-827. doi: 10.1109/TIA.1986.4504799
17. Improved Performance of CFTC-based Direct Torque Control of Induction Machines by Increasing Torque Loop Bandwidth / I.M. Alsofyani, J.H. Lee, B.M. Han, K.B. Lee // International Power Electronics Conference (IPEC). IEEE, 2018. Pp. 466-470. doi: 10.23919/IPEC.2018.8507989
18. Ludtke I., Jayne M.G. Direct torque control of induction motors // IEE Colloquium on Vector Control and Direct Torque Control of Induction Motors. IET, 1995. Pp. 6/1-6/6. doi: 10.1049/ic:19951113
19. Симонович А.В., Петренко Ю.Н. Прямое управление моментом асинхронного привода троллейбуса // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы международной научно-практической конференции. Минск, 2012. С. 157-158.
20. Карандеев Д.Ю., Энгель Е.А. Прямое управление моментом асинхронного двигателя с использованием адаптивного нейроконтроллера в условиях неопределенности // Науковедение. 2015. №5. С. 1-7.
21. The proposal of re-adhesion control method with the advantage of individual control system / O. Yamazaki, S. Fukasawa, S. Ohashi, K. Kondo // International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS). IEEE, 2015. Pp. 1-6. doi: 10.1109/ESARS.2015.7101510
22. Improvement of re-adhesion for commuter trains with vector control traction inverter / I. Yasuoka, T. Henmi, Y. Nakazawa, I. Aoyama // Proceedings of Power Conversion Conference (PCC). IEEE, 1997. Pp. 51-56. doi: 10.1109/PCCON.1997.645585
23. Hahn J-O., Rajamani R., Alexander L. Gps-based real-time identification of tire-road friction coefficient // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2002. Vol. 10(3). Pp. 331-343. doi: 10.1109/87.998016
24. Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей. М.: Транспорт, 1965. 267 с.
25. Моделирование системы управления тягой и торможением магистрального грузового тепловоза в программных комплексах Matlab и «Универсальный механизм» / Г.А. Федяева, В.В. Кобищанов, С.Ю. Матюшков, А.Н. Тарасов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2013. № 3. С. 147-151.
26. Advanced anti-slip and anti-skid re-adhesion control considering Air Brake for Electric Train / S. Kadowaki, K. Ohishi, T. Hata, T. Sano, S. Yasukawa // European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2005. Pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2005.219367
27. Taking Traction Control to Task: High-Adhesion-Point Tracking Based on a Disturbance Observer in Railway Vehicles / L. Diao, L. Zhao, Z. Jin, L. Wang, S.M. Sharkh // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2012. Vol. 11(1). Pp. 51-62. doi: 10.1109/MIE.2016.2644699
28. Pichlik P. Implementations of UKF and EKF for Wheel Slip Control Purpose to Locomotive Computer // International Conference on Applied Electronics (AE). IEEE, 2018. Pp. 1-4. doi: 10.23919/AE.2018.8501444
29. Garcia-Rivierav M., Sanz R., Perez-Rodriguez J.A. An anti-slipping fuzzy logic controller for a railway traction system // Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Fuzzy Systems. IEEE, 1997. Pp. 119-124. doi: 10.1109/FUZZY.1997.616355
30. Gadjar T., Rudas I., Suda Y. Neural network based estimation of friction coefficient of wheel and rail // IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems. IEEE, 1997. Pp. 315-318. doi: 10.1109/INES.1997.632437
31. Anti-slip control system of Korean High-Speed Train / D.H. Hwang, M.S. Kim, J.W. Jeon, J.H. Lee, D.Y. Park, Y.J. Kim, H.J. Ryoo, J.S. Kim // Computers in Railways VII. 2000. Pp. 613-622. doi: 10.2495/CR000591
32. Moaveni B., Fathabadi F.R., Molavi A. Supervisory Predictive Control for Wheel Slip Prevention and Tracking of Desired Speed Profile in Electric Trains // ISA Transactions. 2020. Vol. 101. Pp. 102-115. doi: 10.1016/j.isatra.2020.01.011

INFORMATION IN ENGLISH

PRINCIPLES AND METHODS OF ELECTRIC POWER DRIVE TRACTION CONTROL IN ELECTRIC LOCOMOTIVE

Ildar R. Kharisov

Postgraduate Student, Department of Mining Enterprises Electrification, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia. E-mail: bbbildar@rambler.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5078-0533>

Alexander L. Karyakin

D. Sc. (Engineering), Professor, Department of Mining Enterprises Electrification, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia. E-mail: karyakin.a@ursmu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6196-3263>

