

Марус Виктор Александрович,

студент,

ФГБОУ ВО

«Брянский государственный

университет»

Россия, г. Брянск

vitya.marus.01@mail.ru

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛОКОМОТИВА С ЗАЩИТОЙ ОТ БОКСОВАНИЯ

Аннотация. Статья посвящена разработке системы управления тяговым электроприводом локомотива путем стабилизации скорости движения тепловоза, включающая в себя тяговую, тормозную и противобуксовочную системы. Для соответствия проектируемого электропривода современным требованиям, предъявляемым к железнодорожному транспорту, произведен обзор и анализ технической литературы, основанной на новейших изобретениях в области электроприводов, государственных и отраслевых стандартов.

Статья содержит: обзор тяговых систем тепловозов, разработка новых и анализ имеющихся моделей многофазных генераторов, разработку упрощенной модели механической части системы, разработку системы управления стабилизации скорости движения тепловоза с учетом процессов торможения и переходом системы во вторую зону, разработку противобуксовочной системы и моделирование предложенных систем с целью оценки их работоспособности.

Ключевые слова: (электропривод, боксование, система управления, локомотив, скольжение).

Viktor Aleksandrovich Marus,
student,
Federal State Budgetary
Educational Institution of
Higher Education
"Bryansk State
University"
Russia, Bryansk
vitya.marus.01@mail.ru

LOCOMOTIVE TRACTION ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEMS WITH ANTI-SKIP PROTECTION

Abstract. *This article discusses the development of a locomotive traction electric drive control system for stabilizing the locomotive's speed, including traction, braking, and anti-skid systems. To ensure the designed electric drive meets modern rail transport requirements, a review and analysis of technical literature based on the latest inventions in electric drives, as well as national and industry standards, was conducted. The article includes: a review of diesel locomotive traction systems, the development of new and analysis of existing multiphase generator models, the development of a simplified model of the mechanical portion of the system, the development of a control system for stabilizing the speed of a diesel locomotive, taking into account braking processes and the system's transition to the second zone, the development of an anti-skid system, and modeling of the proposed systems to evaluate their performance.*

Keywords: *(electric drive, slip, control system, locomotive, slip).*

Введение

Одним из наиболее востребованных видов транспорта, используемого для перевозки грузов и пассажиров, является железнодорожный транспорт.

Для Российской Федерации, в связи с ее территориальными особенностями, характерна высокая протяженность железнодорожных путей и, не смотря на постоянное развитие инфраструктуры, некоторые участки остаются не электрифицированными. Наиболее ярким представителем таких участков является Байкало-Амурская магистраль, общей протяженностью 4300 км. Парк ЖД техники, эксплуатируемой, на данной магистрали включает в себя как начинающие устаревать серийные тепловозы, так и образцы сравнительно новых линеек, предназначенные для вождения поездов повышенной массы. Не смотря на высокий уровень автоматизации системы управления, доля вовлеченности машиниста в процесс ведения поезда остается высокой, что негативным образом сказывается на объемах и качестве перевозок, а также снижает безопасность процесса транспортировки вследствие влияния человеческого фактора.

Таким образом, актуальной темой является модернизация существующих и разработка новых систем автоматического управления железнодорожным транспортом с целью снижения влияния человеческого фактора и оптимизации процесса транспортировки. Учитывая широкое применение в роли тяговых двигателей тепловозов (далее – ТЭД) асинхронных машин переменного тока, обусловленное рядом их особенностей, особое внимание стоит обратить на систему управления скоростью тепловозов с передачей переменного-постоянного тока.

В настоящей работе представлена разработка системы автоматического управления скоростью движения магистрального шестиосного тепловоза.

АЛГОРИТМ ЗАЩИТЫ ОТ БОКСВАНИЯ

Для пояснения функционирования, разработанного алгоритмов необходимо предварительно кратко остановиться на возникновении и

приближенном математическом описании изменения сцепления и тяговых (тормозных) усилий в ТЭП при боксовании.

В тяговом приводе локомотива всегда присутствует контакт "колесо-рельс". Именно в нем происходит реализация тормозных и тяговых усилий.

Сила тяги реализуется посредством взаимодействия колес и рельсов, результат этого взаимодействия количественно выражается коэффициентом сцепления, обозначаемым в технической литературе символом ψ .

$$F_k = \psi \cdot N \quad (1)$$

Коэффициент сцепления ψ устанавливает связь между силой сцепления колеса F_k , обеспечивающей перемещение локомотива по рельсам, и вертикальной нагрузкой колес N [1;2]:

Происходящие в контакте колесо-рельс процессы очень сложны, зависят от множества факторов и плохо поддаются точному аналитическому описанию. Но для исследования алгоритмов управления ТЭП локомотивов в режиме реализации предельных усилий важно, что в результате фундаментальных теоретических [30-34], а также экспериментальных исследований [35,36] математически описано движение колеса при малых проскальзываниях, а также получены экспериментальные и приближённые аналитические зависимости коэффициента сцепления от проскальзывания колес, называемые характеристиками сцепления (или кривыми сцепления).

Положение рабочих точек в различных режимах работы ТЭП проиллюстрированы на характеристике сцепления (рисунок 1) [2;37].

Приведенная характеристика является усредненной, в реальных условиях она имеет стохастический разброс (рисунок 2) [36], кроме того, крутизна ее восходящего и падающего участков зависит от состояния рельсов [27]. Однако усредненная характеристика (рисунок 1) хорошо отражает суть процессов и поясняет связь между коэффициентом сцепления ψ и скоростью проскальзывания колеса в продольном направлении $v_{ск}$. В данном случае коэффициент сцепления выражен в относительных единицах:

$$k = \frac{\psi}{\psi_0} \quad (2)$$

где:

k – относительный коэффициент сцепления (в относительных единицах);

ψ_0 – потенциальный коэффициент сцепления, то есть, максимально возможный в заданных условиях движения (погодных, производственных и др.).

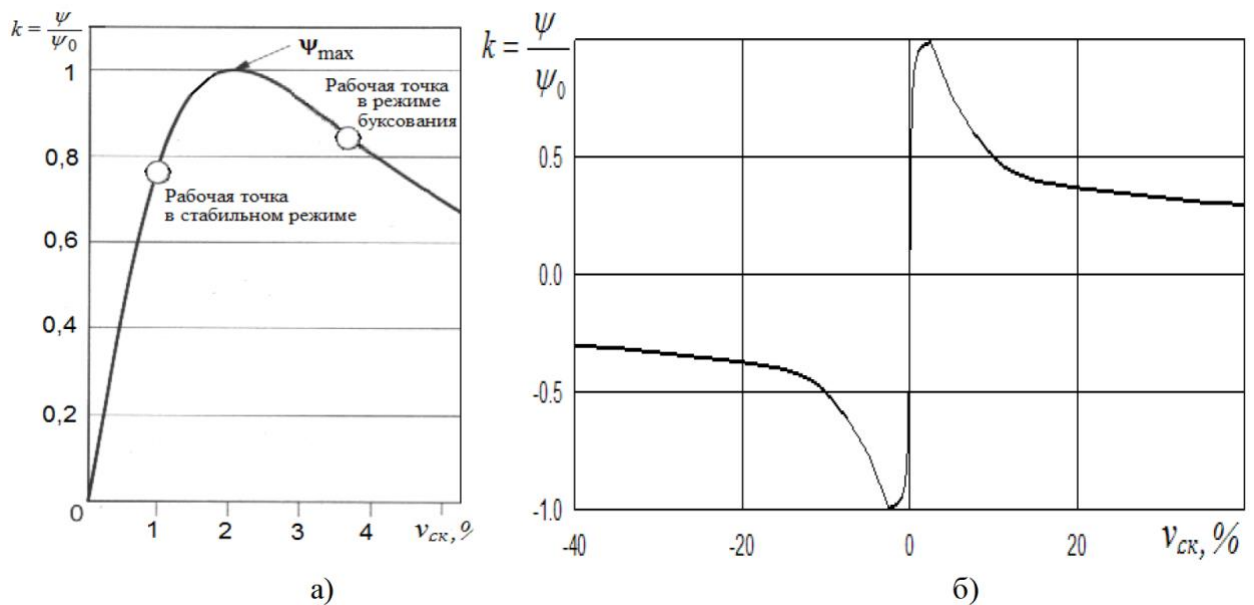


Рисунок 1. Характеристика сцепления: а – в режиме тяги с различным расположением рабочих точек ТЭП; б – в режимах тяги и торможения

В продольном направлении скорость проскальзывания колеса может выражаться как в абсолютных единицах, так и в процентах. Скорость проскальзывания в процентах определяется по формуле 3.

$$v_{ск\%} = \frac{v_k - v_l}{v_l} \cdot 100\% \quad (3)$$

где:

v_k – скорость линейная точки на ободу колеса (далее скорость колеса);

v_l – скорость линейная локомотива.

