

**Брянский государственный технический университет**

*На правах рукописи*

Тарасов Алексей Николаевич

Управление асинхронными тяговыми электродвигателями тележки  
локомотива в предельных по сцеплению режимах движения

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
доцент Федяева Г.А.

Брянск 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
<b>РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЭП ЛОКОМОТИВОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ УСИЛИЙ.....</b>	<b>10</b>
1.1. Алгоритмы защиты от буксования и юза .....	11
1.2. Алгоритмы реализации потенциального коэффициента сцепления.....	31
1.3. Классификация алгоритмов управления ТЭП в режиме реализации предельных усилий и постановка задачи .....	39
<b>РАЗДЕЛ 2. СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЭП С СОВМЕСТНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ АД.....</b>	<b>42</b>
2.1. Способ и алгоритмы управления ТЭП гибридного тепловоза в режиме реализации предельных усилий.....	44
2.2. Математическое и компьютерное моделирование СУ ТЭП с совместным регулированием АД.....	55
2.3. Выводы по разделу 2.....	73
<b>РАЗДЕЛ 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ТЭП ГИБРИДНОГО ТЕПЛОВОЗА .....</b>	<b>74</b>
3.1. Упрощённое моделирование механической подсистемы ТЭП.....	74
3.2. Моделирование механической части гибридного тепловоза ТЭМ9Н с высокой степенью детализации .....	82
3.3. Выводы по разделу 3.....	93
<b>РАЗДЕЛ 4. КОМПЛЕКСНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЭП С СОВМЕСТНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ АД И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ УСИЛИЙ.....</b>	<b>94</b>
4.1. Создание комплексных моделей ТЭП с совместным регулированием АД.....	94
4.2. Предварительный анализ реализации предельных усилий на упрощенных моделях ТЭП .....	99
4.3. Исследование динамических процессов в ТЭП с совместным разрывным управлением АД при разгоне и торможении на пределе по сцеплению .....	104

<b>4.4. Выводы по разделу 4</b> .....	117
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	119
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	121
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> .....	135

## ВВЕДЕНИЕ

В целях обновления отечественного локомотивного парка правительством Российской Федерации намечены перспективы развития транспорта до 2030 года, принята Стратегия развития железнодорожного транспорта. Организация проектирования и выпуска в России локомотивов нового поколения с асинхронным тяговым приводом предусмотрена в рамках данной стратегии. Современные тепловозы и электровозы, оснащенные мощными асинхронными тяговыми двигателями (АТД), имеющими высокий номинальный электромагнитный момент, могут перевозить тяжеловесные составы и достигать в процессе работы предельных по сцеплению тяговых или тормозных усилий даже в хороших условиях сцепления. При этом скорость проскальзывания колес в контакте колесо-рельс увеличивается выше некоторого критического значения, и рабочая точка тягового электропривода (ТЭП) переходит в зону буксования (или юза), что может без применения специальных систем и алгоритмов управления ТЭП сопровождаться ухудшением тормозных и тяговых свойств, увеличением динамическими нагрузок и износа.

Изучением ТЭП с асинхронными двигателями (АД) как единой управляемой электромеханической системы занимались отечественные и зарубежные ученые: В.И. Андерс, Х.П. Бауэр, А.Т. Бурков, М. Бушер, Ю.И. Гусевский, А.А. Зарифьян, В.Л. Кодкин, П.Г. Колпахчян, Х.П. Котц, А.С. Курбасов, В.А. Кучумов, В.В. Литовченко, П.Ю., Петров, Е.М. Плохов, В.А. Пречисский, Г.А. Федяева, М. Флейшер, В.А. Шаров, Х.Ю. Шварц, В. Энгель и другие ученые.

Однако электропривод с совместным регулированием АТД в пределах тележки, параллельно подключенных к одному инвертору, пока исследован недостаточно и требует дальнейшей проработки.

**Актуальность темы.** В современном тяговом электроприводе отече-

ственных и зарубежных локомотивов широко внедряются двигатели переменного тока взамен традиционных коллекторных двигателей последовательного возбуждения. На мощных локомотивах с высоким использованием сил сцепления наибольшее распространение получил ТЭП с АД, - это электровозы 2ЭС10, ЭП20, тепловозы 2ТЭ25А, опытный электровоз 2ЭВ120.

Наибольшее использование сил сцепления, а, следовательно, и реализацию больших силы тяги и торможения удаётся достичь при отдельном регулировании каждого двигателя (поосном регулировании). Однако с учётом экономических факторов и удобства размещения в ряде случаев используют параллельное подсоединение двигателей тележки к общему инвертору (совместное регулирование). Тяговый электропривод с асинхронными двигателями ввиду ряда известных особенностей довольно сложен в управлении и в индивидуальном исполнении, а параллельное подключение двигателей дополнительно усложняет задачу.

Динамические и тяговые качества локомотивов с АД определяющим образом зависят от системы управления электроприводом. В то же время, из вышеперечисленных локомотивов только на тепловозе 2ТЭ25А применены отечественные алгоритмы регулирования ТЭП. Данные алгоритмы разработаны Всероссийским научно-исследовательским и конструкторско-технологическим институтом подвижного состава (ВНИКТИ). На российские электровозы интегрированы алгоритмы зарубежных фирм: Siemens, Alstom, Bombardier Transportation, являющиеся интеллектуальной собственностью этих фирм.

В современных условиях весьма актуально, наряду с внедрением импортных систем управления (СУ), создавать и совершенствовать с учетом мировых достижений собственные алгоритмы управления ТЭП, используя для их отработки, как уже имеющиеся образцы локомотивов, так и новые компьютерные технологии.

Для этих целей хорошо подходит четырехосный гибридный маневрово-

вывозной тепловоз ТЭМ9Н с совместным регулированием АД, разработанный в рамках пилотного проекта Людиновским тепловозостроительным заводом. На данном тепловозе применен комплекс технических решений в системе электропитания, снимающих ряд ограничений по управлению ТЭП по сравнению с обычным электроприводом тепловоза. Использование в системе электропитания аккумуляторной батареи с огромным энергозапасом (300 кВт\*часов) и суперконденсаторов дает возможность отойти от традиционного для тепловозов ступенчатого (позиционного) изменения мощности дизеля на тягу и обрабатывать алгоритмы регулирования ТЭП с АД, применимые как для тепловозов, так и для электровозов нового поколения.

**Цель диссертационной работы** – повышение предельных по сцеплению усилий, реализуемых электроприводом локомотивов при совместном управлении асинхронными тяговыми двигателями тележки.

**Задачи исследования:**

1. Анализ алгоритмов управления ТЭП в режиме реализации предельных по сцеплению усилий и обоснование применения в тяговом электроприводе систем разрывного управления АД.
2. Разработка функциональной схемы СУ, способа и алгоритмов управления ТЭП с совместным регулированием АД тележки на пределе сцепления.
3. Разработка математической и компьютерной модели СУ ТЭП с совместным управлением параллельно включённых АД на пределе сцепления.
4. Разработка для механической подсистемы ТЭП гибридного маневрово-вывозного тепловоза ТЭМ9Н математических и компьютерных моделей и анализ на их основе динамических процессов в ТЭП.
5. Создание электромеханической компьютерной модели ТЭП гибридного маневрово-вывозного тепловоза и исследование на основе численных экспериментов алгоритмов управления разгоном и электрическим торможением локомотива с совместным регулированием АД в режиме реализации предельных усилий.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- разработаны способ управления, функциональная схема и алгоритмы функционирования тягового привода локомотива с совместным управлением АД тележки на пределе сцепления;

- созданы математические, а также комплексные компьютерные модели тягового электропривода гибридного маневрово-вывозного тепловоза ТЭМ9Н с системой управления, реализующей предельные усилия при совместном управлении АД тележки;

- выполнен анализ работы ТЭП с совместным разрывным управлением АД при изменении условий сцепления, показавший, что предложенные алгоритмы регулирования позволяют скомпенсировать неоптимальность конструкции механической подсистемы ТЭП и обеспечить реализацию потенциальных условий сцепления не менее чем на 90 %.

**Методы исследования.** При выполнении работы применялись методы теории электропривода, теории электрических машин, теории электрической тяги. Применены методы математического и компьютерного моделирования, для создания комплексных электромеханических моделей использован метод подсистем, а также программные комплексы (ПК): MatLab/Simulink и «Универсальный механизм» (УМ или UM).

**На защиту выносятся**

- классификация алгоритмов управления ТЭП локомотивов в режиме реализации предельных по сцеплению усилий;

- алгоритмы управления ТЭП гибридного тепловоза с совместным регулированием АД тележки;

- математические модели подсистем ТЭП гибридного маневрового тепловоза ТЭМ9Н;

- методика разработки комплексных электромеханических моделей ТЭП;

- методика определения резонансных частот механической части (под-

системы) ТЭП локомотива;

- результаты исследований на моделях работоспособности и характера динамических процессов ТЭП в режиме реализации предельных тяговых и тормозных усилий.

**Достоверность результатов**, полученных в диссертации, обеспечивается корректностью принятых допущений и разработанных на их основе моделей, а также удовлетворительным совпадением результатов, полученных при моделировании ТЭП ТЭМ9Н, с осциллограммами натуральных испытаний тепловоза ТЭМ9Н.

### **Практическая ценность и реализация результатов работы**

Разработанные модели, методики моделирования обеспечивают возможность анализа и отработки перспективных вариантов управления ТЭП с совместным регулированием АД тележки.

Рассчитано перераспределение вертикальных нагрузок осей гибридного тепловоза ТЭМ9Н в режиме тяги и электрического торможения; предложена система управления АД локомотива с совместным регулированием АД на пределе сцепления; определены особенности функционирования ТЭП с совместным управлением АД при реализации предельных усилий с использованием в СУ сигнала обратной связи по скорости АД различных осей тележки; исследована работа ТЭП при варьировании потенциального коэффициента сцепления в диапазоне 0,4 - 01 и разбросе параметров параллельно работающих АД до 15 %.

Разработанные в диссертации методики расчёта динамических процессов в электромеханической системе гибридного тепловоза с совместным регулированием АД внедрены на Людиновском тепловозостроительном заводе (ЛТЗ), используются при проектировании маневровых тепловозов. Модели отдельных подсистем ТЭП внедрены в учебный процесс Брянского государственного технического университета (БГТУ). Акты внедрения приложены.



В главе 1 на базе обзора литературных источников выполнен анализ и классификация алгоритмов управления ТЭП в режиме реализации предельных усилий, сформулированы цель и задачи.

В главе 2 разработаны способ, схема, алгоритмы работы СУ ТЭП с совместным управлением АД, модель электрической подсистемы ТЭП, проверена адекватность модели путем сравнения расчетных осциллограмм с экспериментальными данными, полученными при испытаниях тепловоза ТЭМ9Н.

В главе 3 разработаны модели механической части (МЧ) ТЭП, позволяющие анализировать динамику работы совместно регулируемых АД в различных условиях сцепления. Модели выполнены с различной степенью детализации: уравнения упрощенной модели МЧ составлены на основе принципа Даламбера и реализованы в основной библиотеке MatLab/Simulink; модели МЧ с высокой степенью детализации составлены средствами ПК UM, где уравнения движения синтезируются автоматически.

В главе 4 разработаны комплексные модели ТЭП в ПК MatLab/Simulink и UM. На основе моделирования была исследована работа ТЭП в различных режимах движения при варьировании потенциального коэффициента сцепления  $\psi_0$  в диапазоне от 0,4 до 0,1, моделировался разброс активных сопротивлений обмоток статора и ротора параллельно работающих АД до 15 %. Основной упор делался на работу ТЭП в первой зоне регулирования (без ослабления поля), где возможна реализация максимально допустимых по условиям сцепления электромагнитных моментов АД.

В заключении приведены основные результаты и выводы, в приложении – используемые данные, акты внедрения. В диссертацию входят 134 страницы основного текста, в том числе 60 рисунков и 7 таблиц.

## **РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЭП ЛОКОМОТИВОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ УСИЛИЙ**

Системы управления ТЭП локомотивов формировались исторически [1-20] в зависимости от применяемых тяговых электродвигателей, развития элементной базы СУ и теории электропривода. Соответственно изменялись схемы и алгоритмы управления ТЭП в режиме реализации предельных по сцеплению усилий [21-48], но, несмотря на разнообразие конкретных решений, данные алгоритмы можно условно разделить по принципу функционирования на две большие группы:

1. Алгоритмы защиты от буксования и юза [21-34].
2. Алгоритмы реализации потенциального коэффициента сцепления [35-48].

Алгоритмы первой группы начинают функционировать только при возникновении буксования (юза) и включают в себя два этапа:

- а) обнаружение буксования (или юза);
- б) подавление буксования (юза).

Алгоритмы второй группы выводят ТЭП на предел по сцеплению и позволяют достигать максимально возможных тяговых усилий, что особенно важно для троганья с места и надёжного ведения тяжеловесных составов в неблагоприятных условиях. Эти алгоритмы реализованы и развиваются в ТЭП зарубежных фирм [37-42]. В отечественном тяговом электроприводе ведутся исследования в этом направлении [43-48], практически же пока реализованы и совершенствуются преимущественно алгоритмы первой группы, и это тоже необходимо для модернизации существующего парка локомотивов.

Отставание возникло в результате кардинальных изменений нашей страны в 90-е годы прошлого века, замедливших развитие производящих отраслей. Исследование, разработка и внедрение новых отечественных систем и алгоритмов управления ТЭП с АД особенно актуальны не только из-за воз-

никшей необходимости импортозамещения, но и в силу стратегической важности для России обеспечения бесперебойной и надёжной работы железнодорожного транспорта независимо от любых внешнеполитических условий.

### 1.1. Алгоритмы защиты от буксования и юза

Для пояснения алгоритмов необходимо предварительно кратко остановиться на возникновении и приближенном математическом описании изменения сцепления и тяговых (тормозных) усилий в ТЭП при буксовании (юзе).

В тяговом приводе локомотива всегда присутствует контакт "колесо-рельс". Именно в нем происходит реализация тормозных и тяговых усилий. Сила тяги (торможения) реализуется посредством взаимодействия колес и рельсов, результат этого взаимодействия количественно выражается коэффициентом сцепления, обозначаемым в технической литературе символом  $\psi$ .

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

$$F_k = \psi \times N \quad (1.1)$$

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 [49-53], а также экспериментальных исследований [54-56] математически описано движение колеса при малых проскальзываниях, а также получены экспериментальные и приближённые аналитические зависимости коэффициента сцепления от проскальзывания колес (как для малых, так и для больших проскальзываний), называемые характеристиками сцепления (или кривыми сцепления).

Положение рабочих точек в различных режимах работы ТЭП можно проиллюстрировать на характеристике сцепления (рис. 1.1) [2;57]. Приведен-

ная характеристика является усредненной, в реальных условиях она имеет стохастический разброс (рис. 1.2) [56], кроме того, крутизна ее восходящего и падающего участков зависит от состояния рельсов (рис. 1.3) [39]. Однако усредненная характеристика (рис. 1.1) хорошо отражает суть процессов и поясняет связь между коэффициентом сцепления  $\psi$  и скоростью проскальзывания (скольжения) колеса в продольном направлении  $v_{ск}$ . В данном случае коэффициент сцепления выражен в относительных единицах:

$$k = \psi/\psi_0, \quad (1.2)$$

где  $k$  – относительный коэффициент сцепления (в относительных единицах);  $\psi_0$  – потенциальный коэффициент сцепления, то есть, максимально возможный в заданных условиях движения (погодных, производственных и др.).

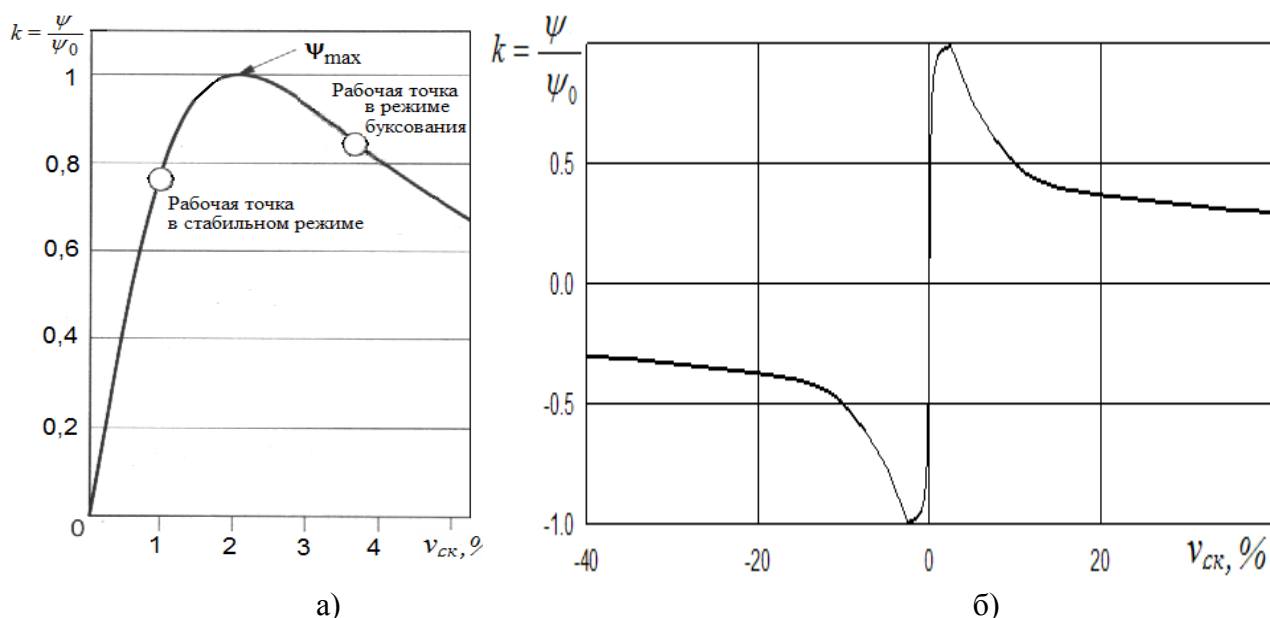


Рис. 1.1. Характеристика сцепления: а – в режиме тяги с различным расположением рабочих точек ТЭП; б – в режимах тяги и торможения

В продольном направлении скорость проскальзывания (скольжения) колеса может выражаться как в абсолютных единицах, так и в долях (или в процентах). Скорость скольжения в процентах определяется по формуле

$$v_{ск\%} = \frac{v_k - v_l}{v_l} 100\% \quad (1.3)$$

где  $v_k$  – скорость линейная точки на ободу колеса (далее скорость колеса);  $v_l$  – скорость линейная локомотива.

На рис. 1.1а 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 (рис. 1.1б). При увеличении скорости скольжения до критического значения (на рис. 1.1а это  $v_{ск} = 2,5 \%$ ) коэффициент сцепления достигает максимума и становится равным потенциальному коэффициенту сцепления  $\psi_0$  ( $k=1$ ;  $\psi = \psi_0$ ), а реализуемое колесом тяговое усилие

$$F = N \cdot \psi_0 \cdot k \quad (1.4)$$

становится предельным (максимально возможным) по условиям сцепления.

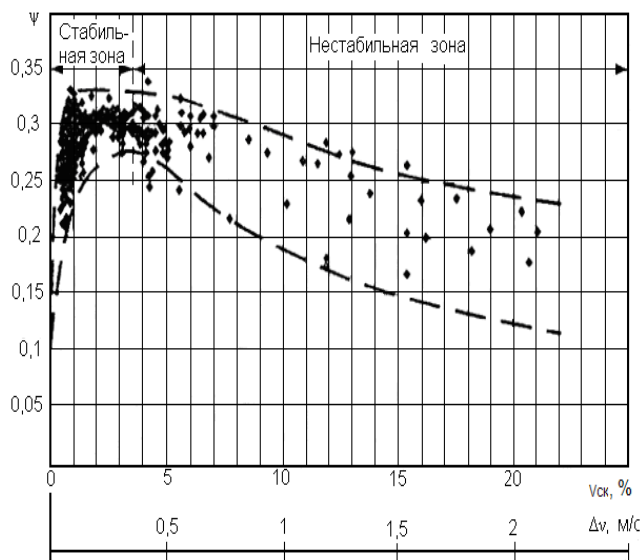


Рис.1.2. Измеренные значения коэффициента сцепления

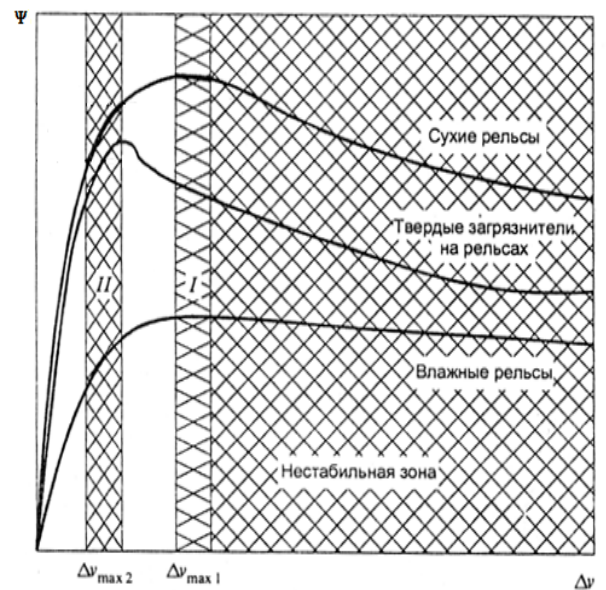


Рис. 1.3. Вид характеристики сцепления для различного состояния рельсов

При дальнейшем увеличении проскальзывания рабочая точка смещается на падающий участок в зону буксования (рис. 1.1а). Этот участок характеристики имеет отрицательную крутизну, то есть отрицательное гашение колебаний [39;58;59], и является нестабильным: помимо буксования и снижения тягового усилия  $F$  (1.1- 1.4), здесь возможно усиление собственных форм колебаний в механической подсистеме [60-62].

Поэтому можно следующим образом классифицировать динамические режимы работы ТЭП в зависимости от положения рабочей точки [59]:

- 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 буксования 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  $N$  (в формулах 1.1, 1.4), 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;12]. Поэтому первой достигает предельного сцепления ось менее нагруженная (лимитирующая 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 (рис. 1.1-1.3) 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 (рис. 1.2); неравномерность нагрузок осей; различие диаметров колёс; разли-

чие параметров тяговых двигателей; динамические колебания звеньев МЧ; изменение погодных условий и загрязнений рельсов (рис. 1.3); неровности.