The article provides an overview of methods for controlling the traction electric drive of electric locomotives in the modes of maximum traction forces. The features of the wheel and rail friction process are considered. The dependences of the adhesion coefficient on the sliding of the wheelset are given considering weather conditions and the presence of third bodies in the contact zone between the wheel and the rail. The dynamic modes classification of the electric drive depending on the position of the operating point of the adhesion coefficient is given. The basic principles of constructing the calculated traction characteristics of the main electric locomotive are given. Based on the calculated traction characteristics, the requirements for the traction electric drive of mainline electric locomotives are formulated. The analysis of modern types of traction electric drive used on mainline electric locomotives is carried out. An electric traction drive with a DC motor with independent excitation, an electric traction drive with an autonomous voltage inverter with pairwise regulation of induction traction motors and an electric traction drive with an autonomous voltage inverter with individual regulation of asynchronous traction motors are considered. The control systems of a traction asynchronous motor are considered. The mechanical characteristics of a scalar control system for an asynchronous traction motor, a field oriented control system for an induction traction motor and a control system with direct torque control for an induction traction motor are given. The analysis of control systems for the traction force of the electric traction drive of the electric locomotives is carried out. Based on the main functional tasks of traction control systems, the decomposition of traction control systems was carried out. A new classification of traction force control methods has been developed. Based on the analysis of theoretical and practical developments in the field of traction drive of mainline electric locomotives, the requirements for the traction electric drive of mainline electric locomotives are given.

Keywords: electric locomotive, electric drive, traction motor, friction coefficient, traction force, wheel slip, field-oriented control, induction motor

REFERENCES

1. Samme G.V. *Friktsionnoe vzaimodeystvie kolesnykh par lokomotiva s relsami* [Frictional interaction of wheel pairs of a locomotive with rails]. Moscow, Marshrut Publ., 2005. 80 p. (In Russian)
2. Lewis R., Olofsson U. *Wheel-rail interface handbook*. Replica Press Pvt Ltd, 2009. 818 p.
3. Rozenfeld V.E., Isaev I.P., Sidorov N.N. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Electric traction theory]. Moscow, Transport Publ., 1983. 328 p. (In Russian)
4. He J., Liu G., Liu J., Zhang C., Cheng X. Identification of a Nonlinear Wheel/Rail Adhesion Model for Heavy-Duty Locomotives. *IEEE Access*. 2018, vol. 6, pp. 50424-50432. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2868177
5. Park D.Y., Kim M.S., Hwang D.H., Lee J.H., Kim Y.J., Hybrid re-adhesion control method for traction system of high-speed railway. (ICEMS). *IEEE*, 2001, pp. 739-742. doi: 10.1109/ICEMS.2001.971782
6. Andreas S. *Electric traction—motion power and energy supply: basics and practical Experience*. Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2014. 416 p.
7. Pavlenko A.P. *Dinamika tyagovykh privodov magistralnykh lokomotivov* [Electric traction theory]. Moscow, Machine building Publ., 1991. 192 p. (In Russian)
8. Spiryagin M., Cole C., Sun Y.Q., McClanachan M., Spiryagin V., McSweeney T. *Design and Simulation of Rail Vehicles*. CRC Press, 2014. 337 p. doi: 10.1201/b17029
9. Rotanov N.A. *Elektropodvizhnoy sostav s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami* [Electric rolling stock with induction traction motors]. Moscow, Transport Publ., 1991. 329 p. (In Russian)
10. Brenna M., Foadelli F., Zaninelli D. *Electrical Railway Transportation Systems*. Wiley-IEEE Press, 2018. 622 p.
11. Ryoo H.J., Kim S.J., Rim G.H., Kim Y.J., Kim M.S. Novel anti-slip/slide control algorithm for Korean high-speed train. (IECON). *IEEE*, 2003, pp. 2570-2574. doi: 10.1109/IECON.2003.1280651
12. Pati S., Patnaik M., Panda A. Comparative performance analysis of fuzzy PI, PD and PID controllers used in a scalar controlled induction motor drive. *International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies. (ICCPCT)*. *IEEE*, 2014, pp. 904-909. doi: 10.1109/ICCPCT.2014.7054799
13. Srilad S., Tunnyasrirut S., Suksri T. Implementation of a Scalar Controlled Induction Motor Drives. *SICE-ICASE International Joint Conference*. *IEEE*, 2006, pp. 3605-3610. doi: 10.1109/SICE.2006.314749
14. Blaschke F. The principle of field-orientation as applied to the transvector closed loop control system for rotating-field machines. *Siemens Rev.* 1972, vol. 34(1), pp. 217–220.
15. Klyuchnikov A.T., Turpak A.M. Sensorless vector control asynchronous motor when a calculating a complex form. *Vestnik PNIPU [Vestnik of PNIPU]*, 2020, no. 33, pp. 160-176. (In Russian) doi: 10.15593/2224-9397/2020.1.10
16. Takahashi I., Noguchi T. A new quick response and high efficiency control strategy of induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1986, vol. 22(5), pp. 820–827. doi: 10.1109/TIA.1986.4504799
17. Alsofyani I.M., Lee J.H., Han B.M., Lee K.B. Improved Performance of CFTC-based Direct Torque Control of Induction Machines by Increasing Torque Loop Bandwidth. *International Power Electronics Conference (IPEC)*. *IEEE*, 2018, pp. 466-470. doi: 10.23919/IPEC.2018.8507989
18. Ludtke I., Jayne M.G. Direct torque control of induction motors. *IEE Colloquium on Vector Control and Direct Torque Control of Induction Motors*. *IET*, 1995, pp. 6/1-6/6. doi: 10.1049/ic:19951113
19. Simonovich A.V., Petrenko Yu.N. Direct torque control of asynchronous trolleybus drive. *Innovatsionnye tekhnologii*,