На рисунке 1а изображена характеристика сцепления для режима тяги, в котором для реализации тягового усилия скорость колеса должна быть немного больше скорости локомотива (первый квадрант координатной плоскости). В режиме торможения скорость колеса должна быть немного меньше скорости локомотива, при этом характеристика имеет аналогичный вид, но расположена в третьем квадранте (рисунок 1б). При увеличении скорости проскальзывания до критического значения (на рисунке 1а это $v_{ск} = 2,5 \%$) коэффициент сцепления достигает максимума и становится равным потенциальному коэффициенту сцепления ψ_0 ($k=1$; $\psi = \psi_0$), а реализуемое колесом тяговое усилие становится предельным по условию сцепления.

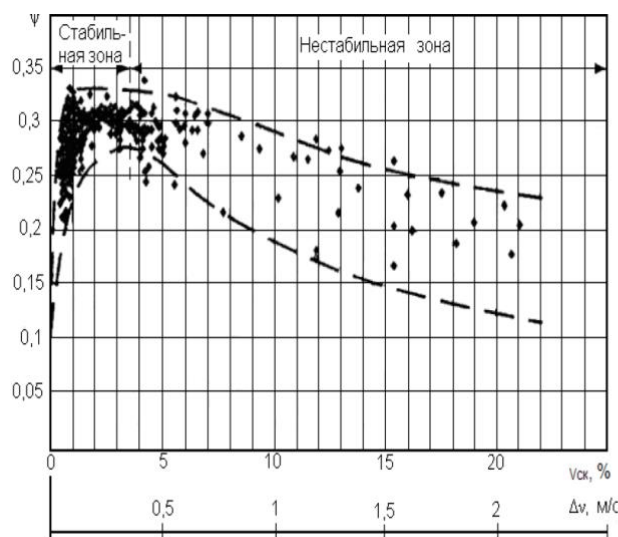


Рисунок 3 - Изменение значения коэффициента сцепления

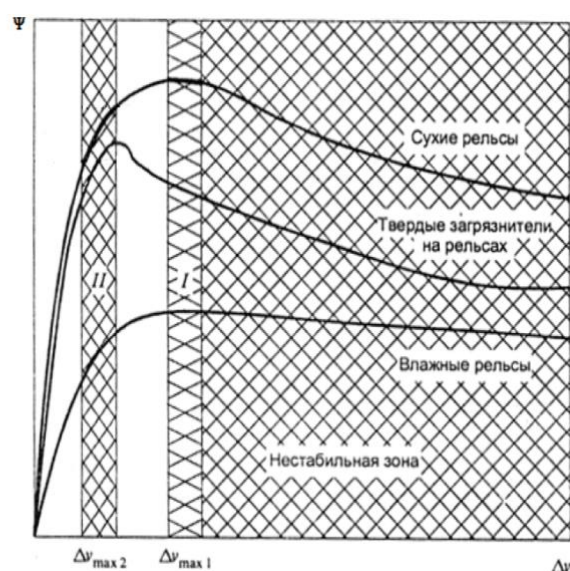


Рисунок 2 – Вид характеристики сцепления для различного состояния рельсов

При дальнейшем увеличении проскальзывания рабочая точка смещается на падающий участок в зону буксования (рисунок 1а). Этот участок характеристики имеет отрицательную крутизну, то есть отрицательное гашение колебаний [28], и является нестабильным.

Поэтому динамические режимы работы ТЭП можно классифицировать следующим образом в зависимости от положения рабочей точки [28]:

– квазистационарные режимы – это режимы тяги или торможения, в которых рабочая точка находится на восходящем участке (стабильная зона, стабильные режимы);

– нестационарные режимы – это режимы тяги или торможения, в которых рабочая точка находится на падающем участке (нестабильная зона, нестабильные режимы, т.е., режимы боксования и юза);

– режимы реализации предельных тяговых усилий – это режимы работы вблизи максимума характеристики сцепления (или минимума в режиме торможения). В процессе флуктуаций из-за динамических явлений в ТЭП рабочая точка попеременно попадает и в восходящую, и в нисходящую область графика.

Увеличение вертикальной нагрузки N , передаваемой от колеса локомотива на рельс, повышает предельно возможные тяговые усилия, но ограничивается динамическим воздействием на путь. Кроме того, работа тяговых двигателей, - создаваемые ими электромагнитные моменты, - вызывают перераспределение вертикальных нагрузок осей (и колес), которое существенно зависит от конструкции механической части [2;18]. Поэтому первой достигает предельного сцепления менее нагруженная ось при одинаковом значении электромагнитных моментов двигателей. В то же время у осей с большей вертикальной нагрузкой еще остается запас по сцеплению, и их тяговые возможности используются не полностью.

Необходимо, чтобы система управления удерживала ТЭП вблизи максимума характеристики (рисунки 1-3) для каждой оси, не слишком «заезжая» при этом на падающий участок. Это весьма сложно и требует совершенства СУ ТЭП, учитывая случайный разброс значений коэффициента сцепления (рисунок 2); неравномерность нагрузок осей; различие диаметров колёс; различие параметров тяговых двигателей; динамические колебания звеньев МЧ; изменение погодных условий и загрязнений рельсов (рисунок 3); неровности.

Тяговые двигатели могут получать питание от общего преобразователя частоты, (рисунок 4), например, АД каждой из тележек электровоза подключены попарно к одному автономному инвертору напряжения (АИН) и имеют в каждый момент времени одинаковую частоту и напряжение (совместное или групповое регулирование) [5;42].

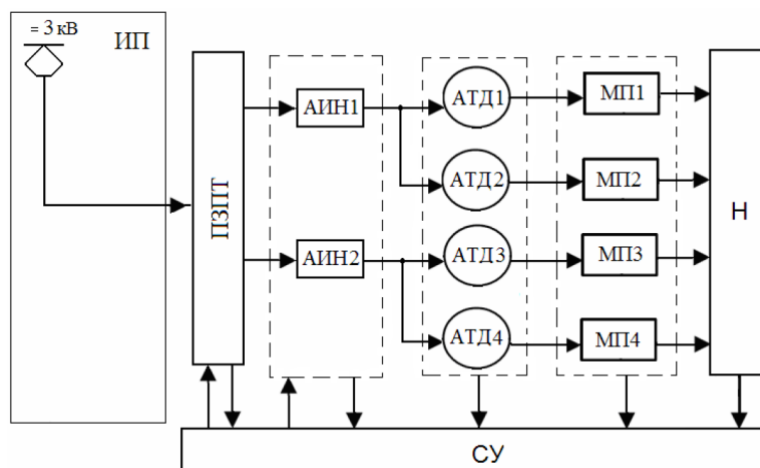


Рисунок 4. Схема функциональная для ТЭП электровоза с совместным (потележечным) регулированием АД

В данной работе принят термин «совместное регулирование» (а не групповое), чтобы не возникало путаницы с понятием «групповой привод», в котором все исполнительные механизмы приводятся в движение одним общим двигателем через свои механические передачи. Совместное регулирование АД тележек (потележечное) широко применялось в ТЭП первых зарубежных и отечественных локомотивов, и в настоящее время также находит применение (отечественные маневровые тепловозы ТЭМ21, ТЭМ9Н, магистральный электровоз ЭП10, зарубежные локомотивы SD60MAC, F69PH, E402 и др.). Возможно также совместное регулирование всех двигателей локомотива (например, на электровозе DE1003 параллельно к одному АИН подключены АД всех четырех осей). При совместном регулировании весьма сложно обеспечить максимум характеристики сцепления, так как невозможно отдельно регулировать каждый тяговый двигатель.

Для улучшения показателей СУ ТЭП и тяговых качеств наряду с совместным регулированием широко применяется индивидуальное регулирование осей, когда каждый двигатель питается от своего инвертора (рисунок 5).