Тяговые двигатели могут получать питание от общего преобразователя частоты, на рис.1.4, 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) [6;65].

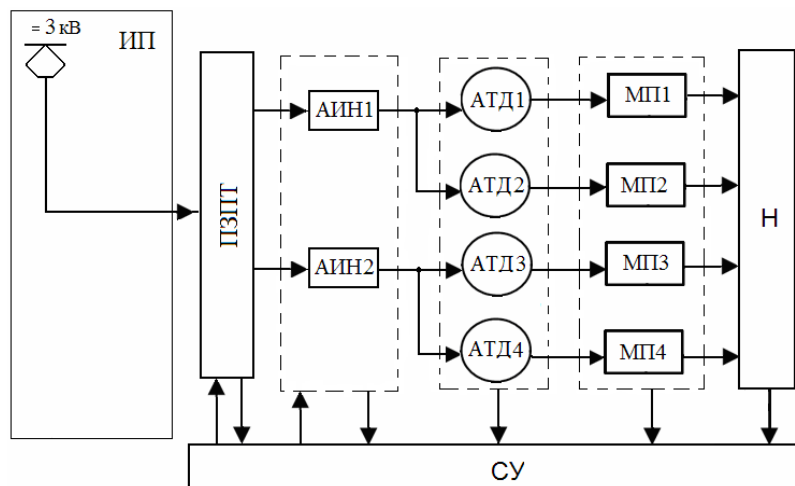


Рис. 1.4. Схема функциональная для ТЭП электровоза с совместным (потележечным) регулированием АД

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 [66,67]. 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 не-

возможно отдельно регулировать каждый тяговый двигатель.

Для улучшения динамики СУ ТЭП и тяговых качеств наряду с совместным регулированием применяется индивидуальное регулирование осей, когда каждый двигатель питается от своего инвертора (рис. 1.5).

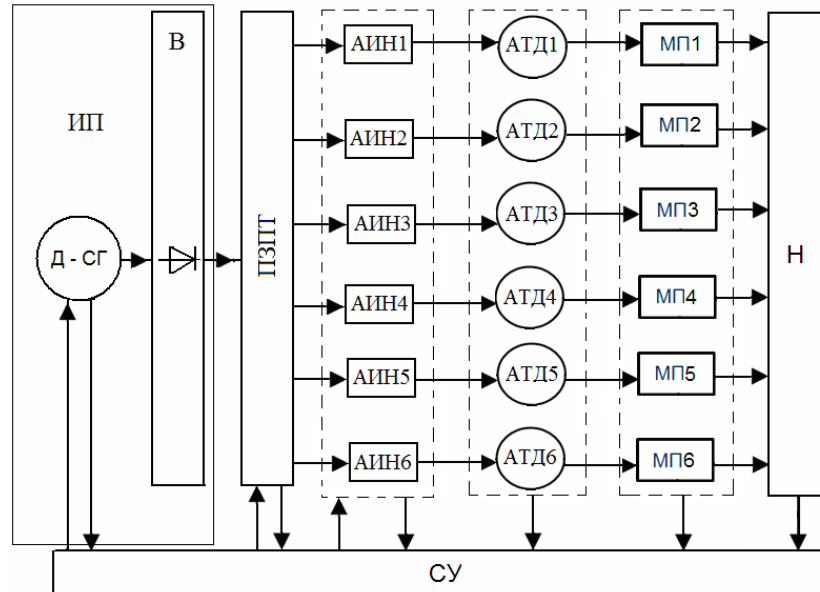


Рис. 1.5. Схема функциональная для ТЭП тепловоза с индивидуальным регулированием АД

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

Совместное регулирование широко используется также на локомотивах с традиционными тяговыми двигателями постоянного тока последовательного возбуждения. 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 защиты от буксования напряжения на буксующих двигателях по определенному алгоритму [23;24].

Системы защиты от буксования начинают функционировать только по-



сле обнаружения буксования. Обнаружение буксования может осуществляться следующими способами (аналогично для юза):

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 [4;6;10;11;13;14;16].

2. По изменению скорости роторов и её производных [12;23-26] или по изменению скорости проскальзывания колес [19;21;22;27-30].

3. По усилению вибраций в тяговой передаче в определённых частотных диапазонах [31-34].

Возможно также сочетание этих способов: 1 и 3; 2 и 3 [45;48].

Если процесс буксования (юза) 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 (юза) не обладают требуемым быстродействием и допускают развитие процесса, опытные машинисты по возникающей вибрации или колебаниям показаний амперметра могут подсыпать песок или уменьшать усилие тяги. Так что, самыми простыми (но весьма грубыми) способами защиты от буксования являются дозированная подсыпка песка под колеса (или другого реагента, повышающего сцепление) и сброс позиций контроллера машиниста (или отключение двигателей). Однако, при неблагоприятном сочетании факторов свободное развитие буксования (юза) за 1,6 – 2,5 с может привести к недопустимым динамическим нагрузкам и поломкам в тяговой передаче [2;45;61-63].

Так как изначально принципы обнаружения буксования и защиты от буксования отработывались на локомотивах с тяговыми двигателями постоянного тока, в качестве примера можно привести привод с двигателями постоянного тока последовательного возбуждения, параллельно соединенными

к тяговому генератору через неуправляемый выпрямитель (рис. 1.6). Многие серийные грузовые и пассажирские тепловозы имеют такую систему ТЭП. [68].

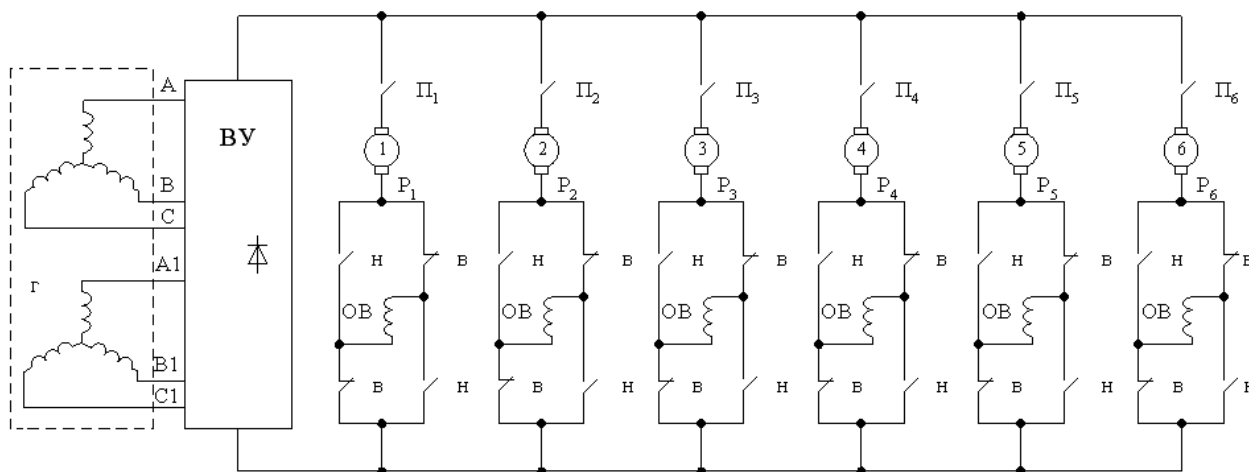


Рис. 1.6. Схема принципиальная ТЭП тепловоза с двигателями постоянного тока

Регулирование мощности тягового генератора при отсутствии буксования в данных схемах выполняется при постоянной мощности дизель-генератора для каждой позиции контроллера. Защита от буксования осуществляется путём снижения мощности генератора при заданном различии токов параллельно включённых двигателей. У такой защиты низкая чувствительность, так как имеется разброс параметров цепей двигателей, разброс диаметров бандажей колёс. Для стандартных уставок данной защиты на тепловозах снижение мощности на первой ступени защиты происходит при скорости проскальзывания колёс 6-8 км/ч, на второй ступени – при скорости проскальзывания 10-12 км/ч. Сила тяги тепловоза, в частности, 2ТЭ116, снижается при этом на 28-30 % и 35-38 % соответственно [24;27].

Для улучшения противобуксовочных свойств в ряде работ [11;12] предлагалось повысить жесткость характеристик тягового генератора, воздействуя на его систему возбуждения с тем, чтобы автоматически перейти при буксовании от регулирования генератора при поддержании постоянной мощности к регулированию при поддержании постоянного напряжения. Од-

нако, постоянства напряжения недостаточно, ведь, как известно, двигатели последовательного возбуждения обладают мягкими естественными характеристиками, поэтому ТЭП с такими двигателями склонны к развитию разносного буксования при несовершенстве защиты. Как показано в работах [2;4;6;15], для повышения тяговых качеств локомотива и предотвращения разносного буксования, целесообразно повышать жесткость тяговых характеристик двигателя, то есть, придавать его характеристикам такой вид, когда малые изменение скорости двигателя (а соответственно, и колес) вызывает существенное снижение усилия тяги (или торможения). При буксовании двигателей последовательного возбуждения необходимо для увеличения жесткости их характеристик предотвратить снижение магнитного потока, то есть, поддерживать ток возбуждения постоянным, как у двигателей независимого возбуждения [21]. Или для подавления буксования следует, как на тепловозе 2ТЭ25К, снижать скорость буксующих осей, регулируя напряжение двигателей [23;24].

Так как для подавления буксования жесткость естественной электро-механической характеристики двигателя должна быть выше, чем жесткость характеристики сцепления [2;4;59], то в ТЭП для улучшения противобуксовочных свойств целесообразно применять двигатели с жесткими естественными механическими характеристиками: асинхронные, синхронные, независимого возбуждения, вентильно-индукторные [19;57;69;70].

Наибольшее распространение получили АД в силу простоты и надежности конструкции, а также ряда других известных преимуществ [6;19]. Отработка алгоритмов защиты от буксования началась одновременно с отработкой алгоритмов управления ТЭП на первых локомотивах со скалярным управлением АД [13;16;18].

На рис. 1.7 приведена в качестве примера схема функциональная для ТЭП оси электровоза ВЛ80<sup>А</sup> – первого электровоза с АД.

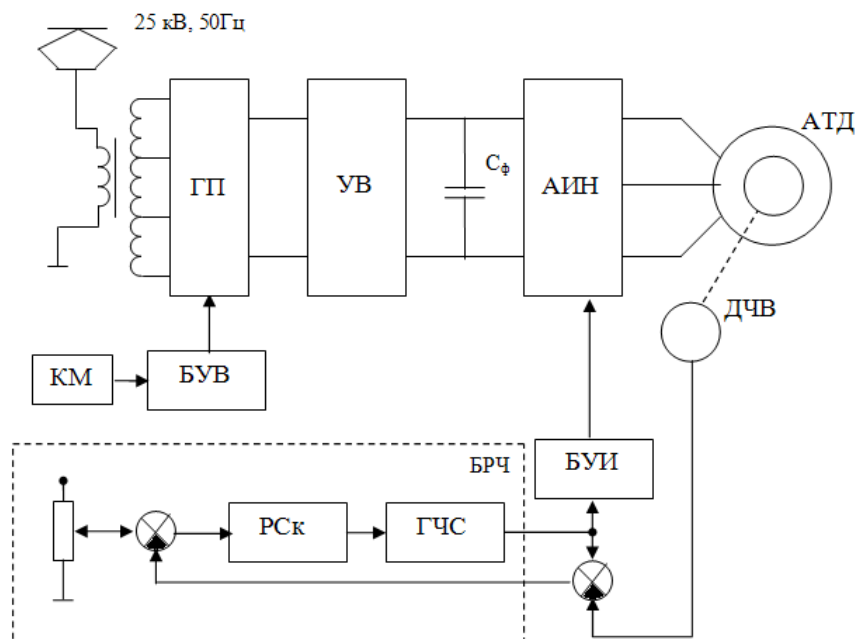


Рис. 1.7. Схема функциональная для ТЭП электровоза ВЛ80<sup>А</sup> с индивидуальным регулированием АТД

В силовом канале ТЭП ВЛ80<sup>А</sup> применены управляемый выпрямитель (УВ), автономный инвертор напряжения (АИН), изготовленные с использованием обычных тиристоров. Для вентиля УВ и АИН управляющие сигналы вырабатываются соответствующими блоками управления СУ: (БУВ) и (БУИ). Команды на задание величины напряжения поступают в БУВ с Контроллером машиниста (КМ) формируется задание напряжения для создания требуемой силы тяги.

Блок регулирования частоты (БРЧ) выполняет регулирование частоты напряжения, он обеспечивает постоянную величину абсолютного скольжения  $f_2$  в процессе разгона. Это выполняется с использованием сравнения приведённой к частоте напряжения статора частоты вращения ротора  $f_{вр}$  с требуемым значением частоты напряжения (тока) статора  $f_1$ , необходимой для поддержания заданной величины  $f_2$ . Если скольжение не соответствует заданному, то генератор чистоты (ГЧС) корректирует  $f_1$  в автоматическом режиме. Скорость (угловую частоту) вращения ротора измеряет датчик частоты (ДЧ). Момент АТД регулируется путем изменения амплитуды напряжения

статора АД при помощи УВ по сигналам КМ [17;65]. Сигнал противобуксовочной защиты также воздействует на величину выходного напряжения УВ [7; 71].

Схема (рис. 1.7) приведена специально, чтобы проиллюстрировать первую реализацию скалярного управления АД на локомотиве и отметить её недостатки: не контролируется состояние магнитной системы АД, что снижает точность и быстродействие; отсутствует учет изменения параметров двигателя при изменении температуры и корректировка абсолютного скольжения; в схеме не предусмотрено автоматическое регулирование момента АД при буксовании, машинист сам выполняет эту функцию, наблюдая величину тока АД по амперметру и изменяя выходное напряжение УВ [36;65].

Схемы управления ТЭП с АД совершенствовались, как в нашей стране, так и на зарубежных локомотивах [6;7;15;18;19;20;28-30;35-48;65;72;73]. Этому способствовало развитие элементной базы силовой электроники, – появление мощных запираемых тиристоров (GTO), затем силовых биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) [74;75-77]. Одновременно шло развитие теории электропривода, – создание систем векторного управления АД [66;78-82] и систем разрывного управления, в частности, систем прямого управления моментом (DTC) [83-87]. Вместе с тем, необходимо отметить, что системы скалярного управления успешно применяются в ТЭП и в настоящее время [88;89] в сочетании с различными видами широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [90]. Так, например в асинхронном тяговом электроприводе тепловоза 2ТЭ25А [88;90], где каждый АД питается от индивидуального АИН на IGBT, в ряде режимов используется скалярное управление АД в сочетании с векторной ШИМ (SWM).

Для понимания работы ТЭП с АД при возникновении буксования или юза необходимо учитывать, что независимо от способа и системы управления, в АД всегда существует определяемая принципом действия асинхронного двигателя связь [6;66]:

$$f_1 = f_{ep} \pm f_2, \quad (1.5)$$

В формуле (1.5) «+» применяют в режиме тяги; «-» пр меняют в режиме торможения АД. Частота  $f_2$  в зависимости от принятого закона регулирования и условий работы АД может быть либо постоянной, либо изменяться.

Самым простым и часто применяемым, как в тяговых, так и в общепромышленных электроприводах является закон скалярного управления

$$\frac{U_s}{f_1} = const \quad (1.6)$$

– известный закон М. П. Костенко [6;66;71;], используемый в зоне пуска АД при постоянстве момента (как и формула  $\frac{U_s}{\sqrt{f_1}} = const$ , в зоне постоянства мощности).

Когда в ТЭП с АД возникает буксование, то  $f_{ep}$  увеличивается, и если при этом частота напряжения  $f_1$  регулируется по скорости вращения буксующего двигателя, то, даже при постоянстве амплитуды напряжения  $U_s$ , механическая характеристика АД (и тяговая характеристика) будет мягкой, как у двигателя последовательного возбуждения (или практически абсолютно мягкой, если  $U_s$  продолжает увеличиваться, соблюдая закон (1.6)). При юзе аналогично для тормозной характеристики.

Поэтому в системах защиты от буксования (и юза), чтобы обеспечить работу АД по естественной жесткой характеристике, которую двигатель имеет при  $U_s = const$ ;  $f_1 = const$ , принято регулирование (ведение) частоты по скорости АД, который вращается медленнее остальных (не буксует) – это в режиме тяги, – и по скорости АД, который вращается быстрее других (у него нет юза), – это в режиме торможения.

В ряде работ с этой же целью предлагается ведение частоты по скорости локомотива [13;27]:

$$f_1 = f_{л\_сп} \pm f_2 \quad (1.7)$$

где  $f_{л\_сп}$  – скорость локомотива, приведенная к частоте тока статора.

Это позволяет иметь устойчивую точку отсчёта и обеспечить жесткость характеристик при буксовании всех осей. Такой подход может применяться и при индивидуальном, и при совместном управлении АТД. В этом случае разное буксование предотвращается, но фрикционные автоколебания могут возникать [27;58;59;65].

Возникновение релаксационных автоколебаний проиллюстрировано в работах [27;65] (рис. 1.8), в данном случае управление скалярное, частота тока вычисляется по скорости локомотива, показаны процессы в ТЭП первой оси [65].

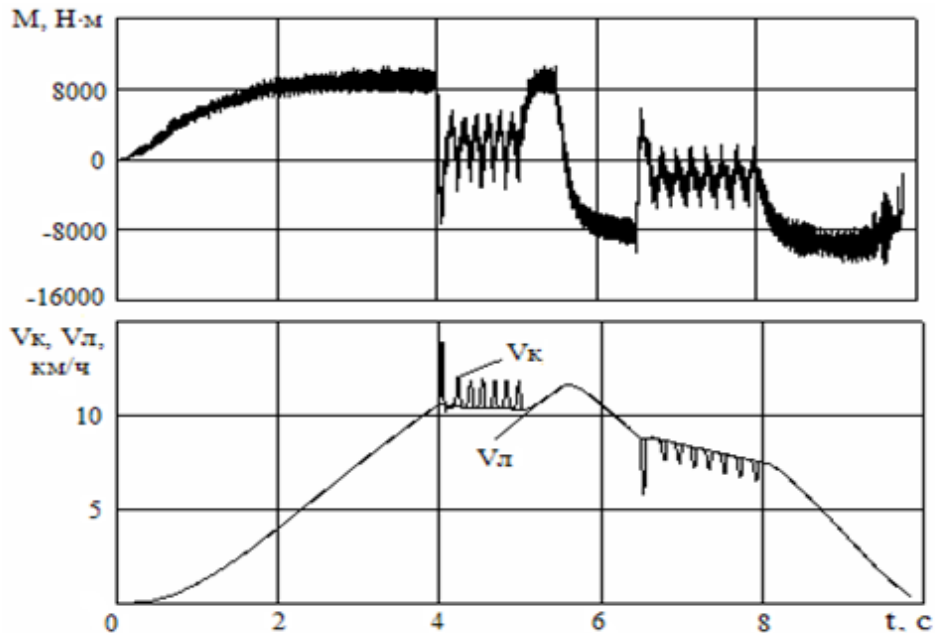


Рис. 1.8. Результаты моделирования разгона и электрического торможения четырехосного локомотива при скалярном управлении и снижении потенциального коэффициента сцепления  $\Psi_0$  до 0,1 в интервалы времени  $4 \text{ с} \leq t \leq 5 \text{ с}$  и  $6,5 \text{ с} \leq t \leq 8 \text{ с}$ : М – электромагнитный момент АТД;  $V_k$  – скорости колес оси;  $V_l$  – скорость локомотива

Релаксационные автоколебания обусловлены тем, что рабочая точка при буксовании периодически попадает на ниспадающую ветвь характеристики сцепления, при этом уменьшается нагрузка (момент сопротивления) АТД, что вызывает снижение электромагнитного момента по естественной

характеристике АД. При этом проскальзывание колес уменьшается, сцепление восстанавливается, а далее вместе с этим увеличивается электромагнитный момент в соответствии с заданным значением  $f_2$  в формуле (1.6), и затем сцепление срывается снова, если не улучшились погодные условия (или СУ не предприняты меры для снижения момента). В зависимости от скорости локомотива, а также наклона ниспадающего участка характеристики сцепления частота релаксационных автоколебаний составляет 4...8 Гц. Если в МЧ ТЭП имеется высокое демпфирование, то автоколебания могут затухать [58;59;].

Накладываться на релаксационные колебания могут другие формы фрикционных автоколебаний, например, колебания левого и правого колеса с узлом на оси колесной пары или колебания с узлом в упругих элементах зубчатого колеса редуктора (наименее жестком звене механической части ТЭП при недостаточном демпфировании). Пример, для автоколебаний колёс, накладывающихся на релаксационные автоколебания (рис. 1.9), приведен в [65].

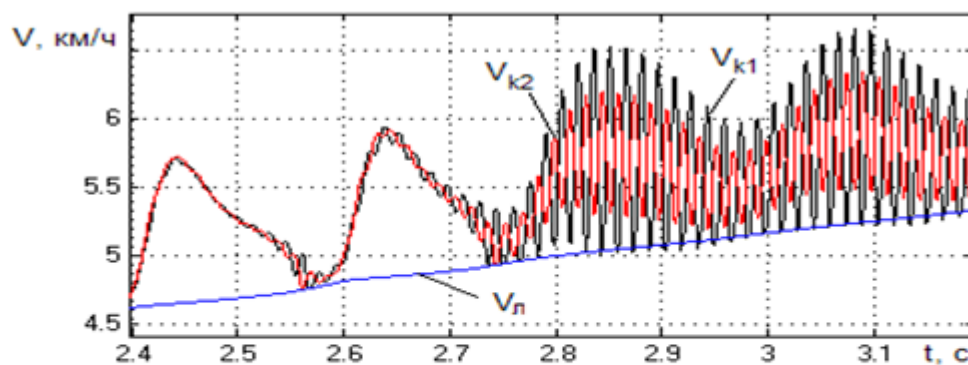


Рис. 1.9. Результаты моделирования разгона четырехосного локомотива при скалярном управлении и снижении потенциального коэффициента сцепления  $\Psi_0$  до 0,1:  
 $V_{к1}$  – скорость правого колеса первой оси;  $V_{к2}$  – скорость левого колеса первой оси;  
 $V_{л}$  – скорость локомотива

Поэтому необходимо наряду с рассмотренными алгоритмами, обеспечивающими работу при срыве сцепления по жесткой естественной характеристике АТД, предусматривать в СУ дозированное снижение электромагнит-



ного момента АД для подавления буксования, что осуществляется обычно снижением абсолютного скольжения или амплитуды напряжения, например, как в ТЭП (рис. 1.7).