- avtomatizatsiya i mekhatronika v mashino- i priborostroenii: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Materials of the international scientific and practical conference "Innovative technologies, automation and mechatronics in machine and instrument making"]. Minsk, Biznesofset Publ., 2012, pp. 157-158. (In Russian)
20. Karandeev D.Y., Engel E.A. Direct control of the torque of an induction motor using an adaptive neurocontroller under uncertainty. *Naukovedenie* [Research on research], 2015, no. 5, pp. 1-7. (In Russian)
 21. Yamazaki O., Fukasawa S., Ohashi S. The proposal of re-adhesion control method with the advantage of individual control system. (ESARS). IEEE, 2015, pp. 1-6. doi: 10.1109/ESARS.2015.7101510
 22. Yasuoka I., Henmi T., Nakazawa Y. Improvement of re-adhesion for commuter trains with vector control traction inverter. IEEE, 1997, pp. 51-56. doi: 10.1109/PCCON.1997.645585
 23. Hahn J-O., Rajamani R., Alexander L. Gps-based real-time identification of tire-road friction coefficient. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2002, vol. 10(3), pp. 331-343. doi: 10.1109/87.998016
 24. Minov D.K. *Povyshenie tyagovykh svoystv elektrovozov i teplovozov s elektricheskoy peredachey* [Improving the traction properties of electric locomotives and diesel locomotives with electric transmission]. Moscow, Transport Publ., 1965, 267 p. (In Russian)
 25. Fedyaeva G.A., Kobishchanov V.V., Matyushkov S.Yu., Tarasov A.N. Modeling of control system of traction and braking mainline freight locomotives in software systems Matlab and «Universal mechanism». *Vestnik BGTU* [Vestnik of BGTU], 2013, no. 3, pp. 147-151. (In Russian)
 26. Kadowaki S., Ohishi K., Hata T., Sano T., Yasukawa S. Advanced anti-slip and anti-skid re-adhesion control considering Air Brake for Electric Train. European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2005, pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2005.219367
 27. Diao L., Zhao L., Jin Z. Taking Traction Control to Task: High-Adhesion-Point Tracking Based on a Disturbance Observer in Railway Vehicles. IEEE Industrial Electronics Magazine. 2012, vol. 11(1), pp. 51-62. doi: 10.1109/MIE.2016.2644699
 28. Pichlik P. Implementations of UKF and EKF for Wheel Slip Control Purpose to Locomotive Computer. International Conference on Applied Electronics (AE). IEEE, 2018, pp. 1-4. doi: 10.23919/AE.2018.8501444
 29. Garcia-Rivierav M., Sanz R., Perez-Rodríguez J.A. An anti-slipping fuzzy logic controller for a railway traction system. Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Fuzzy Systems. IEEE, 1997, pp. 119-124. doi: 10.1109/FUZZY.1997.616355
 30. Gadjar T., Rudas I., Suda Y. Neural network based estimation of friction coefficient of wheel and rail. IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems. IEEE, 1997, pp. 315-318. doi: 10.1109/INES.1997.632437
 31. Hwang D.H., Kim M.S., Jeon J.W. Anti-slip control system of Korean High-Speed Train. Computers in Railways VII. 2000, pp. 613-622. doi: 10.2495/CR00059
 32. Moaveni B. Supervisory Predictive Control for Wheel Slip Prevention and Tracking of Desired Speed Profile in Electric Trains. ISA Transactions. 2020, vol. 101, pp. 102-115. doi: 10.1016/j.isatra.2020.01.011

Харисов И.Р., Карякин А.Л. Законы и способы управления тяговым усилием электроприводов магистрального // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 4(57). С. 60-68. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-60-68](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-60-68)

Kharisov I.R., Karyakin A.L. Principles and Methods of Electric Power Drive Traction Control in Electric Locomotive. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 4(57), pp. 60-68. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-60-68](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-60-68)