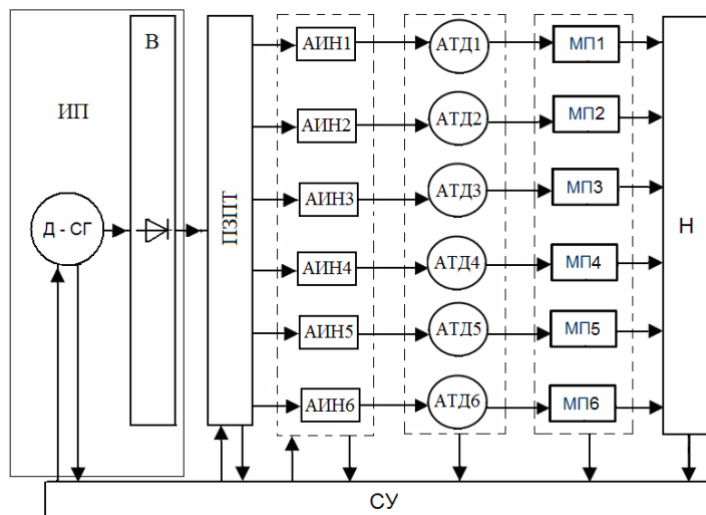


Рисунок 5. Схема функциональная для ТЭП тепловоза с индивидуальным регулированием АД

Упомянутый выше способ регулирования взят за основу для разработки системы управления в данной работе, как наиболее надежный.

Такое регулирование применено, например, на отечественных тепловозах 2ТЭ25А, электровозах ЭП20, 2ЭС10, 2ЭВ120, зарубежных локомотивах SD70MAC; E412 и др.

Из отечественных локомотивов возможность индивидуального регулирования двигателей последовательного возбуждения в нестационарных режимах предусмотрена только на тепловозах 2ТЭ25К путем подключения каждого двигателя к индивидуальному тиристорному управляемому выпрямителю и изменения защитой от буксования напряжения на буксующих двигателях по определенному алгоритму [15;16].

Система защиты от буксования начинает функционировать только после обнаружения буксования. Обнаружение буксования может осуществляться следующими способами:

1. По изменению электромагнитных величин буксующих двигателей, в зависимости от схемы СУ могут анализироваться токи машин, э.д.с., производные этих величин и др., и, по их изменению, а также сравнению для разных двигателей делаются выводы о возникновении буксования [5;7;9;10;11].

2. По изменению скорости роторов и её производных [8;15-18] или по изменению скорости проскальзывания колес [12;13;14;19-22].

3. По усилению вибраций в тяговой передаче в определённых частотных диапазонах [23-26].

Возможны также следующие комбинации сочетание перечисленных выше способов: 1 и 3; 2 и 3 [28;29].

Если процесс буксования вовремя не обнаружен и не остановлен и уже достаточно развился, то возникает ощутимое снижение тяговых (или) тормозных усилий. На локомотивах, у которых системы защиты от буксования не обладают требуемым быстродействием и допускают развитие процесса, опытные машинисты по возникающей вибрации или колебаниям показаний амперметра могут подсыпать песок или уменьшать усилие тяги.

Поэтому, самыми простыми, хотя и весьма грубыми способами защиты от буксования являются дозированная подсыпка песка под колеса (или другого мелкодисперсного абразива, повышающего сцепление) и сброс позиций контроллера машиниста (или отключение двигателей). Однако, при неблагоприятном сочетании факторов свободное развитие буксования за 1,6 – 2,5 с может привести к недопустимым динамическим нагрузкам и поломкам в тяговой передаче [2;28-30].

ОПИСАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ

Перед началом разработки системы, включающей в себя определение буксования и защиты от нее, необходимо произвести моделирование тягового электропривода локомотива без нее, для оценки показателей и необходимости

применения защиты от буксования. Модель системы управления тяговым электроприводом локомотива представлена на рисунке 6. На рисунке 6 представлена функциональная схема системы управления ТЭП без защиты от буксования и её модель, реализованная средствами SimInTech (рисунок 7).

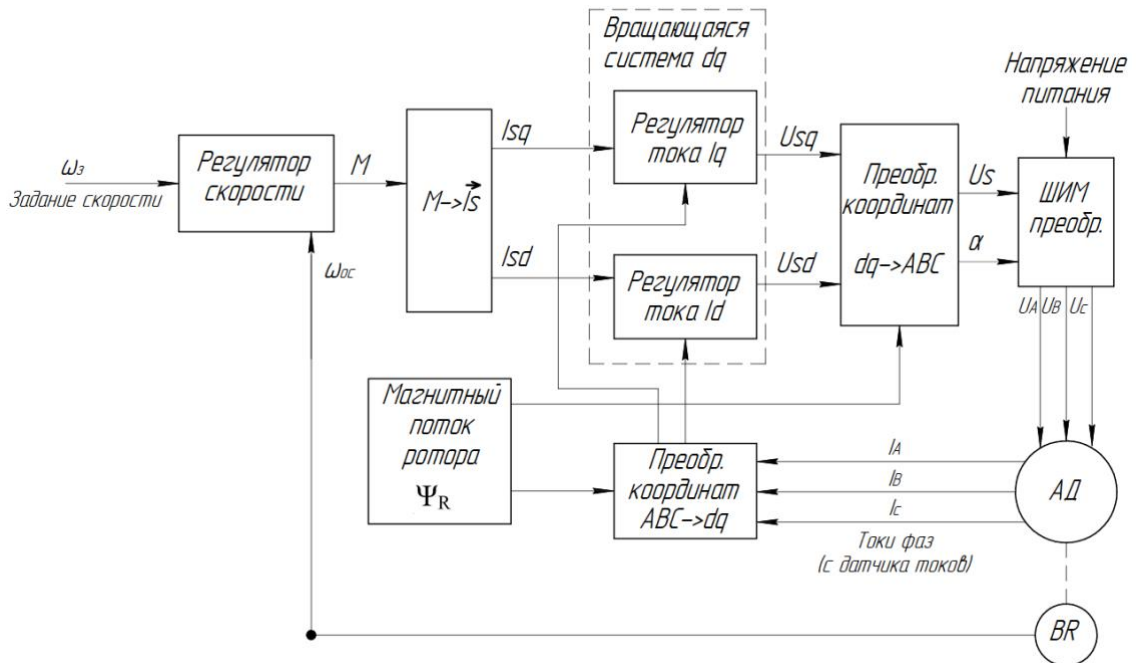


Рисунок 66. Модель системы управления тяговым электроприводом локомотива без учета защиты от буксования

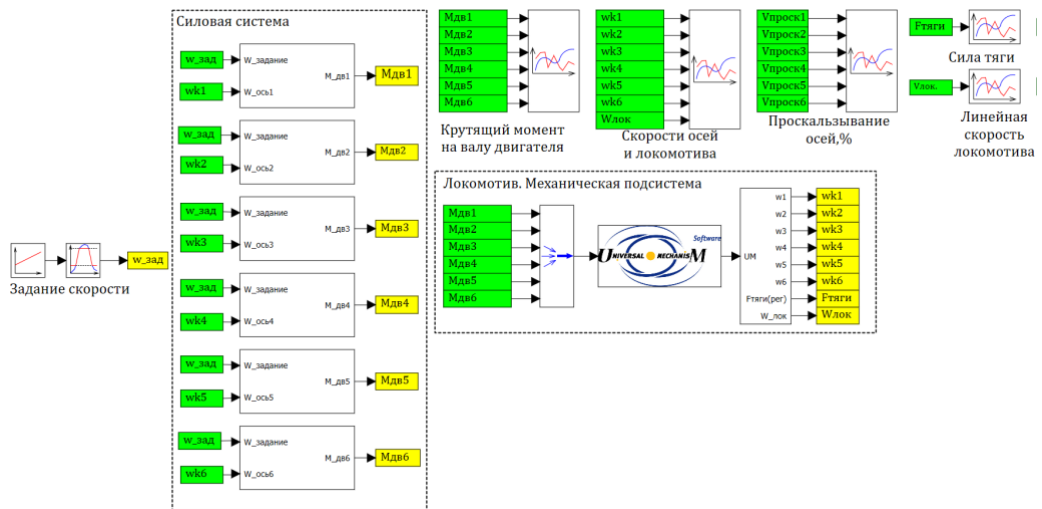


Рисунок 7. Модель системы управления тяговым электроприводом локомотива без учета защиты от буксования

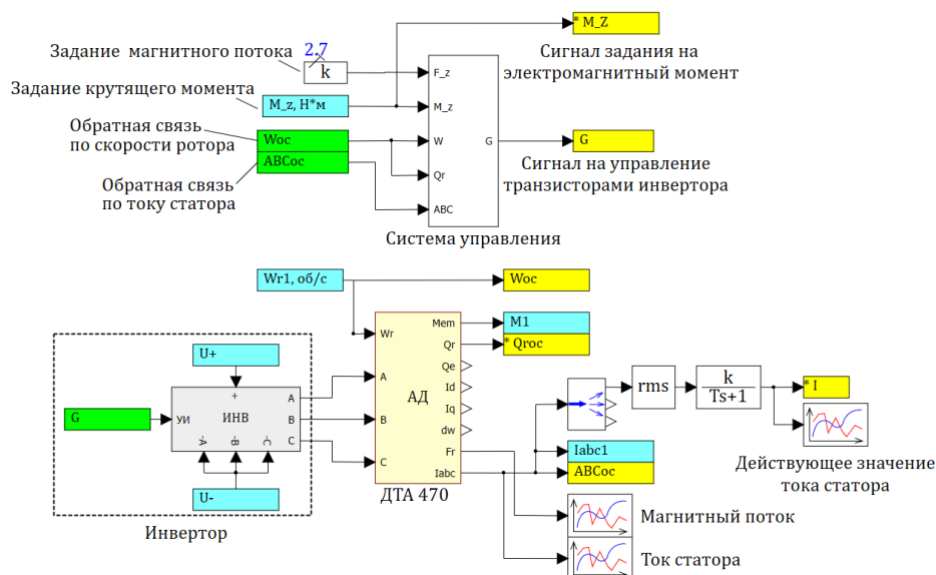


Рисунок 8. Структура подсистемы «Силовая система»

Представленная на рисунке 8 силовая подсистема включает в себя следующие блоки:

- модель двигателя ДТА 470;
- блок «Инвертор»;
- подсистему «Система управления».