Наиболее часто для подавления буксования в СУ ТЭП предусматривают снижение абсолютного скольжения АД с учётом частоты опорного сигнала, которая соответствует вращению колёс без проскальзывания [90]

$$f_2 = f_{20} - k_s (f_{ep} - f_{ep\ on}) \quad (1.8)$$

где  $f_{20}$  – начальное абсолютное скольжение;  $f_{ep\ on}$  – опорная частота вращения ротора;  $k_s$  – коэффициент пропорциональности для регулирования абсолютного скольжения по скорости проскальзывания.

На тепловозе 2ТЭ25А аналогично ТЭП тепловоза 2ТЭ25К с двигателями постоянного тока, при повышении скольжения колёс выше заданной величины срабатывает противобуксовочная защита, при подавлении буксования учитывается не только сигнал проскальзывания, но и сигнал ускорения ротора АД

$$f_2 = f_{20} - k_s (f_{ep} - f_{ep\ on}) - k_{sa} \varepsilon \quad (1.9)$$

$k_{sa}$  – коэффициент пропорциональности для регулирования абсолютного скольжения по ускорению;  $\varepsilon$  – угловое ускорение ротора АД (определяемое с использованием отфильтрованного сигнала  $f_{ep}$ ).

При этом частота напряжения статора может регулироваться по закону (1.5) или (1.7), напряжение по (1.6) или по выражению [66;82;91]

$$U_s = U_0 + k_u f_1, \quad (1.9)$$

где  $U_0$  – начальная амплитуда статорного напряжения;  $k_u$  – специальный коэффициент пропорциональности для изменения напряжения.

В области разработки ТЭП с АД ведущие позиции в мире занимают такие фирмы как Siemens (Германия), Bombardier Transportation (Швейцария, Германия, Швеция), GEC Alstom (Франция, Англия), Мицубиси (Япония).

В нашей стране исследованием и созданием локомотивов с АД занимаются научные коллективы таких организаций как РУТ (МИИТ), ВНИКТИ, МЭИ, НГТУ, ВЭЛНИИ, ВНИИЖТ и др.

На начальном этапе развития ТЭП с АД скалярные СУ при питании АД локомотивов от автономных инверторов напряжения (АИН) преимущественно использовались фирмой Bombardier Transportation, применялись они также в отечественных СУ АД с индивидуальным регулированием двигателей.

Совместное регулирование АД на отечественном локомотиве с автономным инвертором тока (АИТ) впервые применено на маневровом тепловозе ТЭМ21. Этот тепловоз изготовлен и выпущен в 2001 году на БМЗ. В случае применения обычных тиристорных преобразователей с АИТ реализуется проще, чем статический преобразователь с АИН, одной из основных причин применения силовой схемы с инвертором тока послужило именно это, хотя нельзя отрицать, что схемы с АИТ имеют и ряд других преимуществ [92].

На рис. (1.10) представлена функциональная схема ТЭП тележки ТЭМ21. В неё входит дизель-генератор (Д – СГ), управляемый выпрямитель (УВ), реактор  $L_d$ , и АИТ; два АД двухосной тележки подключены к АИТ параллельно.

Блоком управления выпрямителя (БУВ) формируются сигналы управления для УВ, блоком управления инвертора (БУИ) – сигналы управления АИТ. От контроллера машиниста (КМ) поступает сигнал в блок задания тока (БЗТ), и к нему же приходит сигнал от блока вычисления момента (БВМ). БЗТ реализован в виде электронной таблицы  $I_d = f(M_3)$ , учитывающей также положение КМ. В БВМ вычисляется задание момента  $M_3$  с учётом свободной мощности дизеля, которая определяется при помощи регулятора мощности (РМ). СУ ТЭП по двум каналам регулирует две основные величины: модуль вектора статорного тока и частоту статорного тока АД. Регулятором тока (РТ) выполняется регулирование статорного тока по отклонению посредством управления выпрямителем [65;93].

Регулирование частоты статорного тока до скорости 10 км/ч выполняется посредством регулятора модуля потокосцепления ротора, это на схеме не показано; когда скорость превышает 10 км/ч используется регулятор модуля э. д. с.

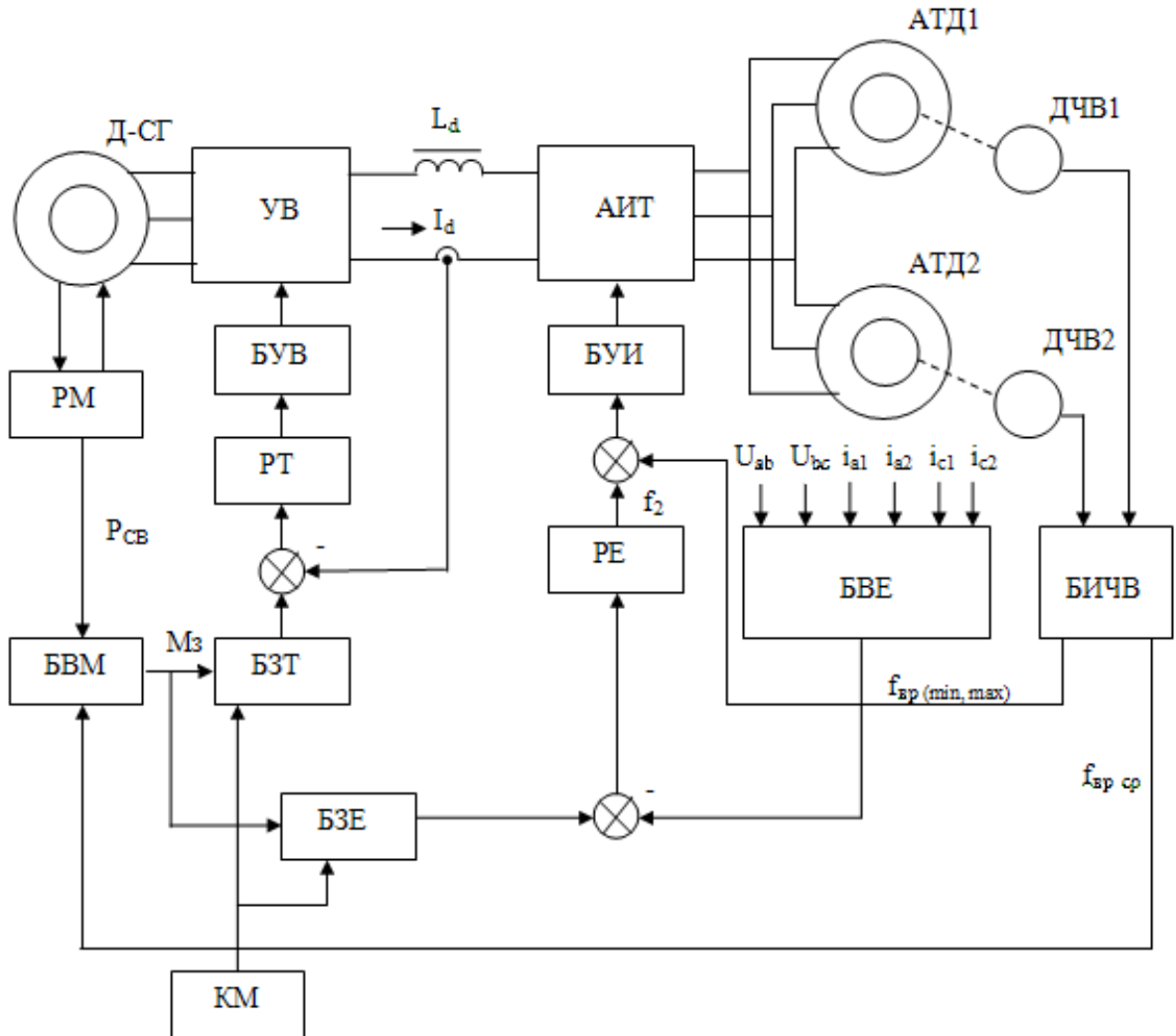


Рис. 1.10. Схема функциональная ТЭП тепловоза ТЭМ21 с совместным регулированием АТД тележки

Заданное значение э. д. с., индуцируемой полем ротора в статоре (которое будем называть э. д. с. ротора) определяется блоком задания э. д. с. (БЗЕ) по позиции КМ и величине  $M_3$ . Определенное в БЗЕ задание э. д. с. сравнивается с фактическим значением э. д. с., определяемым в БВЕ по результатам измерения токов и напряжений, сравнивается с заданным, вычисленным в БВЕ. Имеющееся рассогласование поступает к регулятору э. д. с. (РЕ), с которого

снимается требуемое абсолютное скольжение  $f_2$ , складываемое с частотой вращения ротора, определяемой ДЧВ и предварительно приводимой к частоте тока, т.о., по выражению (1.5) определяем заданную частоту  $f_1$  [65;93].

Для режима тяги в СУ используется минимальная частота вращения АД, для режима торможения – максимальная, там самым улучшаются противоюзные и противобуксовочные свойства. Для защиты от буксования в случае снижения коэффициента сцепления уменьшается абсолютное скольжение  $f_2$ . Подобные СУ использовались на электропоезде ЭНЗ (Россия), электровозе 182001 (ФРГ). Схемы с АИТ при совместном регулировании АД успешно применялись за рубежом и фирмой Siemens [6;65;93].

Глубокий анализ особенностей параллельной работы АД и автономных инверторов на локомотивах выполнен в работе [6]. В частности, показано влияние различия диаметров колесных пар на распределение токовых нагрузок АД и тяговые усилия. На рис. 11 показаны АД1, АД2 тележки через зубчатую передачу соединенные через редукторы с колесными парами, диаметры колес которых равны  $D_{к1}$  и  $D_{к2}$ .

По нормативам для колёсных пар диаметры бандажей могут различаться максимально на 10 мм. Отмечается [6], что при вычислении частоты  $f_1$  по формулам (1.5), лучше в СУ использовать частоту вращения АД той колёсной пары, которая имеет меньший диаметр, так как в этом случае распределение нагрузки между АД тележки будет более равномерным, чем при сигнале от АД колёсной пары, имеющей больший диаметр. Сила тяги при этом, которая реализуется колёсами с меньшим диаметром, будет меньше, чем развиваемая колесной парой с большим диаметром. Это улучшает противобуксовочные свойства локомотива, так как снижает вероятность буксования колёсной пары с большим диаметром.

В работе [6] отмечается также, что в условиях эксплуатации расхождение нагрузок параллельно работающих тяговых двигателей может быть вызвано не только различием диаметров колёс, но и перераспределением при

работе АД вертикальных нагрузок на колёсные пары локомотива.

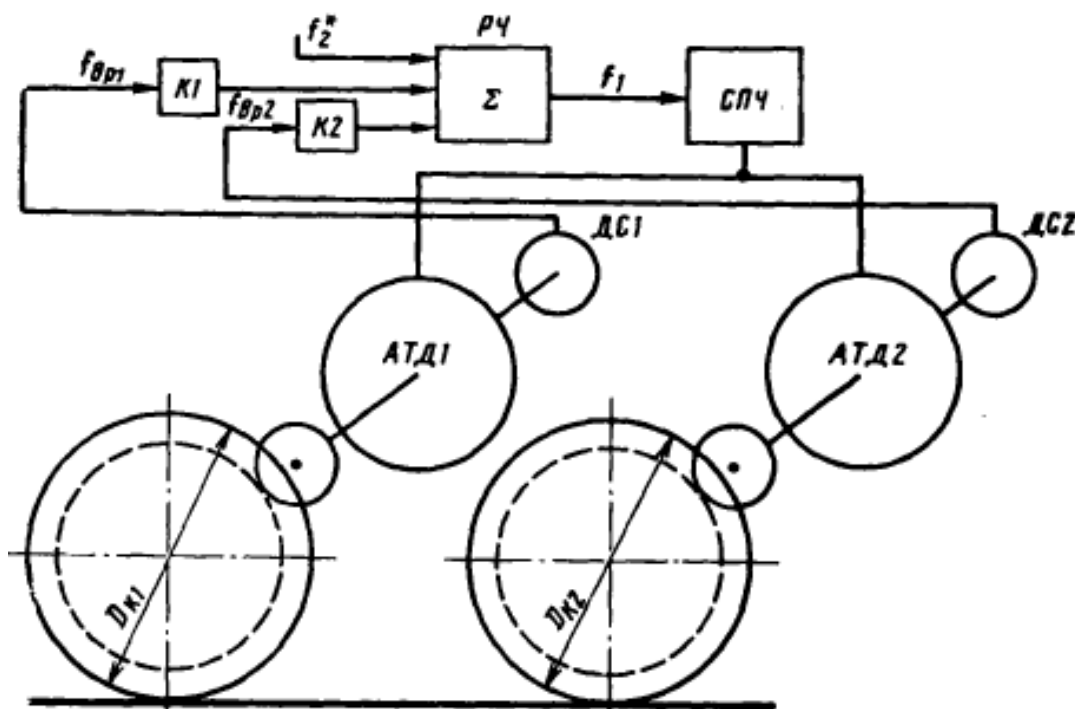


Рис. 1.11. Функциональная схема совместного регулирования АД тележки

Выравнивание диаметров колёсных пар будет постепенно происходить в эксплуатации, так как колёсная пара большего диаметра реализует большие тяговые усилия, и поэтому она имеет повышенный износ [6]. Интересно также то, что с увеличением нагрузки ТЭП (и проскальзывания колёс) влияние разности диаметров бандажей колёсных пар снижается, а влияние неравномерности вертикальных нагрузок повышается, так как увеличиваются электромагнитные моменты двигателей, которыми сама эта неравномерность и вызвана.

В ряде работ рассмотрены системы векторного управления ТЭП с АД при питании от АИН [28-30;94], в качестве примера можно привести векторную систему управления с совместным регулированием двух АД (рис. 1.12) при постоянном потокосцеплении ротора [28].

В данной схеме имеется характерное для векторных систем раздельное регулирование потокосцепления ротора и электромагнитного момента АД,

что обеспечивает высокودинамичное управление моментом двигателя в нестационарных режимах [65;86].

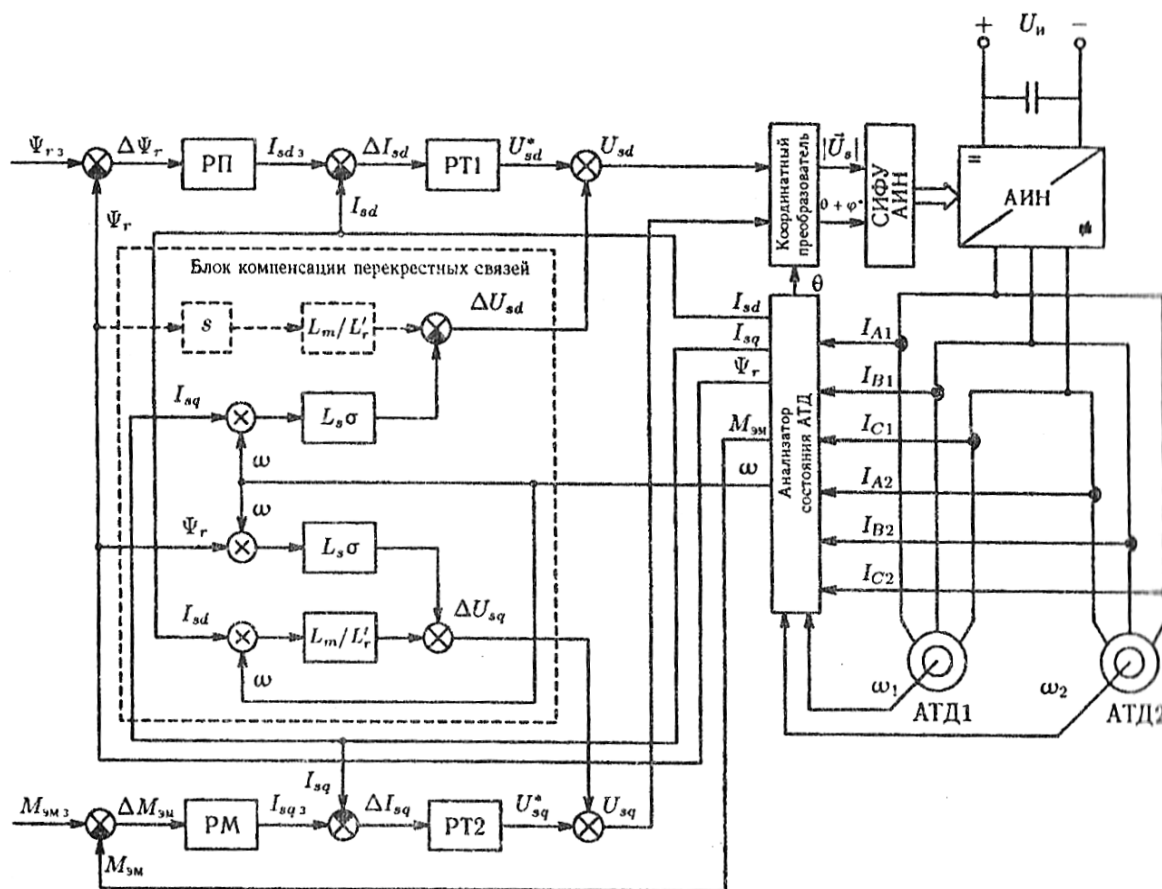


Рис. 1.12. Схема функциональная векторной СУ ТЭП тележки локомотива при совместном регулировании АТД, питаемых от АИН

В системе с использованием датчиков и анализатора состояния определяются переменные состояния каждого двигателя и далее с учётом частоты вращения роторов выбирается, частоту вращения какого АД использовать в СУ. После этого на вход соответствующих блоков системы автоматического регулирования поступают сигналы тока статора, потокосцепления, частоты вращения этого двигателя.

Автором предложен способ регулирования нескольких АТД, подключённых параллельно к одному АИН, при котором в режиме тяги в СУ ТЭП предлагается вести управление по двигателю с наименьшей частотой вращения, как и в работах [6;13;16;18;93], чтобы двигатели с большей частотой

вращения при достижении предела сцепления начинали работать по естественной характеристике. Но, вместе с тем, автор в работах [28;29] указывает, что в механической части электровозов скорость вращения роторов АД может иметь колебания с частотой нескольких Герц, и это требует с той же частотой передавать управление от одного двигателя к другому, что при передаче управления при равенстве частот вращения АД приводит к колебаниям в электромагнитной системе, в связи с чем в этом способе предлагается передавать управление при равенстве электромагнитных моментов двигателей.

За основной признак начала буксования в [28;29] принимается увеличившееся значение проскальзывания колёсной пары, а за дополнительный критерий - её угловое ускорение. Указывается, что в качестве опорного сигнала можно использовать наименьшую частоту вращения АД, но в этом случае, если буксуют все колесные пары, буксование подавить не удаётся.

Предпочтительнее использовать сигнал линейной скорости локомотива, который можно получить, применив системы космического позиционирования (GPS, ГЛОНАС) либо подойдут способы, основанные на измерении неравномерности структуры пути [28;95]. С целью подавления буксования предлагается снижение задания на момент в СУ ТЭП (рис. 1.12) с определённой интенсивностью, пока не замедлится до нужного уровня вращение колёсной пары (КП), о чём будет свидетельствовать изменение знака ускорения КП. Далее электромагнитный момент можно повышать с заданной интенсивностью.

Помимо рассмотренных алгоритмов защиты от буксования существуют и применяются на зарубежных локомотивах алгоритмы, специально выводящие ТЭП на предел по сцеплению, называемые также алгоритмами реализации реального (или потенциального) коэффициента сцепления.

## **1.2. Алгоритмы реализации потенциального коэффициента сцепления**

Алгоритмы, относящиеся к данной группе, предполагают специальное

регулирование тяги и торможения с высоким (максимально возможным) использованием сил сцепления. Это важно для ведения тяжеловесных составов, обеспечения движения с требуемым ускорением и замедлением. Кроме того, это позволяет осуществить трогание с места в тяжелых погодных условиях или с неполным количеством тяговых двигателей при возникновении отказов в ТЭП.

Так на опытном отечественном тепловозе 2ЭВ120 с индивидуальным регулированием АД осей, состоящим из двух четырёхосных секций для компенсации снижения тяги при отказе АД одной из осей введён бустерный режим трогания с места, а также разгона, который электровозу позволяет, как преодолеть участки со сложными подъемами при семи тяговых осях, так и стронуть поезд с места после вынужденной остановки на сложном подъеме [96]. Максимальная сила тяги при трогании для электровоза ЭП10 — 375 кН (в бустерном режиме — 425 кН) [97]. Тяговое электрооборудование для этих локомотивов поставляется компанией *Bombardier Transportation*.

Зарубежный опыт [19;37-42] говорит о том, что наилучшие тяговые и тормозные качества позволяют получить СУ, предусматривающие регулирование и контроль скольжения колёс в контакте колесо-рельс. Такие системы изменяют электромагнитный момент двигателей, согласуя вращающие моменты регулируемых АД с реальными условиями сцепления колес осей, по которым ведётся управление. Они используются и при совместном, и при индивидуальном регулировании АД ТЭП.

В настоящее время можно условно выделить несколько основных алгоритмов, используемых в таких системах:

- 1) непосредственное регулирование проскальзывания колёс в заданном диапазоне;
- 2) самонастройка на максимум характеристики сцепления (экстремальное регулирование);
- 3) регулирование проскальзывания или экстремальное регулирование с



подавлением фрикционных автоколебаний;

4) периодическое приближение к максимуму характеристики сцепления (приближённое «нащупывание» максимума).

Необходимо отметить, что для реализации всех четырёх перечисленных вариантов необходимо высокودинамичное регулирование электромагнитного момента АД по отклонению, которое не могут обеспечить скалярные СУ. Для этого требуются СУ АД с наиболее точные и высокودинамичные, в работах [36;43;44;72] обосновано, что для использования ТЭП потенциальных условий сцепления не менее, чем на 90 % постоянная времени электромеханического преобразователя (в который входят статический преобразователь с СУ и питаемый от него АД), в зависимости от параметров механической части ТЭП должна быть менее 4 – 5 мс

Напомним, что СУ АД обычно разделяют на три большие группы [65;79;80;98] (рис. 1.13), которые расположены на рисунке в порядке создания (появления) соответствующих систем.



Рис. 1.13. Основные типы СУ АД

В скалярных системах регулируются только модули базовых векторов АД; в векторных СУ регулируется модуль и точное положение векторов на плоскости координат; в системах разрывного управления регулируется модуль и сектор плоскости координат, в котором находится контролируемый вектор.

Сравнение основных характеристик трех названных типов СУ АД приведено в таблице 1.1 [99; 86;65].

## Технические характеристики СУ АД

Вид СУ Параметр	Скалярная СУ по принципу $U/f = \text{const}$ (без ДЧВ)	Векторная СУ с подчиненным регулированием (с ДЧВ и ШИМ)	СУ с разрывным управлением	
			ДТС (с ДЧВ)	ДТС (без ДЧВ)
Время нарастания, мс	150	10...20	1...2	1...2
Статическая ошибка, %	$\pm (1...3)$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm (0,1...0,5)$
Динамическая ошибка, %	3	0,3	0,1	0,4

Сравнение показывает, что наилучшими свойствами по быстродействию и точности обладают системы ДТС при наличии датчика частоты вращения, поэтому они могут быть использованы в ТЭП с АД для высокودинамичного регулирования момента и скорости АД в нестационарных режимах. Кроме того, они менее чувствительны к возмущениям и изменению параметров, чем векторные. Подобные системы, собственно, и были впервые предложены для тягового электропривода М. Депенброком [83] и в настоящее время находят применение в зарубежном тяговом электроприводе.

В качестве примера рассмотрим принципы функционирования нескольких систем реализации предельного коэффициента сцепления. Функциональная схема ТЭП с регулированием проскальзывания и подавлением колебаний приведена на рис. 1.14 [45;48]. В системе управления имеется внешний контур регулирования по отклонению частоты вращения АД и внутренний контур управления моментом. Для определения задания частоты вращения АД, приведённой к линейной скорости колеса, выполняется интегрирование задания ускорения. Производится выбор задания ускорения между двумя значениями:  $a_0$  и  $a_1$ . Причём  $a_0$  в тяговом режиме меньше ускорения локомотива  $a_L$  на величину  $\Delta a$ , а  $a_1$  – больше на  $\Delta a$  (в тормозном режиме наоборот). Выходной сигнал регулятора частоты является входным для

внутреннего контура управления моментом, при этом в СУ верхнего уровня предусмотрено ограничение момента в зависимости от позиции контроллера машиниста.

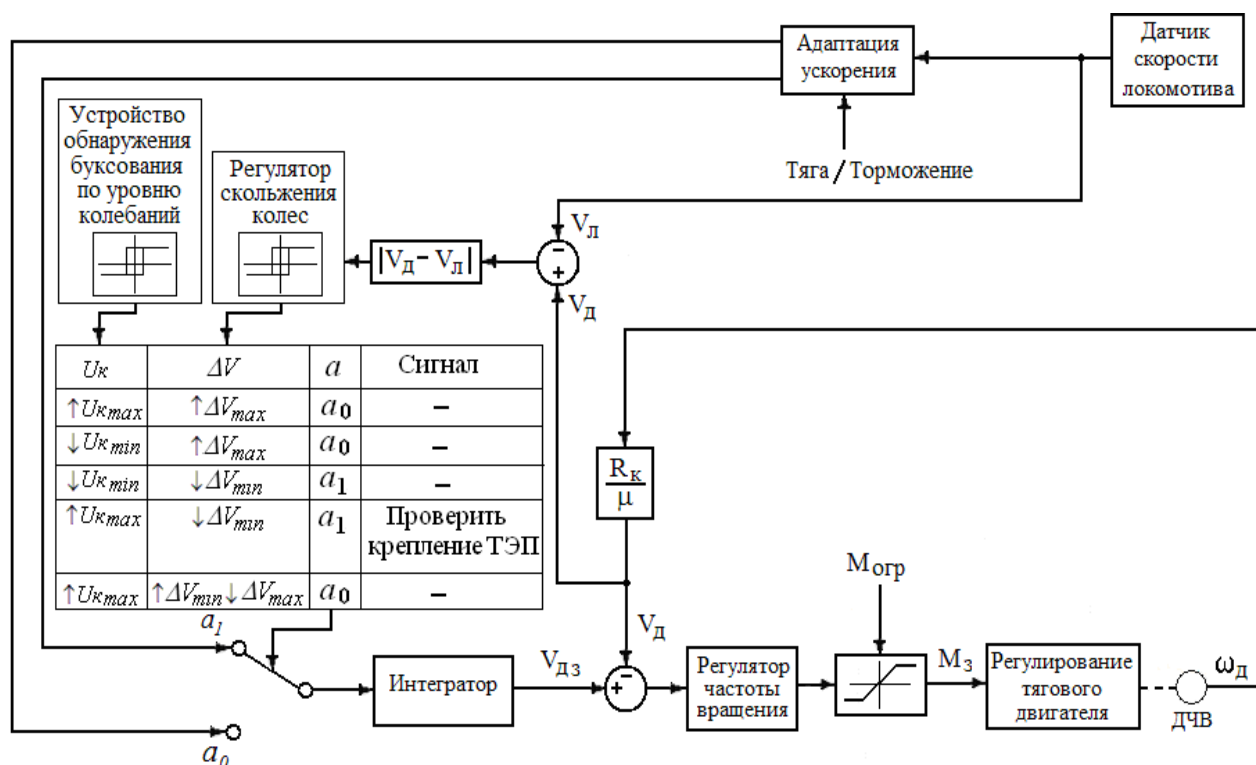


Рис. 1.14. Схема функциональная СУ ТЭП с регулированием проскальзывания

СУ осуществляет выбор между величинами ускорения  $a_1$  и  $a_0$  по логической таблице переключений (рис. 1.14), на которую передаются сигналы релейного регулятора скольжения колёс и устройства контроля колебаний, также имеющего релейную характеристику и отслеживающего уровень колебаний корпуса АД в заданных частотных диапазонах. Значение величины  $\Delta a$ , которое складывается с  $a_л$  или вычитается из величины ускорения локомотива в процессе регулирования проскальзывания, адаптируется к массе состава по методике, принятой на зарубежных локомотивах [38;41], основанной на сопоставлении силы тяги и измеренного ускорения. В блоке регулирования момента АД, на который поступает задание момента  $M_з$  с регулятора скорости (рис. 1.14) должно выполняться наиболее динамичной СУ АД (табл.

1.1). Регуляторы скорости (частоты вращения) при этом предлагается использовать пропорциональные (П), пропорционально-интегральные (ПИ) и даже модальные.

Таким образом, скорость колеса периодически возрастает по отношению к скорости локомотива, увеличивая проскальзывание и коэффициент сцепления (рис. 1.1) до максимального (и слегка заходя в нестабильную зону, где снижается коэффициент сцепления и увеличиваются вибрации), после чего скорость колеса снижается, вновь уменьшая проскальзывание, повышая коэффициент сцепления и подавляя вибрации в ТЭП.

Значения проскальзывания (минимального и максимального) устанавливаются предварительно на основе натуральных испытаний, а затем СУ может выполнить их адаптацию в процессе движения локомотива в зависимости от скорости. В свою очередь необходимое для работы СУ значение линейной скорости можно определять косвенно, используя так называемую псевдобегунковую ось [38,39;48], либо измерять специальным датчиком. С использованием значений линейной скорости в заданные промежутки времени вычисляется ускорение локомотива, определять его путём дифференцирования скорости нецелесообразно, так как это может приводить к большим погрешностям.

Так как оптимальное проскальзывание зависит от многих факторов, и, кроме того, проскальзывание весьма сложно измерять, применяется также экстремальное регулирование (самонастройка на максимум) [38,40].

В самонастраивающихся системах [38;40;41;65] регулирование скольжения осуществляется постепенным увеличением электромагнитного момента АД и по ходу этого увеличения СУ фиксируется переход колесной пары из упругого (при малых проскальзываниях на восходящей ветви) в действительное скольжение (на падающую ветвь характеристики, рис 1.1). Сам переход фиксируется по отклонению задания момента  $M_{d3}$  от экстремального зна-

чения, определяемого при помощи блоков «накопитель экстремальных значений» и «логика поиска» на заданное значение  $\Delta M$  (рис. 1.15) [40;45]. При этом СУ реагирует на произошедший переход снижением электромагнитного момента, что помогает удержать колеса в области максимума сцепления. Это происходит до тех пор, пока сила тяги не станет меньше предельной по сцеплению. Подобные системы экстремального регулирования испытывались за рубежом не только на электровозах (серий 120, 182001), но и на трамвайных вагонах и успешно применяются [40].

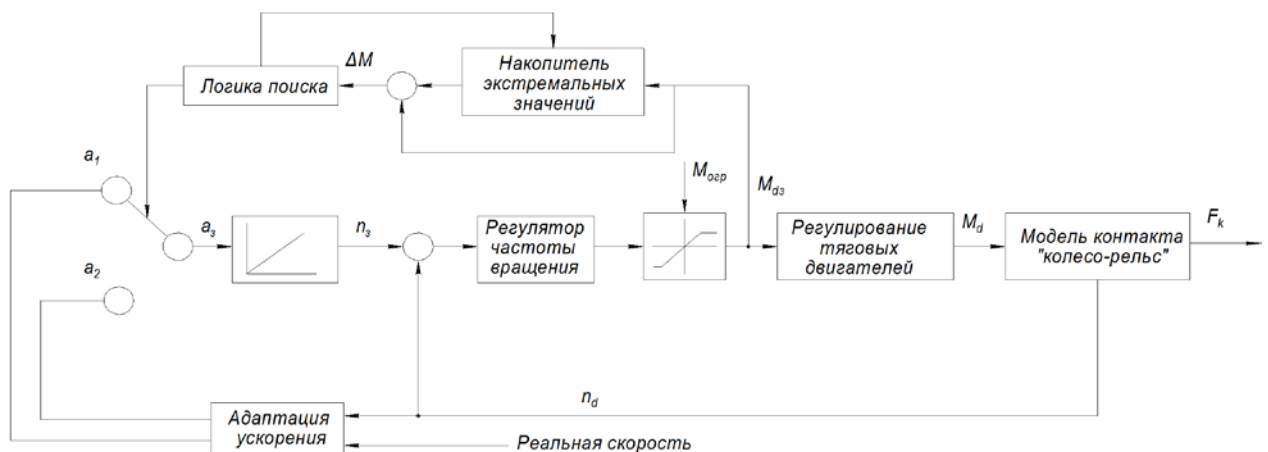


Рис. 1.15. Схема, поясняющая принцип экстремального регулирования

При индивидуальном управлении АД в системах с регулированием проскальзывания или самонастраивающихся на экстремум системах на предел по сцеплению выводится ТЭП каждой оси. При совместном управлении двигателями, которые подключены к одному инвертору, возможны различные способы и алгоритмы управления [28;30;41;100-109]: по двигателю первой оси тележки; по двигателю второй оси тележки; по наиболее быстро вращающемуся двигателю; с учётом энергосберегающего регулирования потокосцепления статора и др., в том числе, разработанные и исследованные при непосредственном участии автора [100-109].

В ряде работ [39;42] с целью снижения износа элементов механической части ТЭП авторы предлагают не выходить на максимум сцепления, где  $k=1$  (рис. 1.1) и вероятно попадание ТЭП в нестабильную зону автоколебания, а

регулировать ТЭП при  $k = 0,8-0,9$ . В данных системах снижается скорость увеличения момента АТД; в случае непредвиденного увеличения проскальзывания колёс предусмотрено активное подавление колебаний тяговой передачи.

Существуют и менее точные алгоритмы периодического приближения к максимальному использованию сил сцепления. Их можно пояснить на основе рис. 1.16, где условно изображены максимальный момент, который можно реализовать в данных условиях сцепления (экстремум кривой крива), и момент АТД, который обеспечивает СУ.

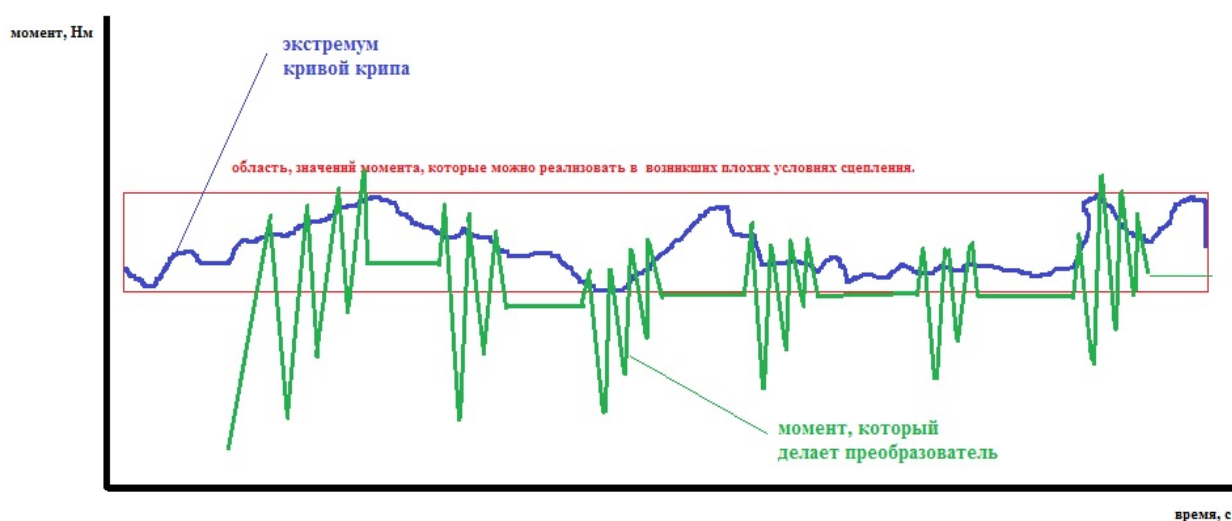


Рис. 1.16. Пояснение алгоритмов приближённого «нащупывания» максимума характеристики сцепления

Сначала момент увеличивается, колесо проходит восходящую часть кривой крива, экстремум и далее попадает на падающую часть кривой, это событие фиксируется, и момент АТД уменьшается, но уменьшается не до того уровня, с которого начался его рост, а до большего, затем опять всё повторяется. Получается пилообразная кривая, - «ёлочка» (рис. 1.16), причём с большой частотой (около 100 Гц). Всякий раз момент снижается меньше, чем в прошлый. Когда размах этих колебаний уменьшается до некоторой заданной величины, момент снижается в последний раз, и некоторое время локомотив спокойно едет с тем же заданием момента (это горизонтальные участки на рис. 1.16). Но очень скоро СУ начинает «беспокоиться», - не

улучшились ли условия сцепления? И опять резко поднимается момент, и всё начинается сначала. При этом СУ стремится избегать резонансных частот систем колесо-колесо, колёсная пара-ротор и др.

Подобные алгоритмы были опробованы при испытаниях электровоза ЭП10 и гибридного маневрово-вывозного тепловоза ТЭМ9Н, но они сопровождаются существенными вибрациями и динамическими нагрузками в механической части, требуют специальной жесткой конструкции механической передачи и поэтому внедрены на данных локомотивах не были.

### **1.3. Классификация алгоритмов управления ТЭП в режиме реализации предельных усилий и постановка задачи**

Подытоживая вышеизложенный материал, можно классифицировать алгоритмы управления ТЭП в режиме реализации предельных тяговых усилий, разделив их по принципу функционирования на две большие группы: 1) алгоритмы защиты от буксования и юза; 2) алгоритмы реализации потенциального коэффициента сцепления (рис. 1.17).

Алгоритмы первой группы начинают функционировать только в случае смещения рабочей точки на нисходящую ветвь характеристики сцепления в зону буксования и всегда включают в себя два этапа: а) обнаружение буксования (или юза); б) подавление избыточного проскальзывания (возвращение рабочей точки на восходящий участок). Алгоритмы второй группы встраиваются в систему регулирования скорости тяговых двигателей, обеспечивая при необходимости реализацию предельного коэффициента сцепления.

Реализация ТЭП предельного коэффициента сцепления при индивидуальном регулировании АД наиболее отработана, выводит каждую ось на предел по сцеплению и позволяет получить максимальные тяговые усилия. Но, в то же время имеющаяся для АД возможность параллельного включения (которое иногда называю электрическим спариванием осей) относится к преимуществам асинхронных двигателей и существенно снижает

ет габариты и стоимость ТЭП.

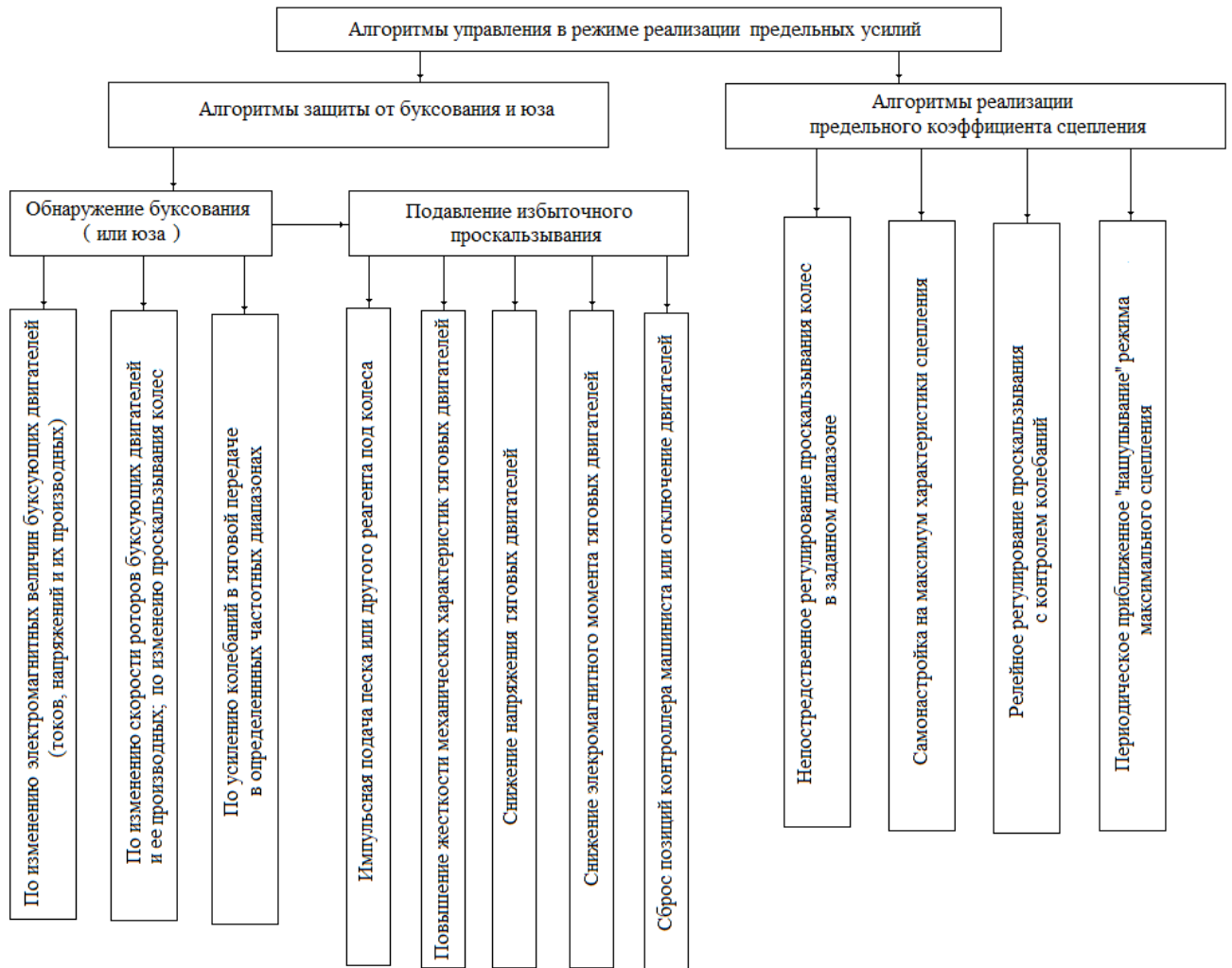


Рис.1.17. Классификация алгоритмов управления ТЭП в режиме реализации предельных усилий

**Цель диссертационной работы** – повышение предельных усилий, реализуемых электроприводом локомотивов при совместном управлении асинхронными тяговыми двигателями.

**Задачи исследования:**

1. Анализ алгоритмов управления ТЭП в режиме реализации предельных усилий и обоснование применения в тяговом электроприводе систем разрывного управления АД.
2. Разработка функциональной схемы СУ, способа и алгоритмов управления ТЭП с совместным регулированием АД на пределе сцепления.



3. Разработка математической и компьютерной модели СУ ТЭП с совместным управлением параллельно включённых АД на пределе сцепления.

4. Разработка для механической подсистемы ТЭП гибридного маневрово-вывозного тепловоза ТЭМ9Н математических и компьютерных моделей и анализ на их основе динамических процессов в ТЭП.

5. Создание электромеханической компьютерной модели ТЭП гибридного маневрово-вывозного тепловоза и исследование на основе численных экспериментов алгоритмов управления разгоном и электрическим торможением локомотива с совместным регулированием АД в режиме реализации предельных усилий.

При исследовании ТЭП с АД, запитанными в силовом канале от статических преобразователей частоты со сложной системой управления, применение аналитических методов в силу значительной нелинейности системы затруднено. Поэтому в качестве основных методов и средств исследования выбраны методы математического и компьютерного моделирования электрических и механических систем с учётом положений теории электрических машин, теории электропривода, теории автоматического управления, а также апробированные на решении сложных исследовательских задач программные комплексы: MatLab/Simulink и «Универсальный механизм» (UM).

## РАЗДЕЛ 2. СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЭП С СОВМЕСТНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ АД

Развитие асинхронного тягового электропривода и внедрение его на отечественных локомотивах требует совершенствования алгоритмов управления асинхронными тяговыми двигателями как при индивидуальном питании двигателя каждой оси от отдельного автономного инвертора, так и при параллельном подключении двигателей тележки к общему автономному инвертору. На новых локомотивах внедряются современные системы управления асинхронными двигателями: векторное управление, прямое управление моментом (DTC). В этих системах предусматривается использование адаптивных моделей двигателей для вычисления ряда регулируемых выходных параметров (потокосцепления, электромагнитного момента и др.) на основе измеряемых переменных состояния АД (фазных токов, напряжения в промежуточном контуре и др.)