Описание и принцип работы указанных блоков описан ниже.

Для преобразования питающего напряжения асинхронного двигателя используется инвертор, который в зависимости от сигнала, поступающего на порт «УИ», осуществляет в определенном порядке коммутацию входящих в него транзисторов.

Применение инвертора обусловлено требованием к обеспечению оптимального питающего напряжения в зависимости от нагрузки двигателя, что так же позволяет поддерживать оптимальным намагничивания статорной обмотки электродвигателя.

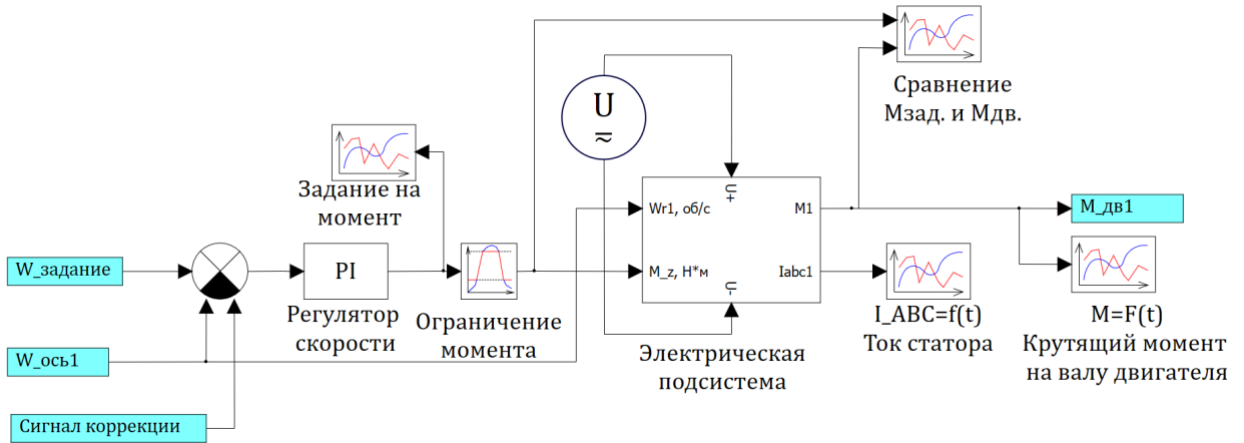


Рисунок 97. Структура блока «Система управления»

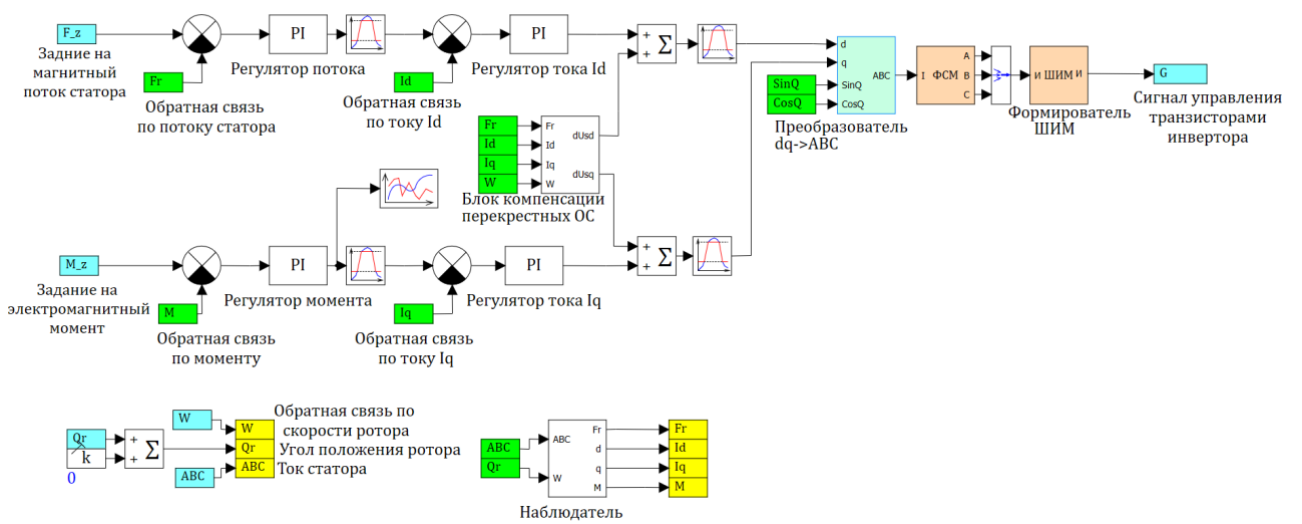


Рисунок 80. Структура блока «Электрическая подсистема»

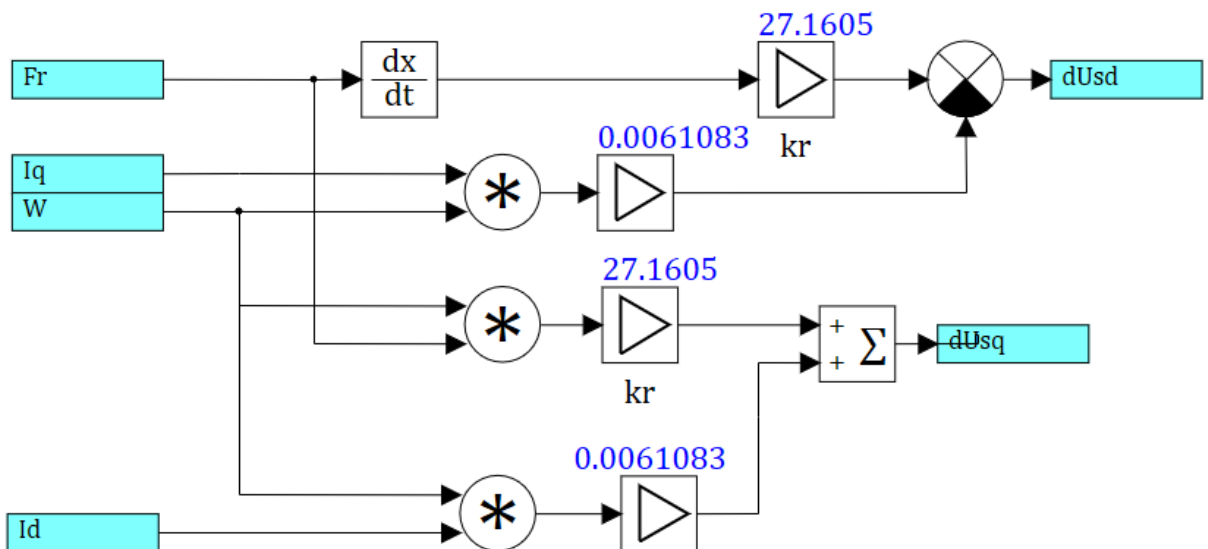
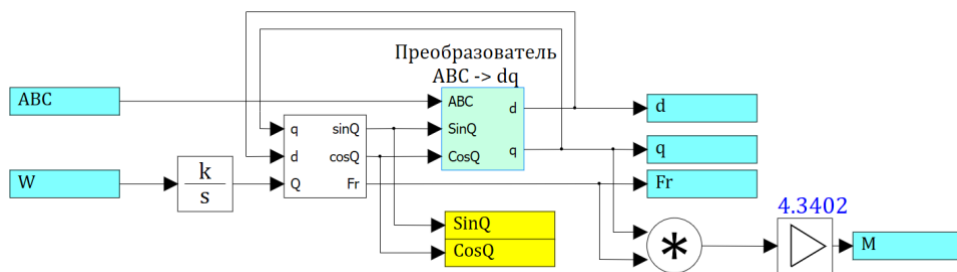