Индивидуальное регулирование осей позволяет одновременно учесть в системе управления переменные состояния каждого двигателя, что улучшает динамику управления и повышает реализуемые тяговые и тормозные усилия. Однако весьма часто по экономическим соображениям и условиям размещения, применяют совместное регулирование двигателей в пределах тележки, в этом случае измеренные переменные состояния АД, поступающие в систему управления ТЭП (рис. 2.1), не могут быть учтены одновременно для каждого двигателя требуемым оптимальным образом. В связи с этим необходимо отрабатывать алгоритмы управления при совместном регулировании, позволяющие обеспечить высокие тяговые качества локомотива и исключаящие нестационарные динамические режимы (буксование и юз), сопровождающиеся повышенными динамическими нагрузками [100;101].

В рамках пилотного проекта Людиновским тепловозостроительным заводом (ЛТЗ), входящим в ОАО «Синара – Транспортные машины», при участии автора был разработан гибридный маневрово-вывозной тепловоз с со-

вместным регулированием АД в пределах тележки, один из вариантов функциональной схемы которого, рассмотренный в работах [100;101;106;107], приведён на рис. 2.1 (аккумуляторная батарея на данной схеме не изображена).

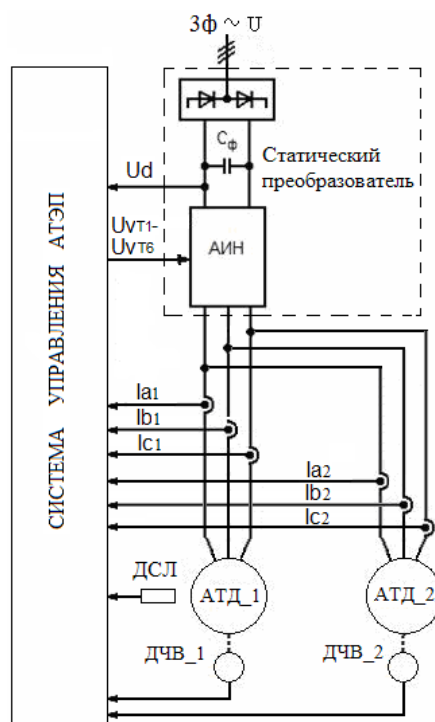


Рис. 2.1. Обобщенная функциональная схема ТЭП двухосной тележки тепловоза при использовании датчиков тока в цепи каждого АД

В СУ ТЭП гибридного тепловоза ТЭМ9Н внедрены наиболее динамичные алгоритмы разрывного управления АД при регулировании потокосцепления статора, позволяющие реализовать и испытать различные варианты управления приводом на пределе сцепления при совместном регулировании. Стратегия разрывного управления тягой заимствована [83-86], ввиду отсутствия в России конкурентных стратегий. Она имеет три основных преимущества:

- 1) достижение предельной физически возможной скорости изменения момента, что позволяет построить систему использования реального коэффициента сцепления;
- 2) минимизация частоты переключения приборов;

3) получение максимально возможной первой гармоники напряжения (соответственно, - величины потока, - в режиме однократной коммутации).

Кроме того, благодаря использованию разрывного управления АТД с релейными регуляторами момента и потокосцепления обеспечивается высокая стабильность работы тягового привода при колебаниях напряжения в промежуточном контуре статического преобразователя и изменении параметров объекта управления.

## 2.1. Способ и алгоритмы управления ТЭП гибридного тепловоза в режиме реализации предельных усилий

В процессе исследований и проектирования был выбран альтернативный вариант электрической схемы с одним датчиком тока на два параллельно работающих АТД как более простой и дешевый (рис. 2.2) [102;103].

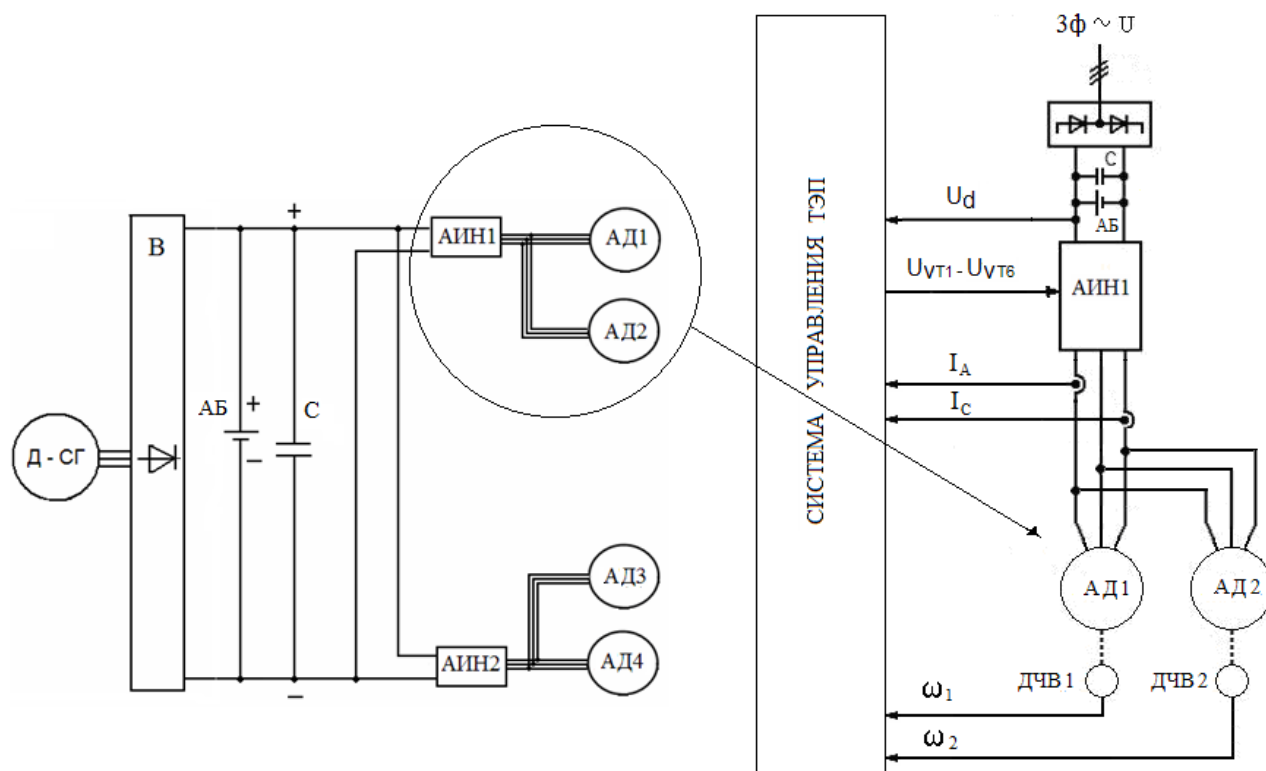


Рис. 2.2. Обобщенная функциональная схема электрической части ТЭП тепловоза ТЭМ9Н

В современных условиях целесообразно, наряду с внедрением импортных систем управления, создавать и совершенствовать с учетом мировых

достижений собственные алгоритмы управления ТЭП, используя для их обработки, как уже имеющиеся образцы локомотивов, так и новые компьютерные технологии. С нашей точки зрения для этих целей хорошо подходит четырехосный гибридный маневрово-вывозной тепловоз ТЭМ9Н.

Локомотив имеет совместное регулирование ТЭП с подключением двух АД тележки к автономному инвертору напряжения и комплекс технических решений в системе электропитания, снимающих ряд ограничений по управлению тяговым электроприводом в пусковых режимах по сравнению с обычным электроприводом тепловоза. Применение в системе электропитания аккумуляторной литий-ионной батареи (АБ) с огромным энергозапасом (300 кВт\*часов) и суперконденсаторов (С) позволяет отойти от традиционного ступенчатого (позиционного) регулирования мощности дизеля на тягу и реализовать мечту – регулировать силу тяги, а не поддерживать производство силы тяги на скорость постоянным в соответствии с позицией контроллера машиниста. (Двухнаправленный преобразователь заряда-разряда, через который подключена аккумуляторная батарея, на схеме не показан).

Функциональная схема СУ ТЭП ТЭМ9Н, модифицированная с учетом предлагаемого способа и алгоритмов регулирования скольжения колес, приведена на рис. 2.3, причём, на рисунке показана схема СУ ТЭП первой тележки, для двигателей второй тележки (АТД3, АТД4) схема аналогична [103].

При пуске локомотива контроллером машиниста (КМ) для СУ ТЭП сначала задается максимальная сила тяги, поступающая в блок вычисления задания момента с учетом ограничений (БВЗМ) и фактически определяющая ограничение момента АД в контуре регулирования момента. Но сигнал задания момента (следовательно, и сам момент равны нулю), пока нет задания на скорость. Далее при помощи КМ задается требуемая скорость локомотива, поступающая в блок вычисления задания скорости (БВЗС) и определяющая ограничение задания на частоту вращения АД в контуре скорости. После

этого появляется задание момента на выходе регулятора частоты вращения АТД, и локомотив начинает разгон, постепенно увеличивая силу тяги (до заданной максимальной величины, если позволяет сцепление) и пытается достичь установленной КМ скорости [103].

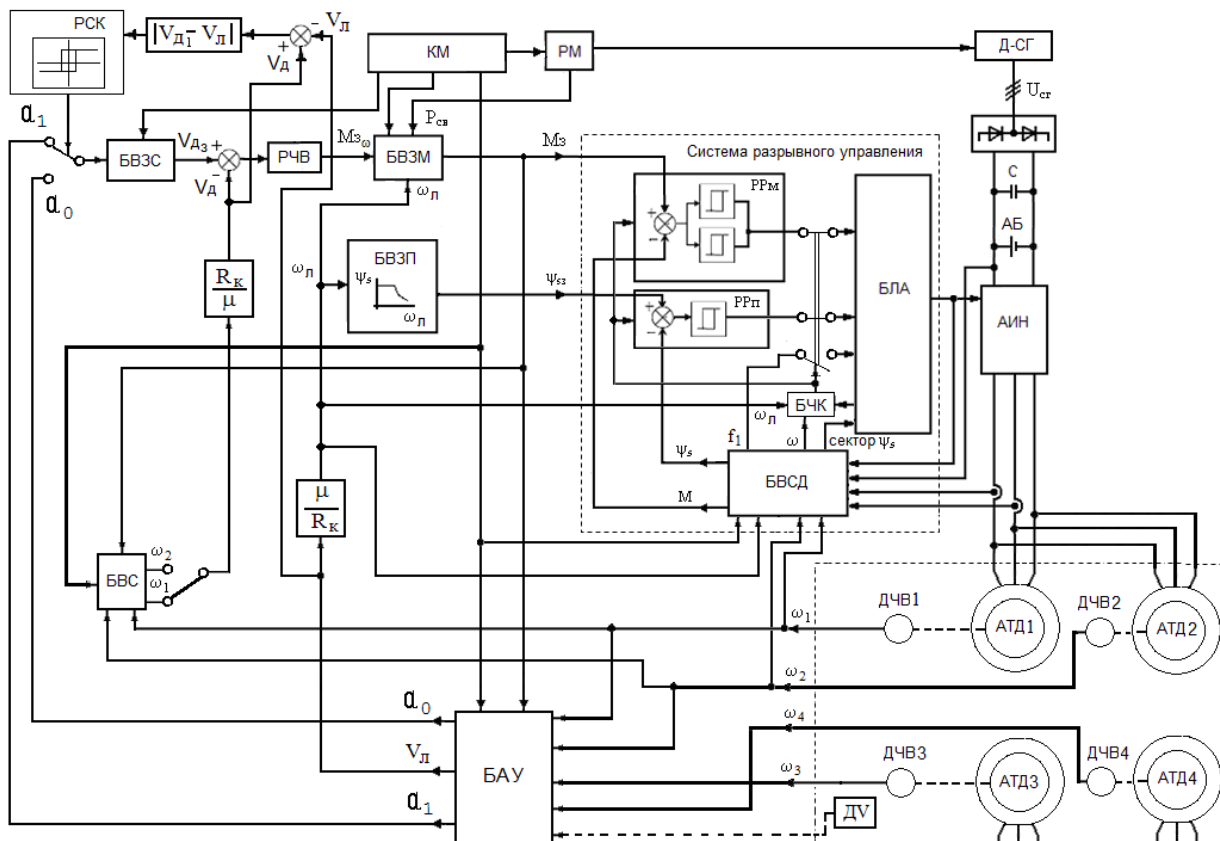


Рис. 2.3. Функциональная схема СУ ТЭП тепловоза ТЭМ9Н, модифицированная с учетом регулирования скольжения колес

С учетом зарубежного и отечественного опыта [38;40;41;45;65;103] вычисление задания частоты вращения АТД (рис.2.3), приведенной к скорости колеса ( $V_{Дз}$ ), производится в БВЗС посредством интегрирования задания ускорения колёсной пары ( $a_1$  или  $a_0$ ). Это задание, в свою очередь, вычисляется в БАУ (блоке адаптации ускорения). Оно жестко привязано к ускорению локомотива, что позволяет либо подогнать колесо (увеличить его скольжение относительно скорости локомотива), либо замедлить, чтобы выехать из зоны буксования при тяговом режиме или юза при тормозном:

- в тяговом режиме

$$a_1 = a_n + \Delta a_{k1}; \quad a_0 = a_n - \Delta a_{k2}; \quad (2.1)$$

- в тормозном режиме

$$a_1 = a_l - \Delta a_{k1}; \quad a_0 = a_l + \Delta a_{k2}; \quad (2.2)$$

где  $a_l$  - ускорение локомотива;  $a_1$  и  $a_0$  - задания на ускорение колес;  $\Delta a_{k1}$  и  $\Delta a_{k2}$  – небольшие положительные величины, адаптируемые к массе состава и условиям движения [102;103].

Ускорение локомотива  $a_l$ , изменяющееся в процессе движения, постоянно вычисляется в БАУ по изменению оценочной скорости локомотива  $V_l$  (определяемой по измеренным частотам вращения роторов АТД  $\omega_1$ - $\omega_4$ ) за заданные промежутки времени  $\Delta t$  ( $a_l = \Delta V_l / \Delta t$ ). Если на локомотиве установлен датчик линейной скорости (ДV), его сигнал показан пунктиром на рис. 2.3, то для вычисления ускорения локомотива лучше использовать этот сигнал.

Переключение между значениями  $a_1$  и  $a_0$  осуществляется под контролем релейного регулятора скольжения колес (РСК) с адаптивным гистерезисным допуском. Для снижения фрикционных автоколебаний на вход РСК в режиме тяги подается абсолютная величина разности между частотой вращения двигателя первой (по ходу движения) оси тележки (имеющей меньшую вертикальную нагрузку), приведенной к линейной скорости колеса ( $V_{д1}$ ), и скоростью локомотива ( $V_l$ ). То есть, в данном случае для первой тележки (рис. 2.3) используется абсолютная величина скольжения колес первой оси (в режиме торможения – второй оси тележки, так как в этом режиме вторая ось имеет меньшую вертикальную нагрузку). Пока величина скольжения не превысит допустимый верхний порог РСК, БВЗС в режиме тяги интегрирует величину  $a_1$ , после превышения порога - величину  $a_0$  (в режиме торможения - наоборот). Обратное переключение с  $a_0$  на  $a_1$  происходит, когда скольжение колес станет меньше нижнего порога, заданного в РСК [102;103].

Задание на скорость  $V_{д3}$ , вычисленное БВЗС путем интегрирования  $a_1$  или  $a_0$ :

$$V_{д3} = \int a_m dt, \quad \text{где } m=0; 1; \quad (2.3)$$

сравнивается с измеряемой приведенной частотой вращения ротора  $V_{д1}$ , и полученный сигнал поступает к регулятору частоты вращения (РЧВ), вычисляющему задание на момент ( $M_{3\omega}$ ), которое затем ограничивается в БВЗМ на требуемом уровне ( $M_3$ ). Рассматривались два варианта РЧВ: пропорциональный (П) и пропорционально-интегральный (ПИ) [102;103].

Полученное задание на момент  $M_3$ , а также задание на модуль вектора потокосцепления статора  $|\bar{\Psi}_s|$ , определяемое в блоке вычисления задания потокосцепления (БВЗП) в зависимости от скорости локомотива, подаются в систему разрывного управления (РУ) [83;85;103]. Система РУ содержит трёхпозиционные релейные регуляторы момента (РРМ) и двухпозиционные релейные регуляторы потокосцепления (РРП), блок вычисления состояния двигателя (БВСД), блок логического автомата (БЛА) и блок частоты коммутаций (БЧК). При полном поле БЛА осуществляет выбор сигналов на переключение транзисторов АИН в зависимости от состояния релейных регуляторов и сектора плоскости координат, где в данное время находится вектор потокосцепления статора (таблица 2.1). (В таблице  $U_1 - U_7$  – базовые вектора двухуровневого АИН) [85;65].

Таблица 2.1

Таблица переключений АИН при многократной коммутации ключей по сигналам РРМ, РРП и сектору  $\bar{\Psi}_s$



		Сектор $\bar{\Psi}_s$					
$\Delta\Psi_s$	$\Delta M$	I	II	III	IV	V	VI
↑	↑	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	$U_1$
	0	$U_7$	$U_0$	$U_7$	$U_0$	$U_7$	$U_0$
	↓	$U_6$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$
↓	↑	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	$U_1$	$U_2$
	0	$U_0$	$U_7$	$U_0$	$U_7$	$U_0$	$U_7$
	↓	$U_5$	$U_6$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$

БЧК контролирует частоту коммутаций транзисторов АИН и подает



сигналы на изменение ширины гистерезисных допусков релейных регуляторов или переход к однократной коммутации транзисторов на периоде (полноблочному режиму) при ослаблении поля [102;103]. В режиме ослабления поля БЛА вырабатывает сигналы переключения транзисторов в зависимости от положения вектора потокосцепления и требуемой частоты напряжения статора  $f_1$  (рис. 2.3, табл. 2.2).

Таблица 2.2

Таблица переключений АИН при однократной коммутации ключей по сектору вектора потокосцепления статора  $\bar{\Psi}_s$  и углу поворота вектора напряжения статора  $\bar{U}_s$

Условие переключения	Сектор $\bar{\Psi}_s$					
	I	II	III	IV	V	VI
Изменение угла поворота $\bar{U}_s$ $\varphi_1$ на $\pi/3$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	$U_1$	$U_2$

В полноблочном режиме частота тока статора определяется по формуле (1.5) или (1.7). Угол поворота вектора напряжения статора  $\varphi_1$  вычисляется по выражению

$$\varphi_1 = \int \omega_1 dt \quad (2.4)$$

где угловая частота тока статора  $\omega_1$  определяется как  $\omega_1 = 2\pi f_1$ .

Величина электромагнитного момента АД в полноблочном режиме определяется величиной абсолютного скольжения  $f_2$  в формулах (1.5; 1.7), и для того, чтобы воздействовать на электромагнитный момент двигателя необходимо изменять абсолютное скольжение.

Таким образом, во всех режимах регулирования, кроме полноблочного, момент АД находится внутри релейного гистерезисного коридора; решение об уменьшении момента принимается по достижении верхней границы коридора; об увеличении - по достижении нижней. Это позволяет СУ АД в зоне полного, поля, для которой характерны наиболее высокие усилия тяги и

торможения, обрабатывать задание момента АД, как с высоким быстродействием, так и с высокой точностью, необходимой для регулирования ТЭП на пределе по сцеплению в соответствии с требуемыми алгоритмами (2.1-2.3). Ширина коридора определяет частоту переключений транзисторов, момент очередной коммутации заранее неизвестен. Для минимизации потерь в двигателе и поддержания комфортной температуры кристаллов частота (некая средняя) переключения вентилях АИН изменяется в зависимости от скорости локомотива. Характер изменения частоты можно представить в виде ломаной линии (рис. 2.4), где условно показано 5 режимов управления, причем, в начале разгона, на низкой скорости, частота коммутаций фиксированная.

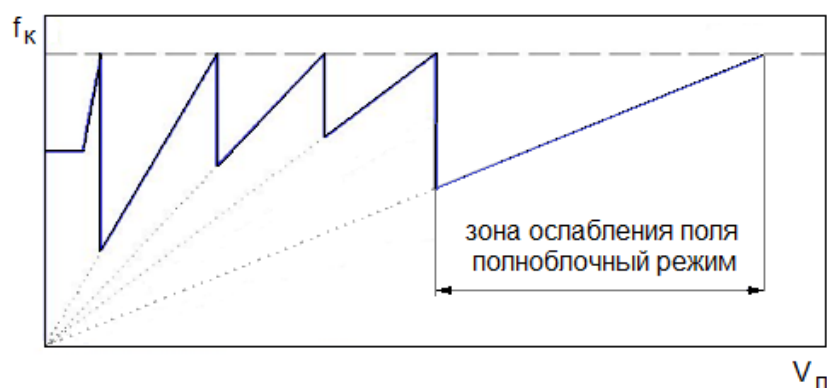


Рис. 2.4. График, поясняющий принцип изменения частоты переключений транзисторов АИН при изменении скорости локомотива:  
 $f_k$  – частота коммутаций;  $V_л$  – скорость локомотива

Контроль состояния АД и определение текущих вычисляемых переменных машины по модели осуществляется в блоке, условно названном БВСД. Для этого на вход данного блока подается текущее напряжение промежуточного контура (dc-link) и матрица состояния ключей АИН для определения мгновенного значения фазных напряжений; токи двух фаз АИН, потребляемые двумя двигателями тележки (АТД1, АТД2 для первой тележки), скорости роторов АД тележки ( $\omega_1$  и  $\omega_2$ ), по которым определяется средняя скорость ротора ( $\omega$ ) для модели АД. Модель АД, общая для двух двигателей тележки (усредненная) [102], построена в неподвижных осях  $\alpha$ - $\beta$  по уравнениям [66]:

$$\begin{aligned}
\frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} &= -\frac{R_s}{\sigma L_s} \psi_{s\alpha} + \frac{R_s L_\mu}{\sigma L_s L_r} \psi_{r\alpha} + U_\alpha, \\
\frac{d\psi_{s\beta}}{dt} &= -\frac{R_s}{\sigma L_s} \psi_{s\beta} + \frac{R_s L_\mu}{\sigma L_s L_r} \psi_{r\beta} + U_\beta, \\
\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} &= \frac{R_r L_\mu}{\sigma L_s L_r} \psi_{s\alpha} - \frac{R_r}{\sigma L_r} \psi_{r\alpha} - p_n \omega \psi_{r\beta}, \\
\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} &= \frac{R_r L_\mu}{\sigma L_s L_r} \psi_{s\beta} - \frac{R_r}{\sigma L_r} \psi_{r\beta} + p_n \omega \psi_{r\alpha}, \\
M &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_\mu}{\sigma L_s L_r} (\psi_{s\beta} \psi_{r\alpha} - \psi_{s\alpha} \psi_{r\beta}),
\end{aligned} \tag{2.5}$$

где  $U_\alpha$ ,  $U_\beta$  - напряжения статора по осям  $\alpha, \beta$  соответственно;  $\sigma = 1 - \frac{L_\mu^2}{L_s L_r}$  - коэффициент рассеяния двигателя усреднённой модели;  $L_\mu$  - взаимная индуктивность усреднённой модели АД между обмотками статора и ротора;  $L_s$  - собственная индуктивность для обмотки статора;  $L_r$  - собственная индуктивность усреднённой модели АД для обмотки ротора, приведённая к обмотке статора;  $R_s$ ,  $R_r$  - активное сопротивление фазы статора и приведённое сопротивление ротора усреднённой модели;  $\psi_{s\alpha}$ ,  $\psi_{s\beta}$  - потокосцепления обмоток статора усреднённой модели;  $\psi_{r\alpha}$ ,  $\psi_{r\beta}$  - потокосцепления обмоток ротора усреднённой модели;  $\omega$  - средняя скорость роторов двигателей тележки;  $p_n$  - число пар полюсов двигателя;  $M$  - электромагнитный момент усреднённой модели двигателя.

Например, параметры усреднённой модели АД для первой тележки:

$$\begin{aligned}
R_s &= \frac{R_{sATD1} + R_{sATD2}}{2}; \quad R_r = \frac{R_{rATD1} + R_{rATD2}}{2}; \quad \omega = \frac{\omega_{ATD1} + \omega_{ATD2}}{2}; \\
L_s &= \frac{L_{sATD1} + L_{sATD2}}{2}; \quad L_r = \frac{L_{rATD1} + L_{rATD2}}{2}; \quad L_\mu = \frac{L_{\mu ATD1} + L_{\mu ATD2}}{2};
\end{aligned} \tag{2.6}$$

где  $R_{sATD1}$ ,  $R_{sATD2}$ ,  $R_{rATD1}$ ,  $R_{rATD2}$ ,  $L_{sATD1}$ ,  $L_{sATD2}$ ,  $L_{rATD1}$ ,  $L_{rATD2}$ ,  $L_{\mu ATD1}$ ,  $L_{\mu ATD2}$  - соответствующие параметры АД1 и АД2;  $\omega_{ATD1}$ ,  $\omega_{ATD2}$  - частоты вращения роторов АД1 и АД2 соответственно.

Трёхфазные напряжения преобразуются к двухфазной системе  $\alpha, \beta$  по

уравнениям

$$\begin{aligned} U_\alpha &= U_a \\ U_\beta &= \frac{1}{\sqrt{3}}(U_b - U_c)' \end{aligned} \quad (2.7)$$

где  $U_a, U_b, U_c$ , - фазные напряжения АТД.

Токи усредненной двухфазной модели двигателя тележки по осям  $\alpha$  и  $\beta$  определяются через потокосцепления, найденные при решении (2.5) из системы алгебраических уравнений [66]

$$\begin{aligned} i_{s\alpha} &= \frac{\psi_{s\alpha}L_r - \psi_{r\alpha}L_\mu}{L_sL_r - L_\mu^2} & i_{s\beta} &= \frac{\psi_{s\beta}L_r - \psi_{r\beta}L_\mu}{L_sL_r - L_\mu^2} \\ i_{r\alpha} &= \frac{\psi_{r\alpha}L_s - \psi_{s\alpha}L_\mu}{L_sL_r - L_\mu^2} & i_{r\beta} &= \frac{\psi_{r\beta}L_s - \psi_{s\beta}L_\mu}{L_sL_r - L_\mu^2} \end{aligned} \quad (2.8)$$

где  $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ , - токи обмоток статора АТД по осям  $\alpha, \beta$  соответственно;  $i_{r\alpha}, i_{r\beta}$  - токи обмоток ротора АТД по осям  $\alpha, \beta$  соответственно.

По ним вычисляется модуль и положение вектора модельного тока статора (рис. 2.5).

$$|\vec{I}_s| = \sqrt{i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2}; \quad \cos \gamma_{I_s} = \frac{i_{s\alpha}}{|\vec{I}_s|}; \quad \sin \gamma_{I_s} = \frac{i_{s\beta}}{|\vec{I}_s|} \quad (2.9)$$

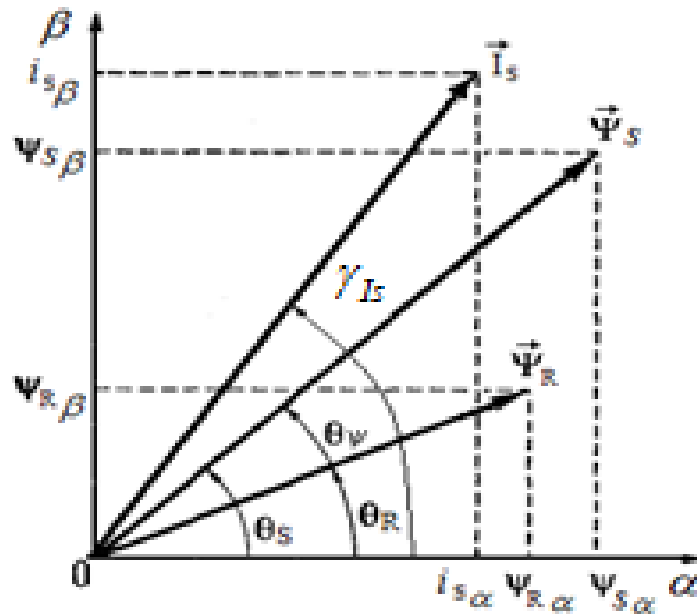


Рис. 2.5. Векторная диаграмма потокосцеплений статора и ротора и тока статора

Аналогично для модельного потокосцепления статора (рис. 2.5)

$$|\vec{\Psi}_s| = \sqrt{\psi_{s\alpha}^2 + \psi_{s\beta}^2}; \quad \cos \theta_s = \frac{\psi_{s\alpha}}{|\vec{\Psi}_s|}; \quad \sin \theta_s = \frac{\psi_{s\beta}}{|\vec{\Psi}_s|} \quad (2.10)$$

Как уже указывалось, в предлагаемом способе управления ТЭП локомотива при реализации предельных усилий выводится на предел по сцеплению ось тележки с меньшей вертикальной нагрузкой: в тяговом режиме – это первая ось и в тормозном режиме - вторая ось. Передача управления и соответственно переключение в блоке вычисления скорости (БВС) СУ (рис. 2.3) сигнала частоты вращения с  $\omega_1$  на  $\omega_2$  (и наоборот) происходит при изменении режима движения (тяга/торможение) по изменению знака задания на момент  $M_3$  на противоположный (отрицательный в при переходе от тяги к торможению и положительный при переходе от торможения к тяге). Применение при этом в СУ общей усреднённой модели (2.5 – 2.10) для двух двигателей тележки исключает колебания электромагнитных (и механических) переменных состояния при передаче управления с одного АТД на другой, которые могут возникать в системах с применением отдельных моделей для каждого АТД [28-30;100;101].

Момент двигателя, определяемый посредством решения дифференциальных уравнений (2.5), пропорционален произведению модулей вектора потокосцепления статора и потокосцепления ротора на синус угла между этими векторами [85;65].

$$M = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{\sigma L_S L_R} |\vec{\psi}_S| |\vec{\psi}_R| \sin(\theta_\psi), \quad (2.11)$$

где  $M$  – электромагнитный момент;  $p$  – число пар полюсов;  $L_S$ ,  $L_R$  и  $L_m$  - индуктивности фазы статора, ротора и взаимная индуктивность соответственно;  $\sigma$  – коэффициент рассеяния;  $\vec{\psi}_R, \vec{\psi}_S$  – векторы потокосцеплений ротора и статора;  $\theta_\psi$  – угол между вектором потокосцепления статора и вектором потокосцепления ротора.

Для ротора постоянная времени весьма велика, поэтому модуль потокосцепления у него меняется медленно. Если взять маленький промежуток времени, то и для статора модуль потокосцепления тоже можно условно считать постоянным. В силу этого можно осуществлять управление моментом АД, изменяя текущий угол между потокосцеплениями. Достичь этого можно, выбирая нужный вектор напряжения (табл. 2.1). Этот вектор обеспечит нужное взаимоположение векторов потокосцеплений и требуемое изменение момента и потокосцепления статора АД. При этом координатная плоскость разделяется на 6 секторов, в каждом из которых в определённый момент времени можно выбрать требуемый вектор, который вызовет нужное изменение момента и потокосцепления статора [83;85]. В системе используются лишь релейные регуляторы, а векторные преобразования, пересчёт систем координат, как в СУ с векторным управлением, не производятся. Но в итоге обеспечивается максимально быстрое регулирование электромагнитного момента, поддержание требуемого значения потокосцепления статора и вращение вектора потокосцепления с нужной частотой. [65;103].

Контроль состояния машины производится с использованием фактических значений тока, скорости роторов и фазных напряжений, датчиков температуры обмоток АД. Датчики тока (2 на пару параллельных моторов, рис. 2.3) используются для того, чтобы видеть отличие основной наблюдаемой координаты, - вектора среднего тока двигателей тележки, - от модельного тока. Фактический ток фазы С:  $i_{sCf} = -i_{sAf} - i_{sBf}$ , где  $i_{sAf}$ ,  $i_{sBf}$ , - фактические токи фаз А и В, измеренные датчиками.

Средние токи АД тележки по осям  $\alpha$ ,  $\beta$

$$i_{s\alpha f} = i_{sAf} / 2; \quad i_{s\beta f} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{sBf} - i_{sCf}) / 2 \quad (2.12)$$

Положение и модуль фактического вектора среднего тока двигателей тележки определяется по формулам

$$|\bar{I}_{sf}| = \sqrt{i_{s\alpha f}^2 + i_{s\beta f}^2}; \quad \cos \gamma_{Isf} = \frac{i_{s\alpha f}}{|\bar{I}_{sf}|}; \quad \sin \gamma_{Isf} = \frac{i_{s\beta f}}{|\bar{I}_{sf}|} \quad (2.13)$$

Фактический вектор среднего тока, определенный по (2.12; 2.13) сравнивается с модельным. Если модельный ток не там, где ожидалось - значит и потокосцепление не там, значит и момент не тот, и нужно теперь понять, где потокосцепление на самом деле и каков момент, внести коррективы.

Это можно сделать, например, с использованием выражений для потокосцеплений и момента с учётом фактического тока

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{s\alpha f}}{dt} &= U_{\alpha} - i_{s\alpha f} R_s; \\ \frac{d\psi_{s\beta f}}{dt} &= U_{\beta} - i_{s\beta f} R_s; \\ M &= \frac{3}{2} p (\psi_{s\alpha f} i_{s\beta f} - \psi_{s\beta f} i_{s\alpha f}) \end{aligned} \quad (2.14)$$

на основе сравнения их с выражениями для аналогичных модельных величин (2.5). То есть, модель (2.5) должна быть адаптивной и тем или иным образом подстраиваться под реалии. На локомотиве ТЭМ9Н корректируются несколько параметров модели машины. Но даже при коррекции единственного параметра, - сопротивления статора, - система уже стабильна, устойчива и робастна, но есть проблемы с некоторым отличием реального среднего момента от запланированного значения. При полном отключении коррекции система долгое время сохраняет стабильность с постепенным снижением качества управления вплоть до потери управляемости.

## 2.2. Математическое и компьютерное моделирование СУ ТЭП с совместным регулированием АТД

Чтобы исследовать различные алгоритмы управления ТЭП на модели, в

математическую и компьютерную модель СУ ТЭП, как и в реальную систему, должны входить модели составляющих её основных узлов: АД; полупроводникового статического преобразователя и используемых блоков и регуляторов, реализующих предлагаемые алгоритмы.

Математическая модель АД выполнена на основе двухфазной обобщенной машины с учётом принятых при таком представлении АД традиционных допущений [66;110] на основе тех же уравнений, что и усреднённая модель-наблюдатель (2.5- 2.8). Отличием является то, что в модель подставляются параметры соответствующих двигателей тележек для того, чтобы можно было смоделировать разброс параметров АД. Параметры двигателя АД917УХЛ1 приведены в приложении 1 (по данным завода-изготовителя).

Для моделирования современных полупроводниковых систем ТЭП с АД хорошо подходит и широко используется ПК MatLab/Simulink, ориентированный на моделирование электромеханических преобразователей полупроводниковых систем [45;65;98;111]. Поэтому компьютерное моделирование выполнено в основной библиотеке MatLab/Simulink с использованием метода подсистем: в более крупные подсистемы входят более мелкие по принципу «матрёшки».

Блок-диаграммы модели АД составлена по уравнениям (2.5-2.8), в качестве примера на рис. 2.6 приведена блок-диаграмма одной из подсистем модели двигателя. Её можно назвать подсистемой второго уровня, так как она сама входит в главную параметризованную подсистему АД верхнего уровня, где задаются параметры АД (которые можно изменять в процессе расчёта) и куда подводится напряжение. Вложенные блоки подсистем Subsystem1 – Subsystem4 (подсистемы третьего уровня) составлены по первым четырем уравнениям системы (2.5) для обмоток статора и ротора.

Блок-диаграмма усреднённой модели АД тележки имеет такой же вид (рис. 2.6), но в неё подставляются параметры, вычисляемые по формулам (2.6).



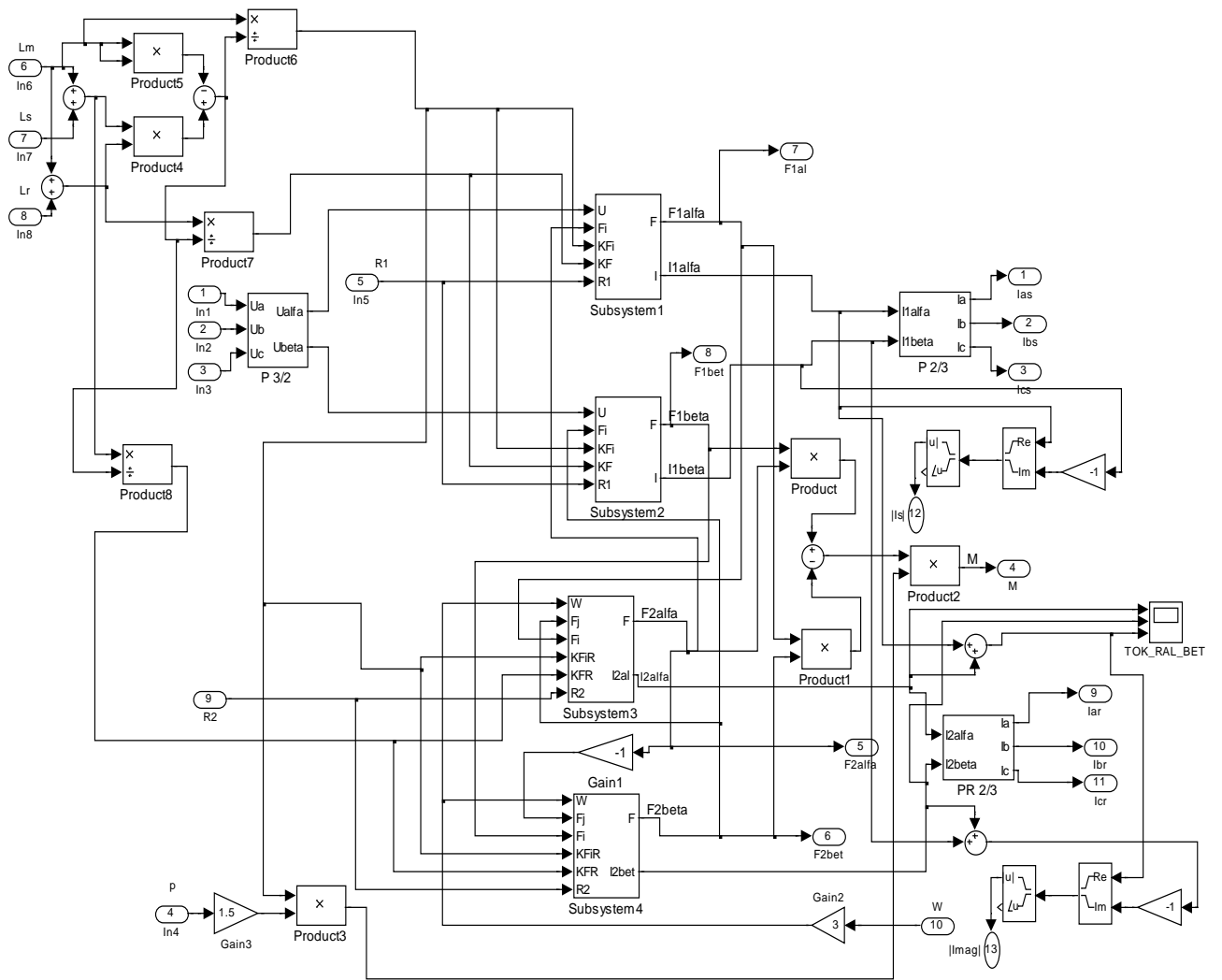


Рис. 2.6. Содержание модели подсистемы АД

При моделировании нестационарных режимов и последующего совмещения модели ТЭП с моделью механической части для сокращения времени расчёта принято решение ограничиться моделированием статического преобразователя на основе коммутационных функций [6; 13; 65].

В системах разрывного управления, как и при пространственно-векторной ШИМ в системах векторного управления вентили инвертора переключаются между несколькими определёнными состояниями. Для мостового двухуровневого АИН (рис. 2.7) существует известный набор векторов напряжения, называемых базовыми векторами (табл. 2.1; 2.2). Каждый вектор соответствует определённому состоянию АИН (рис. 2.8) [81;85;86].

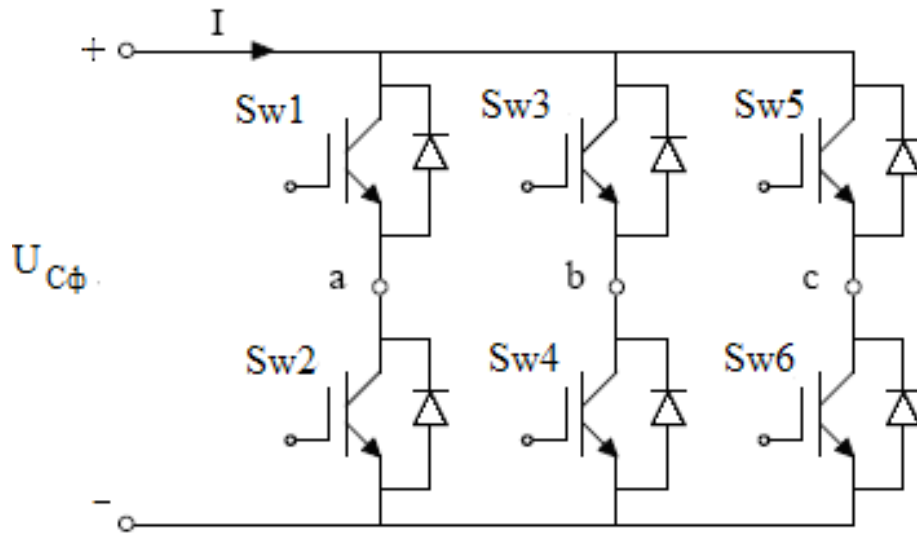


Рис. 2.7. Схема силовая принципиальная для двухуровневого АИН

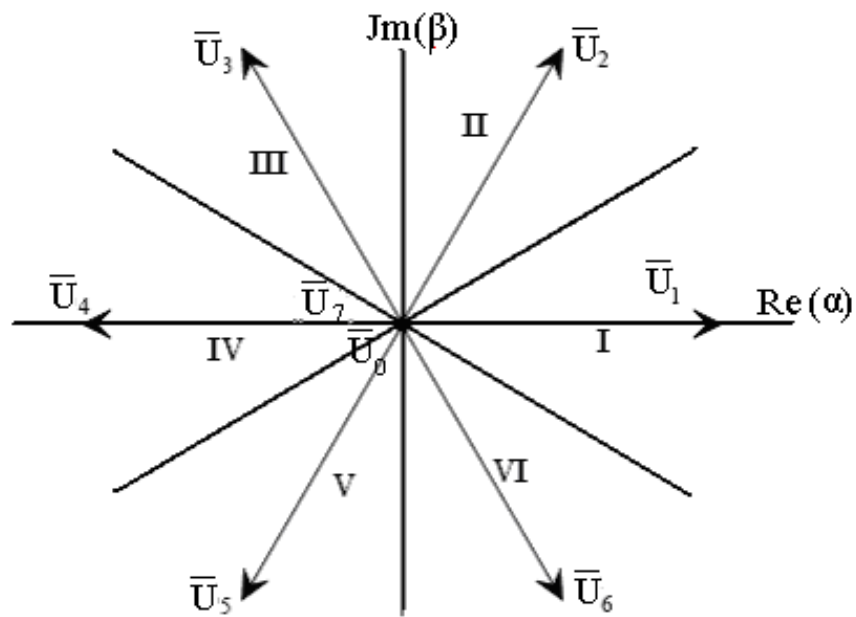


Рис. 2.8. Базовые вектора двухуровневого АИН

В таблице 2.3 [86;65] отображены логические состояния вентилях АИН и соответствующие им вектора выходных напряжений. Коммутационная функция ( $S$ ) для каждой фазы АИН имеет значение 1 или 0 в зависимости от состояния вентилях («Вкл», «Выкл»). Выходные линейные напряжения АИН определяются при этом следующим образом [65]:

$$\begin{aligned}
 u_{ab} &= U_{C\phi} [S_a(t) - S_b(t)] \\
 u_{bc} &= U_{C\phi} [S_b(t) - S_c(t)] , \\
 u_{ca} &= U_{C\phi} [S_c(t) - S_a(t)]
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

где  $U_{C\phi}$  - амплитудное значение входного напряжения АИН.