Рисунок 119. Структура блока "Блок компенсации перекрестных обратных связей"

Скомпенсированные выходные сигналы, после регуляторов токов, поступают на координатный преобразователь $dq \Rightarrow ABC$, формирующий задание на фазные напряжения ABC . Формирователь ШИМ представляет из себя два блока, представленных в библиотеке «Электроприводы» и используется для обработки сигналов задания фазных напряжений и управления ключами инвертора. В качестве сигналов обратных связей для всех контуров управления используются оценочные значения, получаемые путем расчета по известным параметрам схемы замещения двигателя и величинам, поддающимся прямому измерению: фазным токам и углу поворота ротора. Компенсационные составляющие в блоках компенсации перекрестных связей зависят от скорости поля (ω_e). Если в системе есть датчик скорости ротора, то скорость поля рассчитывается по данным с этого датчика. Однако часто в электроприводах используются только датчики угла, а скорость ротора и скорость поля рассчитываются по информации с этих датчиков. При ориентировании оси d системы dq по потоку ротора блок осуществляет вычисление сигнала тока I_q по оси q соответствующее заданному момента двигателя M . Значение тока может вычисляться в абсолютных или относительных единицах.



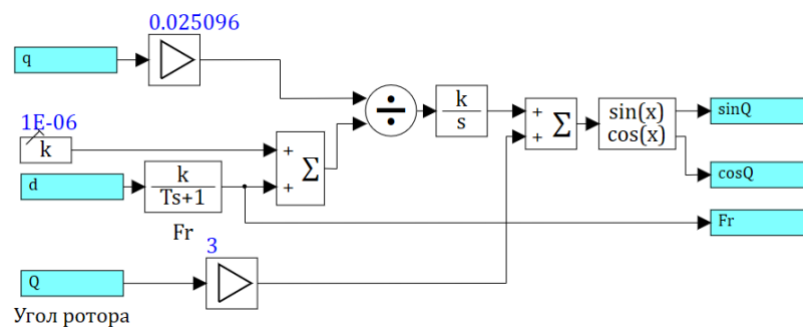


Рисунок 12. Структура блока "Наблюдатель"
Моделирование

Перед началом моделирования необходимо задать координаты начала и окончания масляного пятна, на которое будет наезжать локомотив, а также его протяженность и диапазон изменения значения коэффициента сцепления $k = \psi/\psi_0$ (значения коэффициента взяты с эмпирической зависимости (рисунок 1 и рисунок 2). Данное действия выполняется в механической подсистеме программного комплекса Universal Mechanism (рисунок 13).

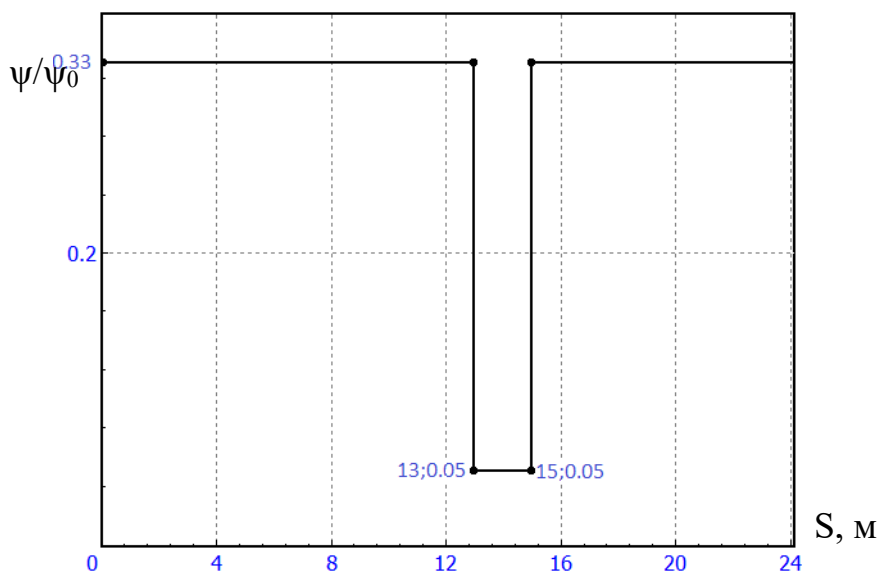


Рисунок 13. Изменение коэффициента сцепления

На рисунке 13 изображена зависимость коэффициента сцепления ψ/ψ_0 от пройденного пути S.

Таблица 1. Зависимость коэффициента сцепления ψ/ψ_0 от пройденного пути

Путь S	Значение ψ/ψ_0
от 0 до 13 м	0,33
от 13 до 15 м	0,05
от 15 до 80 м	0,33



Рисунок 14. График угловых скоростей $\omega=f(t)$

На рисунке 14 продемонстрированы графики угловых скоростей приводных колесных пар (осей) локомотива и приведенная к угловой, линейная скорость локомотива для более наглядного анализа.

Анализируя представленный, выше график можно заметить, как локомотив поочередно наезжает осями на масляное пятно, о чем свидетельствует резкое увеличение скорости осей.

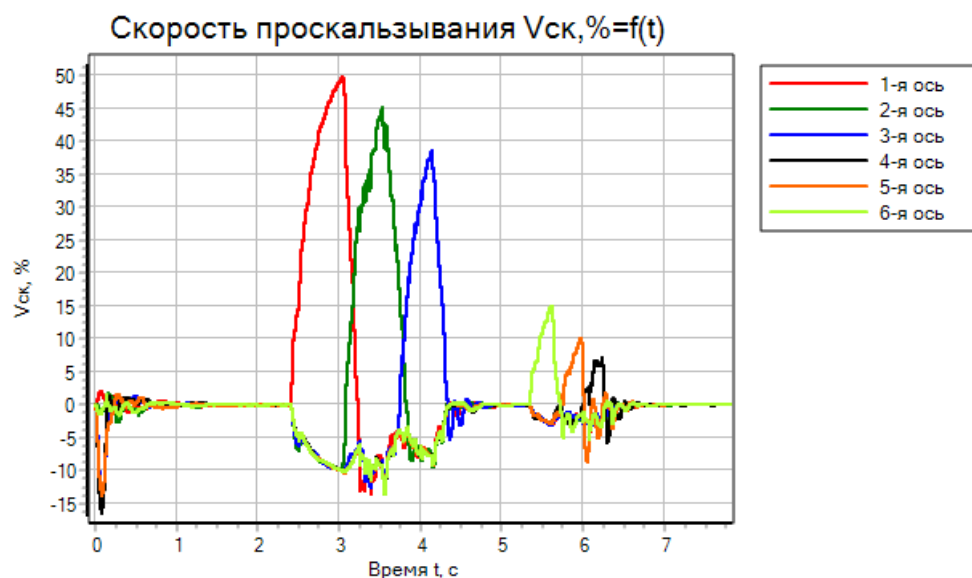


Рисунок 15. График скорости проскальзывания осей локомотива

$$v_{ск}, \% = f(t)$$

Проведя сравнительный анализ графиков скорости проскальзывания осей локомотива, представленных на рисунке 15 с графиками с представленным на рисунках 1 и 2, демонстрирующими зависимость скорости проскальзывания от коэффициента сцепления можно сделать вывод о том, что при заданном изменении коэффициента сцепления (таблица 1), имитирующем наезд на масляное пятно, локомотив находится в нестабильной зоне, что в свою очередь может привести к срыву сцепления.