Таблица 2.3

Таблица соответствия векторов выходного напряжения  
и логических состояний вентиляей

<u>Sw1</u>	<u>Sw2</u>	<u>Sw3</u>	<u>Sw4</u>	<u>Sw5</u>	<u>Sw6</u>	$S_a(t)$	$S_b(t)$	$S_c(t)$	$\bar{U}_k(t)$
<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	0	0	0	$\bar{U}_0$
<u>ВКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	1	0	0	$\bar{U}_1$
<u>ВКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	1	1	0	$\bar{U}_2$
<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	0	1	0	$\bar{U}_3$
<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	0	1	1	$\bar{U}_4$
<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	0	0	1	$\bar{U}_5$
<u>ВКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	1	0	1	$\bar{U}_6$
<u>ВКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	<u>ВКЛ</u>	<u>ВЫКЛ</u>	1	1	1	$\bar{U}_7$

При включении фаз АД в звезду фазное напряжение АД:

$$\begin{aligned}
 u_a &= \frac{2u_{ab} + u_{bc}}{3} \\
 u_b &= \frac{u_{bc} - u_{ab}}{3} \\
 u_c &= \frac{-u_{ab} - 2u_{bc}}{3}
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

С использованием формул (2.15) и (2.16) и таблицы (2.3) для разных состояний АИН при входном напряжении  $U_{C\phi}=1$  оставлена таблица (табл. 2.4) значений выходного напряжения.

Таблица 2.4

Выходные напряжения АИН для разных состояний при  $U_{C\phi}=1$

$\bar{U}_k(t)$	$u_a$	$u_b$	$u_c$	$u_{ab}$	$u_{bc}$	$u_{ca}$
$\bar{U}_0$	0	0	0	0	0	0
$\bar{U}_1$	2/3	-1/3	-1/3	1	0	-1
$\bar{U}_2$	1/3	1/3	-2/3	0	1	-1
$\bar{U}_3$	-1/3	2/3	-1/3	-1	1	0
$\bar{U}_4$	-2/3	1/3	1/3	-1	0	1
$\bar{U}_5$	-1/3	-1/3	2/3	0	-1	1
$\bar{U}_6$	1/3	-2/3	1/3	1	-1	0
$\bar{U}_7$	0	0	0	0	0	0

Мгновенные значения напряжений фаз АТД получают путём умножения коммутационных функций (коэффициентов табл. 2.4) на текущую величину напряжения конденсатора фильтра  $U_{C\phi}$ . Именно таким образом производится моделирование АИН коммутационными функциями.

В схеме СУ ТЭП (рис. 2.3) управление ключами инвертора осуществляется по сигналам системы разрывного управления АТД в соответствии с таблицами 2.1 (при полном поле и многократной коммутации) и 2.2 (при ослаблении поля и однократной коммутации), которые реализованы в БЛА (рис. 2.3).

Модель блока логического автомата, реализующего таблицу (табл. 2.1) переключений ключей АИН можно выполнить по-разному. В представленной блок-диаграмме использованы элементы основной библиотеки MatLab/

Simulink: Look-Up Table (2-D) и Multiport Switch, это значительно удобнее применения простых логических элементов. Модель подсистемы логического автомата в случае представления инвертора коммутационными функциями приведена на рис. 2.9.

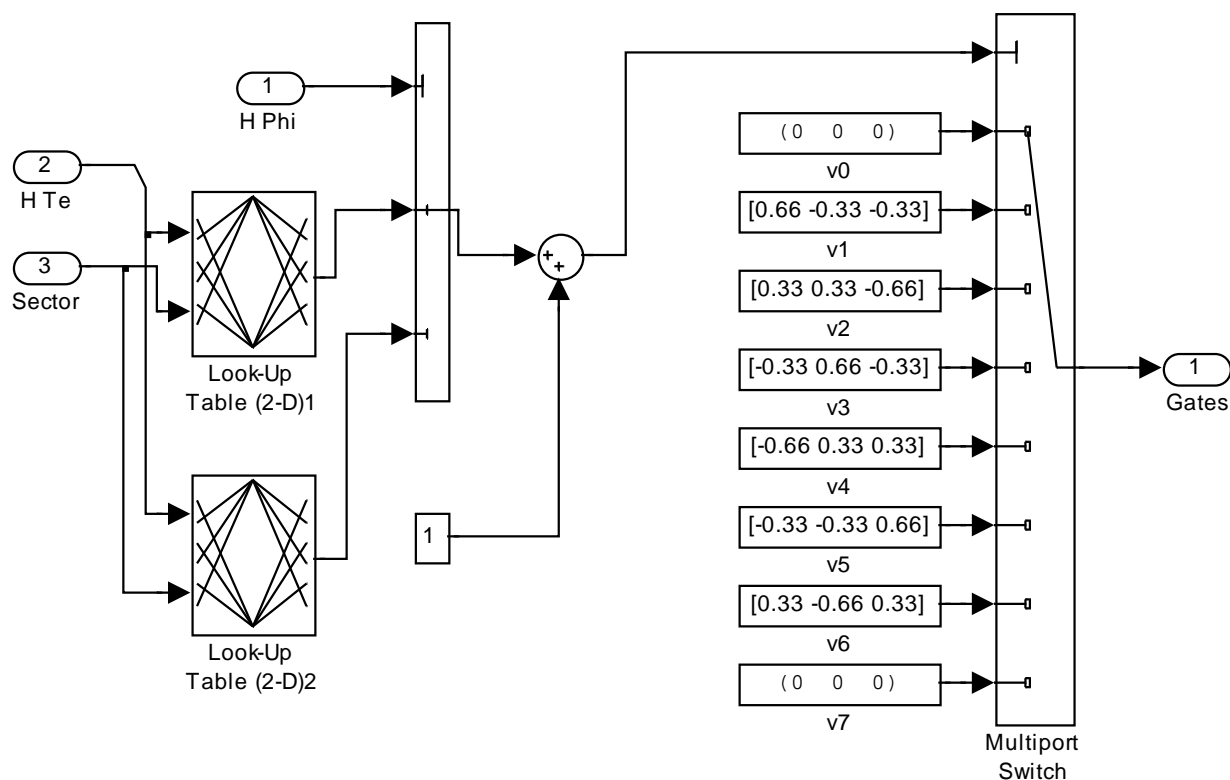


Рис. 2.9. Подсистема модели блока логического автомата, реализующего таблицу 2.1 переключений АИН при многократной коммутации на периоде

Мгновенное значение фазного напряжения вычисляется путём умножения коммутационной функции, получаемой на выходе подсистемы рис. 2.9 на напряжение промежуточного звена постоянного тока  $U_{сф}$ .

Для пояснения модели, реализующей табл. переключений 2.2 с учётом уравнений (1.5) и (2.4) необходимо рассмотреть векторную диаграмму АД, представленную на рис. 2.10, сопоставив её с системой базовых векторов (рис. 2.8). Каждый из секторов координатной плоскости на рис. 2.8 занимает угол  $60^\circ$ , и если сопоставить это с взаимным положением векторов потокосцепления и напряжения статора (рис. 2.10), то видно, что напряжение опережает потокосцепление на два сектора.

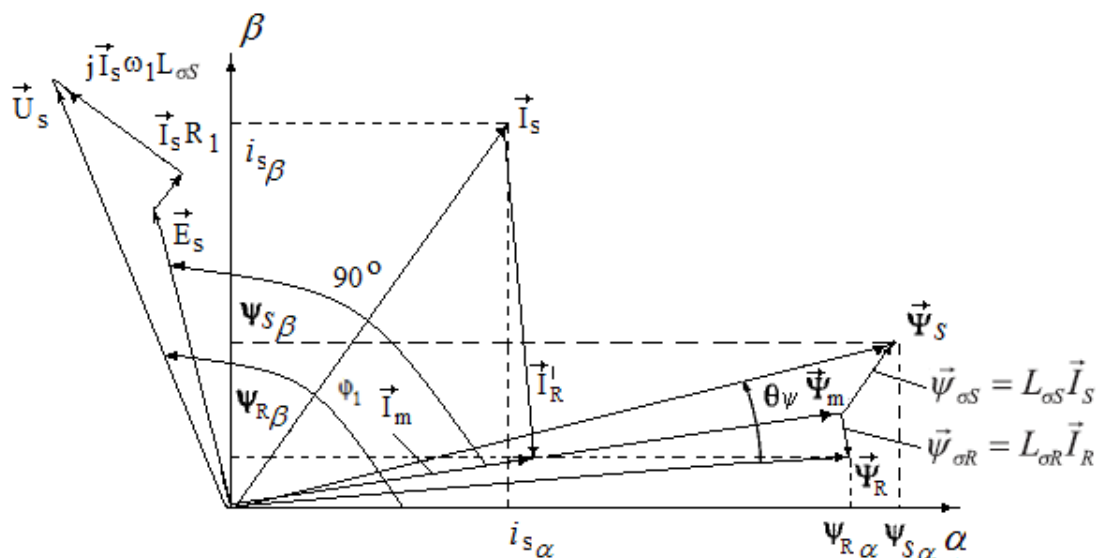


Рис. 2.10. Векторная диаграмма напряжений, потокосцеплений и токов АТД

И далее понятно, как организовать вращение магнитного поля статора при однократной коммутации АИН (табл. 2.2) в соответствии с требуемой частотой  $f_1$  (1.5), углом (1.6) и текущим сектором потокосцепления, вычисляемым СУ (рис. 1.10).

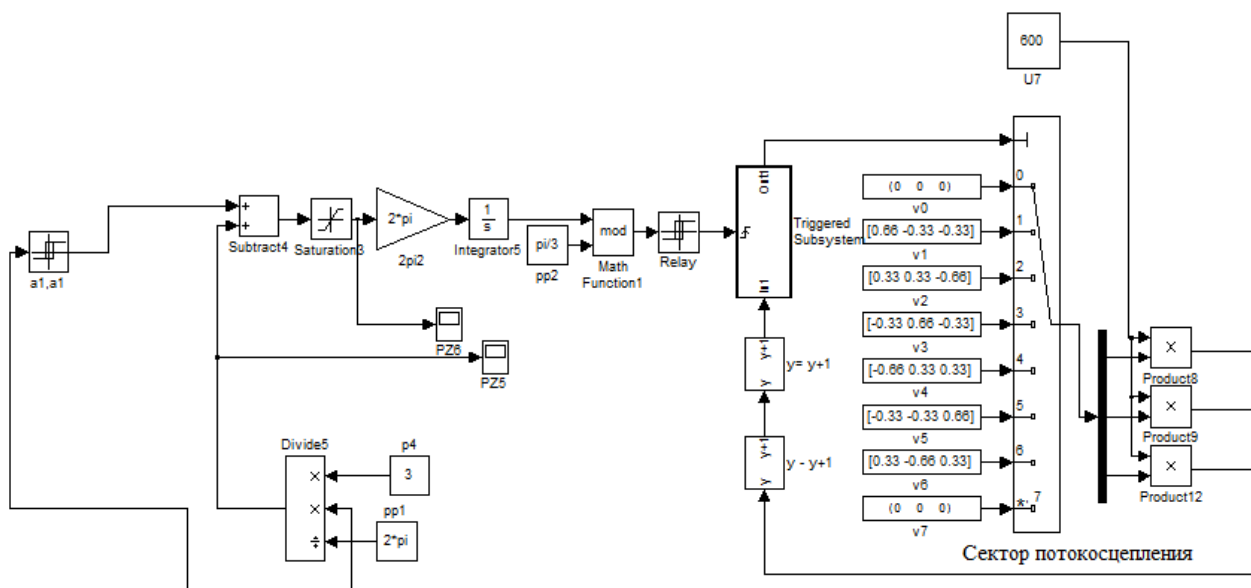


Рис. 2.11. Фрагмент модели, реализующий табл. 2.2 переключений АИН при однократной коммутации на периоде

С учётом рассчитанной фазы потокосцепления статора, определение номера сектора для вектора потокосцепления выполняется в соответствии с представленными неравенствами (фаза вектора потокосцепления определяет

ся в градусах, одновременно учитывается выполнение необходимого условия не превышения фазовым углом величины  $180^\circ$ ; блок – диаграмма представлена в приложении 2, рис. П2.1).

$$\begin{aligned}
 & \text{если } -30^\circ < \theta \leq 30^\circ \text{ то } \overrightarrow{\Psi_s} \text{ принадлежит сектору 1} \\
 & \text{если } 30^\circ < \theta \leq 90^\circ \text{ то } \overrightarrow{\Psi_s} \text{ принадлежит сектору 2} \\
 & \text{если } 90^\circ < \theta \leq 150^\circ \text{ то } \overrightarrow{\Psi_s} \text{ принадлежит сектору 3} \\
 & \text{если } \theta > 150^\circ \text{ или } \theta \leq -150^\circ \text{ то } \overrightarrow{\Psi_s} \text{ принадлежит сектору 4} \\
 & \text{если } 150^\circ < \theta \leq -90^\circ \text{ то } \overrightarrow{\Psi_s} \text{ принадлежит сектору 5} \\
 & \text{если } -90^\circ < \theta \leq -30^\circ \text{ то } \overrightarrow{\Psi_s} \text{ принадлежит сектору 6}
 \end{aligned} \tag{2.17}$$

Далее опишем математически применяемые в моделируемой системе релейные регуляторы. Для регулирования потокосцепления обычно используется двухпозиционный релейный регулятор, у которого отсутствует зона нечувствительности, но имеется гистерезисный допуск (рис. 2.12 а). В регуляторе момента применяется трёхпозиционное реле, имеющее и зону нечувствительности, и гистерезисный допуск (рис. 2.12б).

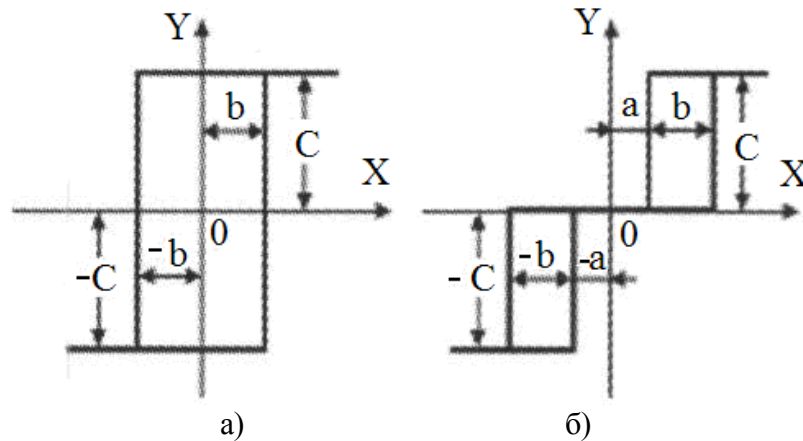


Рис. 2.12. Общий вид статической характеристики регуляторов:

а) для регулирования потокосцепления; б) для регулирования момента АД

Регулятор потокосцепления описывается следующими уравнениями [85]:

$$\left\{ \begin{array}{l} C \text{ при } X > b; \\ -C \text{ при } X \leq b; \end{array} \right\} \quad \text{при } (dX/dt) > 0;$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C \text{ при } X > -b; \\ -C \text{ при } X \leq -b; \end{array} \right\} \quad \text{при } (dX/dt) < 0$$

$$\tag{2.18}$$

Релейный регулятор электромагнитного момента (1.12б) описывается следующими уравнениями в общем случае:

$$\left. \begin{array}{l} C \text{ при } X > (a+b); \\ 0 \text{ при } -a \leq X \leq (a+b); \\ -C \text{ при } X < -a; \end{array} \right\} \text{ при } (dX/dt) > 0; \quad (2.19)$$

$$\left. \begin{array}{l} C \text{ при } X > a; \\ 0 \text{ при } -(a+b) \leq X \leq a; \\ -C \text{ при } X < -(a+b); \end{array} \right\} \text{ при } (dX/dt) < 0$$

В (2.19) величина  $a$  может равняться нулю, а может отличаться от нуля. варианты блок-диаграмм регуляторов представлены в прил. 2 (рис. П2.2, П2.3).

Для настройки релейного регулятора потокосцепления необходимо определить границы гистерезисного допуска (ширину петли). Для настройки релейного регулятора момента, кроме гистерезисного допуска нужно также знать зону нечувствительности при её наличии. Наряду с этим необходимы коэффициенты усиления датчиков цепей обратных связей. На выходе релейных регуляторов возникает сигнал в виде следующих поочередно прямоугольных импульсов, имеющих единичную амплитуду. Частота, с которой следуют импульсы, зависит преимущественно от внутренних параметров входящих в контур динамических звеньев.

Если в контуре используется двухпозиционный релейный регулятор без зоны нечувствительности (рис. 2.12 а), а регулируемый объект является апериодическим звеном первого порядка, то для контура релейного регулирования структурная схема имеет следующий вид (рис. 2.13) [65; 85].



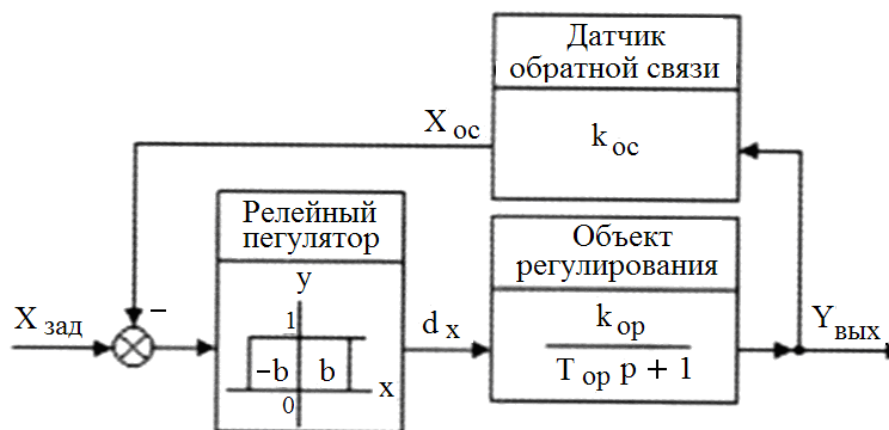


Рис. 2.13. Схема структурная контура для контура с релейным регулятором, представленным на рис. 2.12а

Для релейного регулятора частота импульсов на выходе  $f_{рег}$  может быть определена по формуле:

$$f_{рег} = \frac{k_{ор} \cdot k_{ос}}{2\pi \cdot (2b) \cdot T_{ор}}, \quad (2.20)$$

где  $k_{ор}$  - коэффициент усиления для объекта регулирования (ОР);  $T_{ор}$  - постоянная времени ОР;  $k_{ос}$  - коэффициент усиления линейного датчика в цепи обратной связи.

Определение для установившегося значения выходного параметра  $Y_{уст}$  амплитуды отклонений  $\Delta Y$  от данного значения при работе релейного регулятора вычисляется по формуле:

$$\Delta Y = \frac{2b}{k_{ос}} \cdot Y_{уст} \quad (2.21)$$

Оптимальную настройку для контура с релейным регулятором можно найти, решив совместно уравнения (2.20) и (2.21) [65;85].

Когда объект регулирования можно представить апериодическим звеном второго порядка, а релейный регулятор является двухпозиционным реле с гистерезисным допуском и зоной нечувствительности (рис.2.12б), то протекающие процессы и настройки более сложны, и структурную схему объекта

можно представить в следующем виде (рис. 2.14).

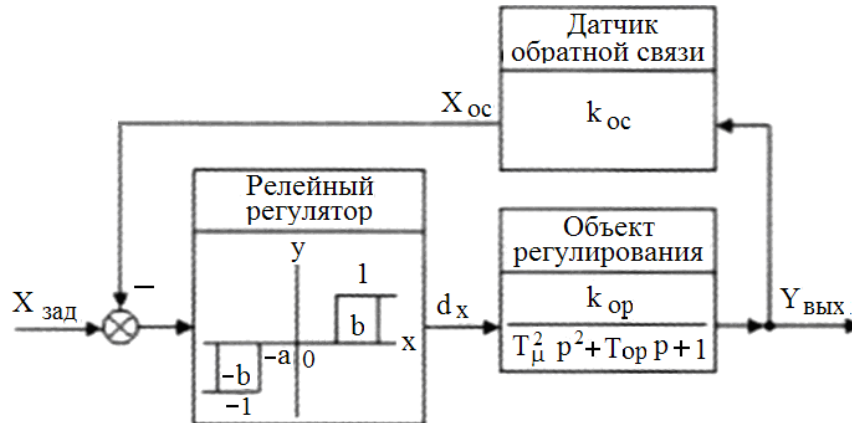


Рис. 2.14. Схема структурная контура для контура с релейным регулятором, представленным на рис. 2.12б

Для обеспечения устойчивости функционирования контура с любым релейным регулятором необходимо поддерживать автоколебательный режим работы релейного регулятора [85;112]. В противном случае происходит потеря работоспособности системы.

В функциональной схеме (рис.2.3) имеется также релейный регулятор проскальзывания колёс РСК (рис. 2.15)

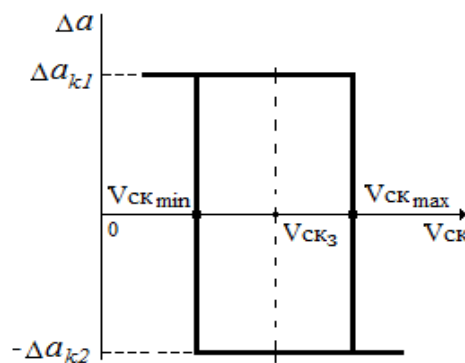


Рис. 2.15. Двухпозиционный релейный регулятор проскальзывания колёс

Функционирование РСК описывается следующими уравнениями:

$$\left. \begin{cases} -\Delta a_{k2} \text{ при } V_{СК} > V_{СК_{\max}} \\ \Delta a_{k1} \text{ при } V_{СК} \leq V_{СК_{\max}} \end{cases} \right\} \text{при } (dV_{СК}/dt) > 0. \\ \left. \begin{cases} -\Delta a_{k2} \text{ при } V_{СК} > V_{СК_{\min}} \\ \Delta a_{k1} \text{ при } V_{СК} \leq V_{СК_{\min}} \end{cases} \right\} \text{при } (dV_{СК}/dt) < 0 \quad (2.22)$$

Кроме нелинейных релейных регуляторов СУ ТЭП (рис. 2.3) имеет регулятор скорости во внешнем по отношению к моменту контуре скорости. Этот регулятор является линейным, обычно это пропорциональный (П) или пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор [85; 86; 65]. Но возможно также применение пропорционально – интегрально - дифференциального (ПИД) регулятора. В целом это замкнутый контур с обратной связью по угловой скорости АД. Для получения сигнала целесообразно использовать датчик скорости (частоты вращения) например, импульсный. Возможна и бездатчиковая система, где частота вращения ротора вычисляется по модели АД с использованием измеренных значений фазных напряжений и токов. Однако применение такой системы снижает точность и диапазон регулирования, поэтому в системах с реализацией предельного сцепления её применять не стоит, предпочтительно использовать датчик.