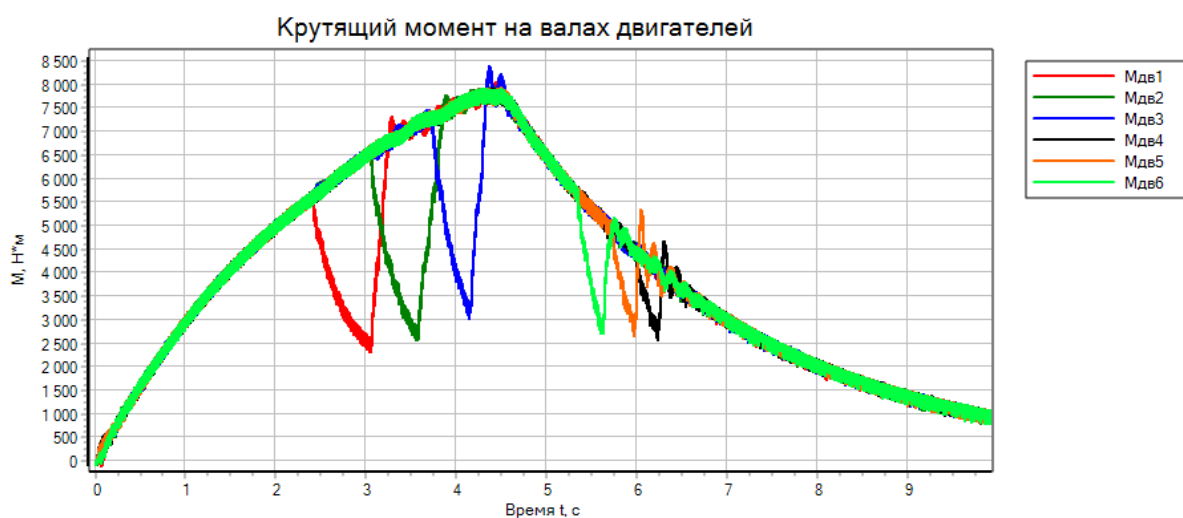


Рисунок 16. График крутящего момента на валах приводных двигателей

$$M = f(t)$$



Рисунок 17. График ускорения локомотива $a=f(t)$

Моделирование тягового электропривода локомотива с защитой от боксования

Для минимизации боксования приводных осей локомотива в представленную выше модель (рисунок 6) необходимо интегрировать регулятор, позволяющий на основании полученного сигнала обратной связи по скорости от приводных двигателей нивелировать разницу скоростей путем корректировки задания на скорость поступающего в систему управления.

На рисунках 18 и 19 представлена функциональная схема системы управления ТЭП с учетом регулятора защиты от боксования и её модель, реализованная средствами SimInTech.

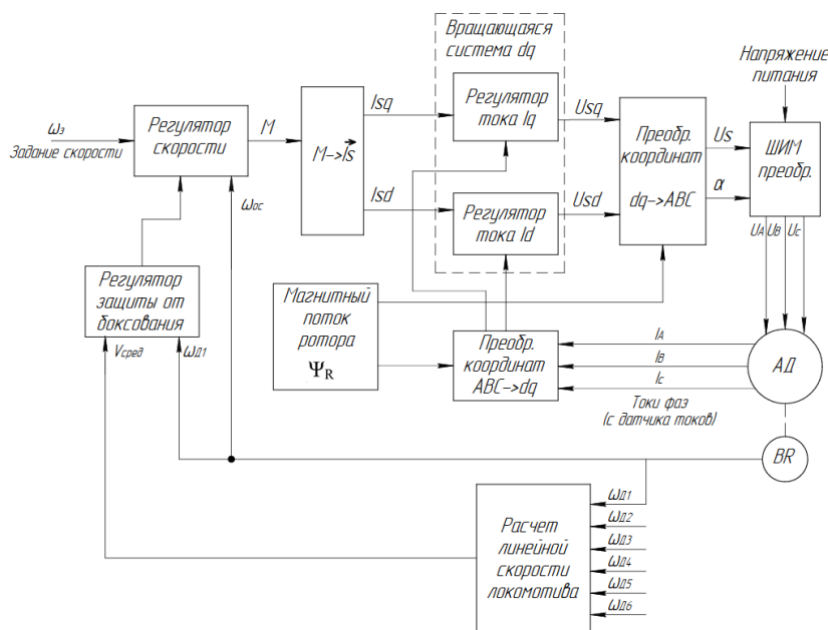


Рисунок 18. Функциональная схема системы управления тяговым электроприводом локомотива с учетом защиты от боксования

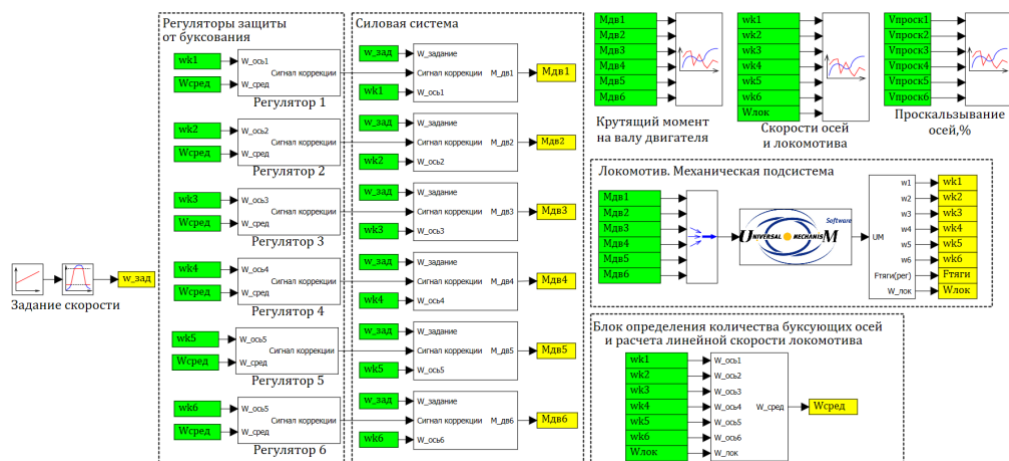


Рисунок 19. Модель системы управления тяговым электроприводом локомотива с учетом защиты от боксования реализованная средствами SimInteh

Алгоритм определения проскальзывающей колесной пары

Опираясь на изложенный выше материал, в данной работе были приняты следующие:

- метод определения боксования: расчет угловых скоростей роторов тяговых двигателей;
- способ защиты от боксования:

В процессе движения локомотива по железный дорого довольно часто возникают ситуации, при которых коэффициент сцепления приводных колес с рельсом уменьшается, что приводит к их боксованию, а также к износу. Для предотвращения подобных ситуаций был разработан, позволяющий определить не только момент боксование, но и количество боксующих и небоксующих колес, а также расчет усредненной линейной скорости локомотива на основании сигнала обратной связи по скорости от небоскующих колес.

Данный алгоритм, позволяет определить не только боксующуи оси, но и небоксующую, на основании которых происходит расчет линейной скорости локомотива.

Для реализации данного алгоритма необходимо знать угловую скорость приводных ТЭД, а также линейную скорость локомотива.

Определение линейной скорости локомотива можно реализовать несколькими способами. В настоящее время существует ряд способов определения линейной скорости локомотива осуществляется таких как:

- применение бегунковых колесных пар;
- с помощью коротковолнового радара;
- с использованием эффекта Доплера;
- средствами системы глобального позиционирования и др.

У перечисленных выше способов определения линейно скорости локомотива есть как преимущества, так и недостатки, связанные со сложностью реализации алгоритма работы, точностью сигнала и экономической выгоды.

Стоит отметить, что перечисленные выше методы определения линейной скорости движения локомотива не всегда являются удовлетворительными, так как системы, основанные на радиолокационных методах наиболее эффективны при достижении некоторой пороговой скорости движения, а методы спутниковой навигации могут давать значительные погрешности при неблагоприятных погодных условиях. Еще одним методом вывода состава из буксования является ориентация на среднюю частоту вращения валов двигателей всех тяговых электродвигателей, либо на средний ток якорных цепей. Однако такие методы при их «грубой» реализации дают погрешность, так как при последовательном уходе всех осей тепловоза в буксование среднее значение параметров тоже изменяется. Поэтому, при расчете среднего значения, необходимо исключение ТЭД ушедшей в буксование оси из расчета эквивалентного значения, в случае же высоких скоростей движения состава, буксующая ось может «не успеть» выйти из неблагоприятного режима до ухода в буксование последующих колесных пар, что накладывает требование высокого быстродействия системы. Для решения этой проблемы введем дополнительное эквивалентное значение частоты вращения, полученное расчетным путем на основе усредненного значения частоты вращения небоксующих осей.

В данной работе реализован следующий алгоритм выполняемый блоком «Блок определения количества небоксующих осей и расчета линейной скорости» (рисунок 20) определения линейной скорости локомотива и формирование на ее основе сигнала для регулятора скорости.

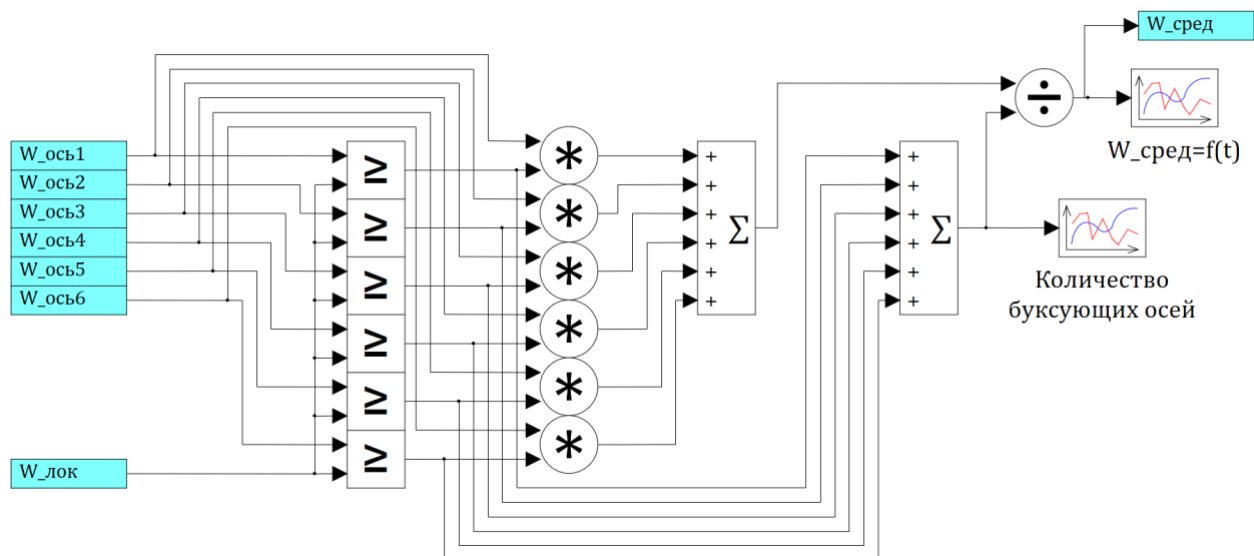


Рисунок 20. Структура «Блок определения количества буксующих осей и расчета линейной скорости локомотива»

Представленный на рисунке 20 алгоритм работает следующим образом:

- посредством датчиков скорости определяется скорость приводных двигателей шести колесных пар;
- сигнал обратной связи по скорости сравнивается сигналом задания на скорость ТЭД, а также с линейной скоростью локомотива.
- после сравнения определяется количество буксующих ТЭД;
- скорости небуксующих ТЭД складываются и делятся на их количество, тем самым определяя линейную скорость локомотива.

Особенностью такого алгоритма является то, что при расчете линейной скорости локомотива используются сигналы только небуксующих колес

Таким образом в СУ поступает сигнал о линейной скорости локомотива, полученный косвенно, путем анализа скоростей небуксующих ТЭД.

В процессе моделирования сигнал скорости $W_{\text{сред}}$ поступает на «Регулятор защиты от буксования» (рисунок 21).

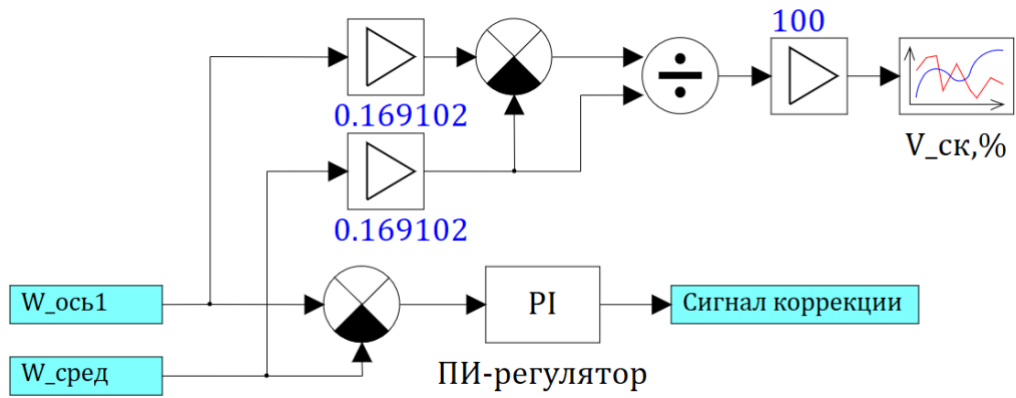


Рисунок 21. Структура «Регулятор защиты от боксования»

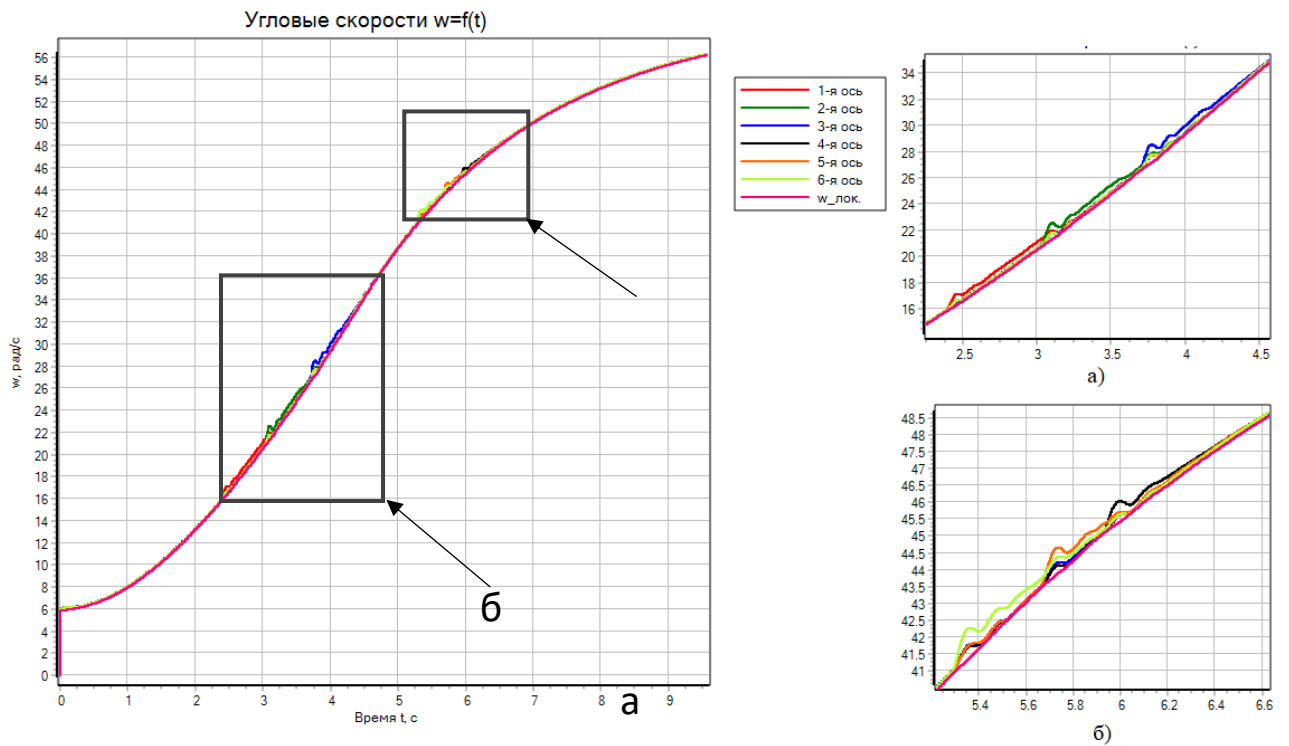


Рисунок 22. Угловые скорости роторов двигателей $w=f(t)$

Анализируя графики представленные на рисунке 22 можно заметить, что после внедрения в систему управления тяговым электроприводом локомотива регулятора защиты от боксования значительно уменьшился скачок скорости при наезде на масляное пятно.



Рисунок 23. Угловые скорости роторов двигателей $w=f(t)$

На рисунке 23 представлен график зависимости проскальзывания в процентной составляющей. Анализируя данный график можно заметить, что проскальзывание при наезде на масляное пятно не превышает 2,6%, что свидетельствует о том, что движение происходит в «стабильной зоне» (см. рисунок 2).

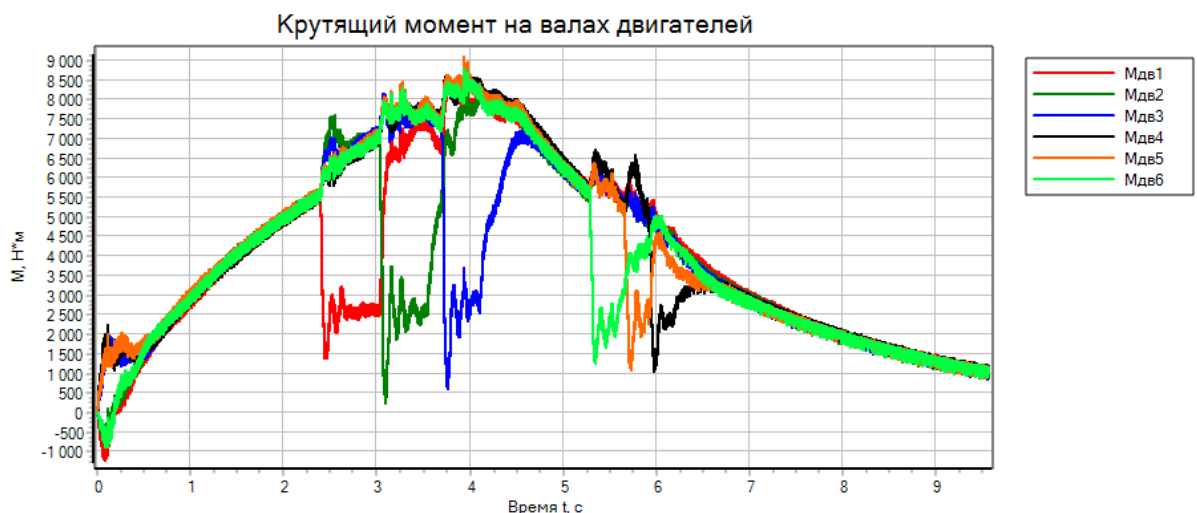


Рисунок 24. График крутящего момента на валах приводных двигателей

$$M=f(t)$$

Заключение

В данной работе была реализована разработка системы управления шестиосным тепловозом, включающей в себя алгоритм, обеспечивающий определение проскальзывающих колесных пар, расчет усредненной линейной скорости локомотива, а также регулятор, позволяющий на основании полученных данных от сигналов обратной связи по скорости приводных двигателей скорректировать их регуляторы скоростей для минимизации проскальзывания в контакте колесо-рельс.

Проведя исследование существующих методов и способов защиты тепловоза от боксования был осуществлен выбор алгоритма, применение которого удовлетворяет требуемым показателем качества управления.

Моделирование системы управление, так же силовой части электропривода было реализовано в программном комплексе SimInTech, а механической подсистем тепловоза - в Universal Mechanism.

Анализируя полученные в процессе моделирования результаты можно сказать, что разработанная система управления с внедренным регулятором защиты от боксования полностью функционирует и достаточно корректно определяет момент начала боксования приводных колесных пар и своевременно корректирует сигнал задания на скорость тяговых двигателей для уменьшения проскальзывания.

Литература:

1. Розенфельд, В.Е. Теория электрической тяги/В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров. Теория электрической тяги. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
2. Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей. - М.: Транспорт, 1965. - 267 с.

3. Ротанов Н.А., Курбасов А.С., Быков Ю.Г., Литовченко В.В. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями/ под ред. Н.А. Ротанова. - М.: Транспорт, 1991. - 336 с.

4. Стрекопытов В.В., Пушкарев И.Ф., Русаков Ю.М. Перспективы автоматизации контроля и управления тепловозов на базе микроЭВМ// Пробл. развития тепловозостроения: Науч. труды Всесоюз. н.-и. ин-та ж.-д. транспорта. - Коломна: ОНТИ, 1983. - Вып. 57. - С. 121-123. 11. Перегудов Ю.М. Исследование методов повышения коэффициента тяги тепловозов с электрической передачей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Коломна, 1971. - 19 с.

5. Шаров В.А. Исследование электромагнитных переходных процессов в силовых цепях асинхронного тягового привода электрического локомотива: Дис. ... канд. техн. наук.- М: МИИТ, 1981. – 180 с.

6. Вилькевич Б.И. Автоматическое управление электрической передачей и электрические схемы тепловозов/ Б.И. Вилькевич – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.

7. Бурков А.Т. Управление электроэнергетическими процессами локомотивов с асинхронным приводом: Дис. ... д-ра техн. наук.- Л., 1982.- 470 с.

8. Егоров А.Т., Бородай В.П., Перфилов А.А. Зарубежные локомотивы с асинхронным тяговым приводом// Железнодорожный транспорт. ОИ/ЦНИИТИ МПС. - 1996. - Вып.4. - С. 1 - 100.

9. Фаминский Г.В., Меншутин Н.Н., Филатова Л.М. Улучшение тяговых свойств электровозов при поосном регулировании силы тяги с контролем сцепления// Тр. Всесоюз. н.-и. ин-та ж.-д. транспорта. - М.: Трансжелдориздат, 1968. - Вып. 378. - С. 80-101.

10. Фаминский Г.В. Автоматические системы для повышения сцепления ко- лес локомотива с рельсами//Тр. ВНИИЖТ. Вып. 396. – М.: Трансжелдориздат.- 1974. – 135 с.

11. Клименко Ю.И. Раздельное регулирование тягового усилия обмоторенных осей тепловоз//Сб. научных трудов. – Санкт-Петербург: Из-во ПГУПС, 2003.- С. 86-91.

12. Киржнер Д.Л., Клименко Ю.И., Кулабухов А.С., Путинцев С.В. Тепловоз с высоким коэффициентом тяги// Труды ВНИТИ. – Коломна, 2004.- Вы- пуск 83. – С. 15 – 24.

13. Федяев В.Н. Влияние электрической и механической подсистем магистрального тепловоза на реализацию предельных тяговых усилий: Дис. ... канд. техн. наук. – Брянск: БГТУ, 2006. – 129 с.

14. Павленко А.П., Павленко А.А., Павленко В.А., Кийко А.И. Микропроцессорная система предупреждения боксования и юза локомотивов //Вест. Восточноукр. национального университета. Технические науки. Ч. 2. – Луганск: Изд-во ВНУ, 2002 , № 6. - С. 39-43.

15. Павленко А.П., Павленко В.А., Касторный П.М., Кийко А.И. Результаты эксплуатационных испытаний микропроцессорной противобуксовочной системы локомотивов//Вест. Восточноукр. нац. ун-та. Технические науки. Ч. 2. – Луганск: Изд-во ВНУ, 2003, № 9. - С. 16-19.

16. Энгель Б. Регулирование тяги с высоким использованием сил сцепления// Железные дороги мира. - 1999.- № 2.- С. 39-45.

17. Федяева Г.А., Кобищанов В.В., Матюшков С.Ю., Тарасов А.Н. Моделирование системы управления тягой и торможением магистрального грузового тепловоза в программных комплексах Matlab и «Универсальный механизм»//Вест. Брянского техн. ун-та. - 2013. - № 3.- С. 147 – 151.

18. Матюшков С.Ю. Снижение автоколебаний в тяговой передаче грузового магистрального тепловоза при индивидуальном управлении асинхронны- ми электродвигателями: Дис. ... канд. техн. наук.- Брянск: БГТУ, 2013. – 19 с.

19. Johnson K.L. Tangential Traction and Microslip in Rolling Contact Phenome- na. - Amsterdam: Ed. by Bidwell Elsevier publishing Company, 1962. - P. 6-28.

20. Kalker J.J. Survey of wheel_rail contact theory/ Veh. Syst. Dyn.- 1979.- № 5.- P. 317-358.
21. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. -М.: Наука, 2001.- 478 с.
22. Исаев И.П. Случайные факторы и коэффициент сцепления. - М.: Транс- порт, 1970. - 184 с
23. Барский, М.Р., Серединова И.Н. Экспериментальное исследование процессов буксования и юза электровозов//Проблемы повышения эффективности работы транспорта. - М.: АН СССР, 1953. - Вып.1. С.130-180.
24. Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicle running on adhesion limit. Wear 258 (2005) 992–1000.
25. Кёрнер О. Сравнение концепций механической части трехфазного тягово- го привода// Железные дороги мира. - 2005. - № 9. - С. 31 - 41.
26. Павленко, А.П. Динамика тяговых приводов магистральных локомотивов/А.П. Павленко. - М.: Машиностроение, 1991. - 192 с.
27. Павленко А.П., Клипаков Н.В. Прогнозирование развития фрикционных автоколебаний в произвольных конструкциях тяговых приводов при бук- совании// Вестник Восточноукр. нац. ун-та. Технические науки. Ч. 1. – Лу- ганск: Изд-во ВНУ, 2005 - № 8.- С. 66-70.
- 28(38). Федяева Г.А. Прогнозирование динамических процессов при нестационарных и аварийных режимах тягового электропривода с асинхронными двигателями. Дис. ... докт. техн. наук.- Москва: МИИТ, 2008. – 341 с.
29. Ключев, В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
30. Конструкция, расчет и проектирование локомотивов/А. А. Камаев, Н. Г. Апанович, В. А. Кашев и др.; Под ред. А. А. Камаева. - М.: Машиностроение, 1981. - 351 с.