В ряде работ произведена приближённая аналитическая оценка параметров СУ ТЭП, необходимых для использования потенциальных условий сцепления на 90 %. Для этих целей система ТЭП представлена как источник момента апериодическим звеном (обобщённым преобразователем) с постоянной времени  $T_{эмт}$  [36;72;65]

$$W_M(s) = \frac{I}{T_{эмт} s + 1} \quad (2.23)$$

И с использованием такого представления получены формулы для приближённой оценки коэффициента усиления пропорционального регулятора скорости (частоты вращения) АД и максимально допустимой постоянной времени обобщённого преобразователя (источника момента) (2.23). Согласно выведенным соотношениям коэффициент усиления для регулятора  $k_{pc}$  должен быть больше следующей величины [36]

$$k_{pc} > 5,4 \psi_0 N_o \frac{R_k^2}{\mu k_{эмт} k_{oc}}, \quad (2.24)$$

Одновременно постоянная времени источника момента не должна превышать вычисляемого с учётом параметров ТЭП значения

$$T_{\text{эмп}} < 0,09 \frac{J_{\Sigma}}{\psi_{0\text{max}} R_k^2 N_o}, \quad (2.25)$$

где  $\psi_{0\text{max}} = 0,4$  – принятый условно за максимальный коэффициент сцепления;  $N_o$  – вертикальная нагрузка оси;  $\mu$  – передаточное число для редуктора;  $R_k$  – радиус колёс оси;  $k_{\text{эмп}}$  – коэффициент усиления обобщённого преобразователя, получаемый путём деления максимального момента АТД на задание момента;  $k_{oc}$  – коэффициент обратной связи для контура скорости;  $J_{\Sigma}$  – приведенный к оси колес общий момент инерции привода [65]

$$J_{\Sigma} = J_{\text{бш}} + J_k + (J_{\text{ми}} + J_p) \times \mu^2, \quad (2.26)$$

где  $J_{\text{бш}}$ ,  $J_k$ ,  $J_{\text{ми}}$ ,  $J_p$  – моменты инерции большой шестерни, колесной пары, малой шестерни, ротора соответственно.

Минимальное значение коэффициента усиления пропорционального регулятора скорости АТД для магистральных тепловозов 2ТЭ25А и маневровых тепловозов ТЭМ21, ТЭМ9Н находится в диапазоне 110 – 180 (приблизительно, как и у электровозов). В то же время постоянная времени обобщённого преобразователя тепловозов должна быть меньше, чем у электровозов, - в диапазоне 0,0025 – 0,003 с из-за меньшего момента инерции ТЭП для тепловозов [65]. Тогда как у электровозов она составляет (0,004 – 0,005 с) [36;72]. Система разрывного управления обеспечивает наибольшее быстрое действие, что обуславливает целесообразность её применения в тяговом электроприводе.

Так как во внутреннем контуре ТЭП с ДТС используется гистерезисный релейный регулятор, то можно настраивать линейный регулятор частоты вращения АД по приближённым формулам, в частности, для пропорционально-интегрального регулятора [65;85]:

$$k_{pc} \approx \frac{J_{\Sigma} \cdot k_{ом} \cdot f_{pm}}{4k_{oc} \cdot \psi_{sm}}; \quad (2.27)$$

$$T_{pc} \approx \frac{32k_{oc}\psi_{sm}}{J_{\Sigma}k_{ом}f_{pm}^2},$$

где  $T_{pc}$  - постоянная времени ПИ-регулятора;  $k_{pc}$  - коэффициент усиления ПИ-регулятора;  $\psi_{sm}$  - амплитуда номинального потокосцепления статора АД;  $f_{pm}$  - частота автоколебаний регулятора момента;  $k_{ом}$  - коэффициент обратной связи по моменту АД.

Для обеспечения требуемого качества переходных процессов, а также достижения допустимого значения статической ошибки по скорости при использовании пропорционального регулятора скорости настройки данного регулятора могут варьироваться в системах разрывного управления в весьма широких пределах. Однако в целом быстроедействие СУ определяющим образом зависит от частоты автоколебаний релейного гистерезисного регулятора контура момента АД.

На основе вышеизложенного составлена модель электрической подсистемы привода тепловоза ТЭМ9Н средствами основной библиотеки MatLab/Simulink, выполнены пробные расчёты. На рис. 2.15 в качестве примера представлены результаты моделирования динамических процессов при переходе с многократной коммутации на однократную коммутацию вентилях АИН на периоде выходного напряжения. Моделирование выполнено для ТЭП тележки (рис. 2.3), причём модель, составленная для электрической части совмещена с упрощённой моделью для механической подсистемы привода, математическое описание которой приведено в следующем разделе (разделе 3).

При переходе во второй зоне на однократную коммутацию, мы продолжаем, переключая вентили инвертора, вращать вектор напряжения (а значит, и потокосцепления) статора (вектора показаны на диаграмме рис. 2.10), с

требуемой частотой, которая определяется по частоте вращения ротора ( $f_{вр}$ ) и абсолютному скольжению  $f_2$  по формуле (1.5).

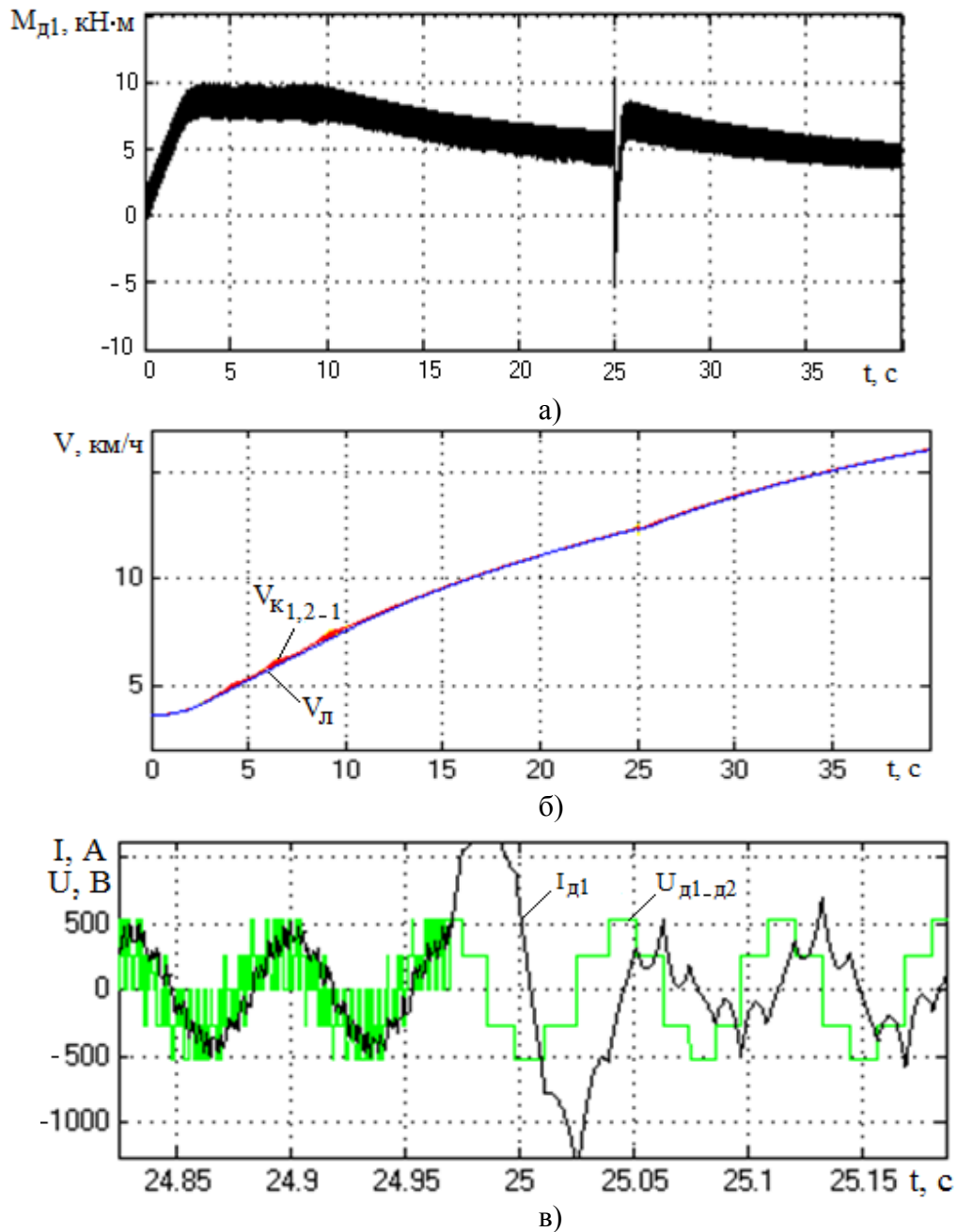


Рис. 2.15. Результаты моделирования динамических процессов при переходе с многократной на однократную коммутацию вентилей АИН: а - вращающий момент АТД1 ( $M_{д1}$ ); б) - скорость локомотива ( $V_{л}$ ) и колес первой оси ( $V_{к1,2-1}$ ); в) напряжение на двигателях первой тележки ( $U_{д1-д2}$ ) и фазный ток АТД1 ( $I_{д1}$ ) (увеличено)

Из графиков видно, что качественно картина ожидаема, происходит переход на однократную коммутацию АИН, сопровождаемый переходным процессом, который быстро затухает, локомотив продолжает разгоняться.

Количественная оценка достоверности результатов моделирования производилась путем сравнения расчетных осциллограмм (рис. 2.16) с экспериментальными данными, полученными при испытаниях тепловоза ТЭМ9Н (рис. 2.17).

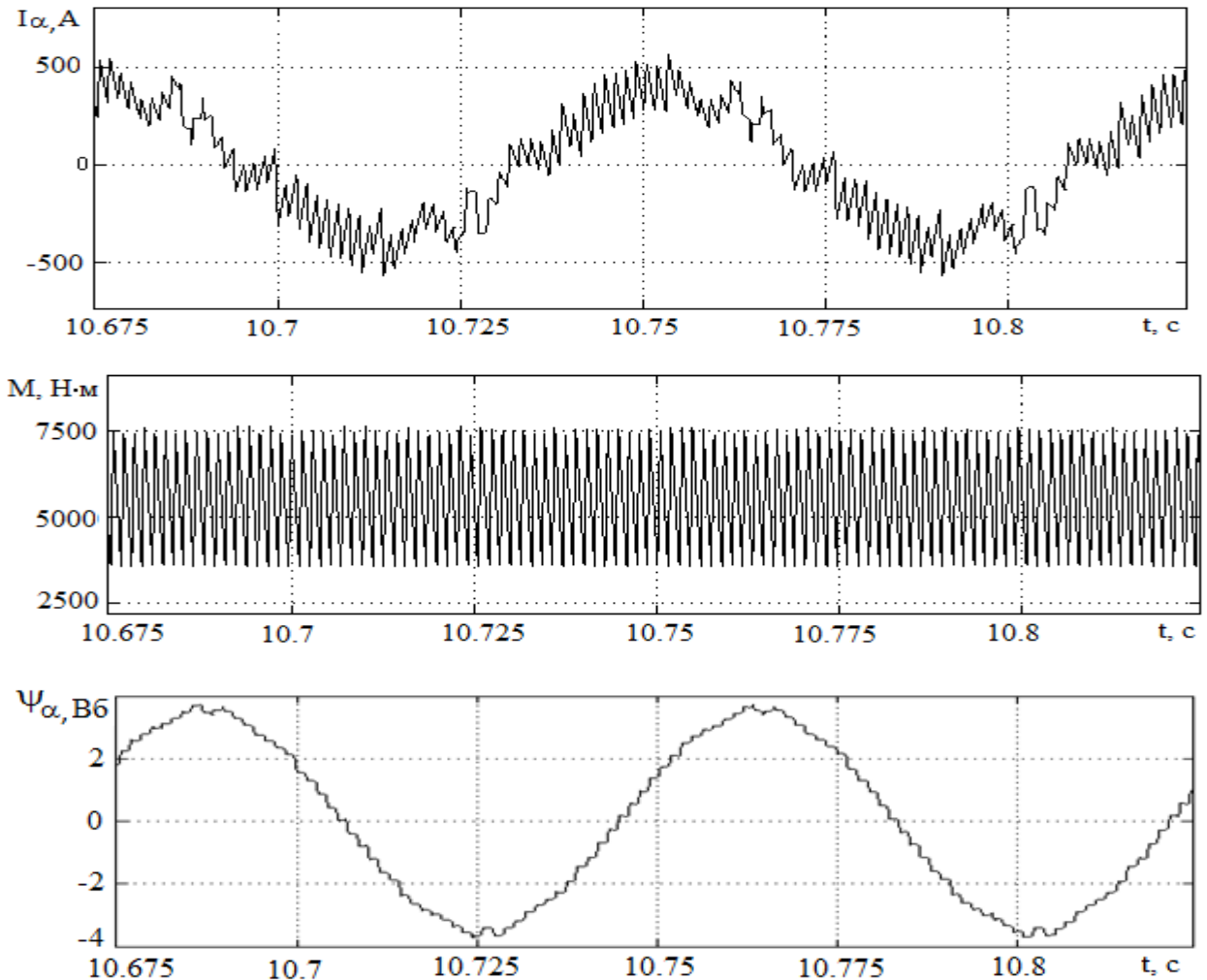


Рис. 2.16. Результаты моделирования ТЭП ТЭМ9Н:  $I_{\alpha}$  - ток статора по оси  $\alpha$ ;  $M$  - электромагнитный момент;  $\Psi_{\alpha}$  - потокосцепление статора по оси  $\alpha$

В модель были подставлены параметры асинхронного двигателя АД917УХЛ1, установленного на ТЭМ9Н, моделирование производилось при тех же значениях напряжения в промежуточном контуре, скорости локомотива и задания на момент, что и в эксперименте (рис. 2.17). Ширина релейного коридора для электромагнитного момента АД была подобрана такой же, как на экспериментальных осциллограммах, чтобы обеспечить примерно одинаковую частоту коммутаций в эксперименте и расчете.

напряжение dc-link	1030	в	частота вращения ротора	257,1	об/мин
поток	3,7	Вб	скольжение	0,261	Гц
скорость локомотива	11,5	км/ч	момент двигателя	5365	Нм
ток по первой гармонике	424	А	мощность активная	160,7	кВт
напряжение по первой гармонике	313,1	В	действующее значение тока	311,6	А
частота поля статора	13,12	Гц	пиковое значение тока	610	А

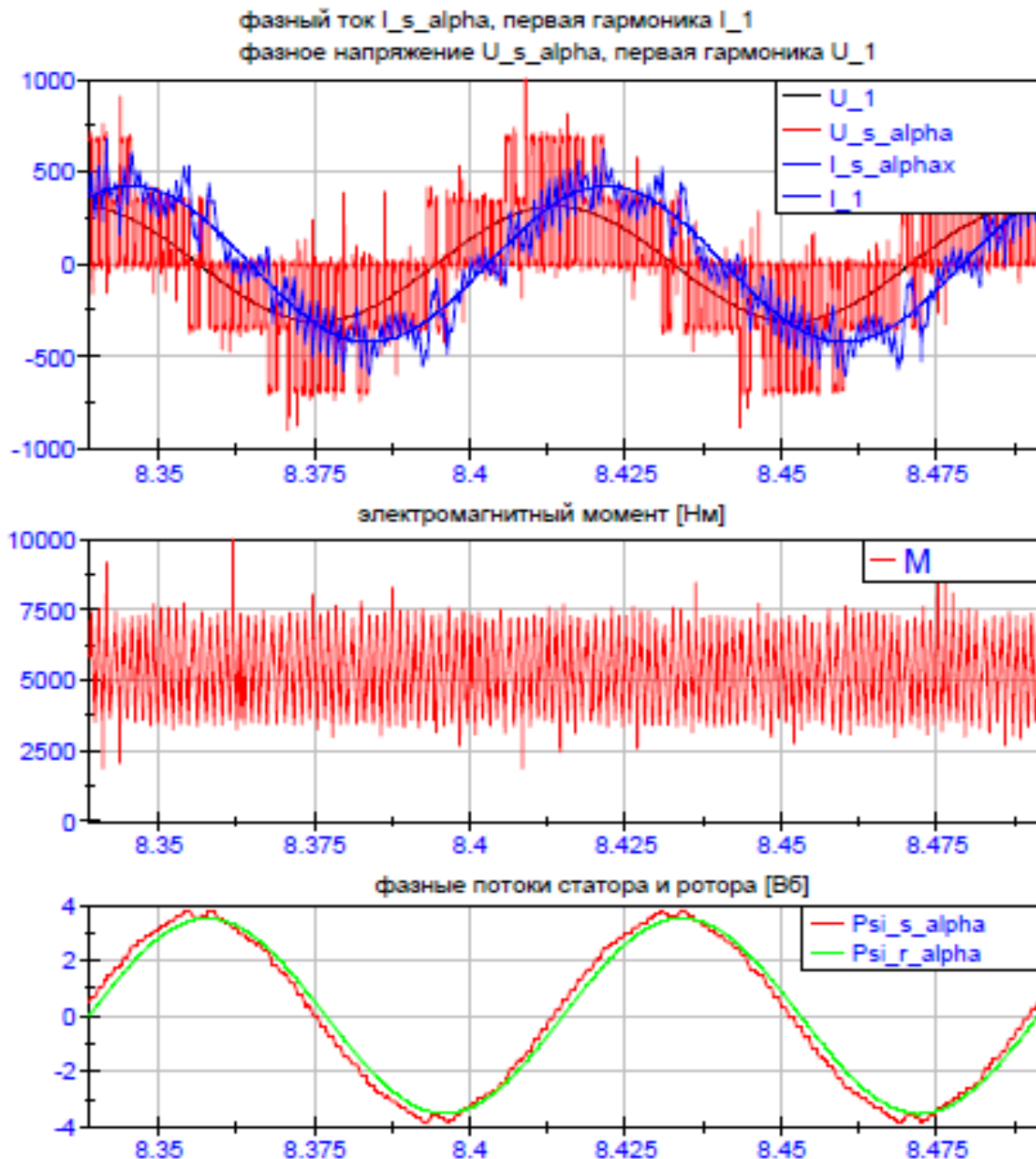


Рис. 2.17. Осциллограммы натурных испытаний ТЭП ТЭМ9Н

Для сокращения времени расчета динамики ТЭП при дальнейшем соединении электрической подсистемы MatLab/Simulink с детализированной моделью механической части (МЧ) тепловоза, выполненной в ПК «Универ-



сальный механизм» (УМ) [113;114], моделирование работы статического преобразователя было выполнено с использованием коммутационных функций (табл. 2.4; рис. 2.9). Результаты моделирования (рис. 2.16) показывают удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных (расхождение не превышает 7 %, если отбросить мгновенные пиковые значения тока и момента), что подтверждает достоверность расчетов и возможность использования модели для анализа динамических процессов ТЭП ТЭМ9Н при реализации предельных усилий.

### **2.3. Выводы по разделу 2**

1. Предложен способ управления ТЭП с реализацией предельных усилий АТД, подключенными параллельно к одному АИН.

2. Разработана функциональная схема и алгоритмы работы СУ ТЭП гибридного маневрового тепловоза с совместным регулированием АД на пределе сцепления.

3. Разработаны математические и компьютерные модели электрической подсистемы ТЭП с совместным разрывным регулированием АТД в режиме реализации предельных усилий.

4. Результаты сравнения расчётных осциллограмм с экспериментальными данными подтверждают достоверность результатов моделирования, расхождение не превышает 7 %.

### **РАЗДЕЛ 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ТЭП ГИБРИДНОГО ТЕПЛОВОЗА**

При регулировании двигателей тележки на пределе сцепления управление, как изложено в разделе 2, ведётся в каждом режиме по усреднённой модели АТД и частоте вращения ротора одного из двигателей.

В то же время, скорости роторов параллельно включенных АТД тележки могут отличаться по многим причинам: неодинаковые параметры двигателей, разность диаметров бандажей колесных пар, различие вертикальных нагрузок колес первой и второй осей, различие условий сцепления колес первой и второй осей, колебания в механической передаче, вызываемые многочисленными внешними факторами (неровности пути, рельсовые стыки, колебания подрессоренных частей тележки и др.). Достаточно полно учесть процессы в механической части ТЭП при регулировании на пределе по сцеплению позволяет модель тепловоза ТЭМ9Н с высокой степенью детализации [100-102; 115], однако предварительно удобнее рассмотреть наиболее существенные явления на упрощенной модели [116].

#### **3.1. Упрощённое моделирование механической подсистемы ТЭП**

На маневровых и грузовых локомотивах применяется преимущественно опорно-осевое подвешивание АТД [57], в частности, такое подвешивание применено на отечественных маневровых тепловозах ТЭМ21, на магистральных грузовых тепловозах 2ТЭ25А, причём, это подвешивание обычно используется и исследовалось в работах [13;45;65] с жестким зубчатым колесом редуктора.

На гибридном маневрово-вывозном ТЭМ9Н применяется опорно-осевое подвешивание с упругим зубчатым колесом редуктора. Эту конструктивную особенность следует учесть при моделировании, так как считается, что упругое колесо, несколько демпфируя колебания момента, вызванные работой

АИН, а также возмущения от неровности пути может сыграть положительную роль и снизить вероятность резонансных явлений в ТЭП, вызывающих повышение нагрузок. Но в то же время в системе «ротор - колесная пара» применение в редукторе ТЭП упругого колеса уменьшает эквивалентную крутильную жёсткость, что повышает вероятность развития фрикционных автоколебаний. Это можно проверить при моделировании, учтя упругое колесо в расчётной схеме МЧ [117].

Расчетная схема МЧ оси тепловоза ТЭМ9Н, учитывающая крутильные колебания ТЭП, возникающие в различных режимах, в том числе и нестационарных, представлена на рис. 3.1 [116].

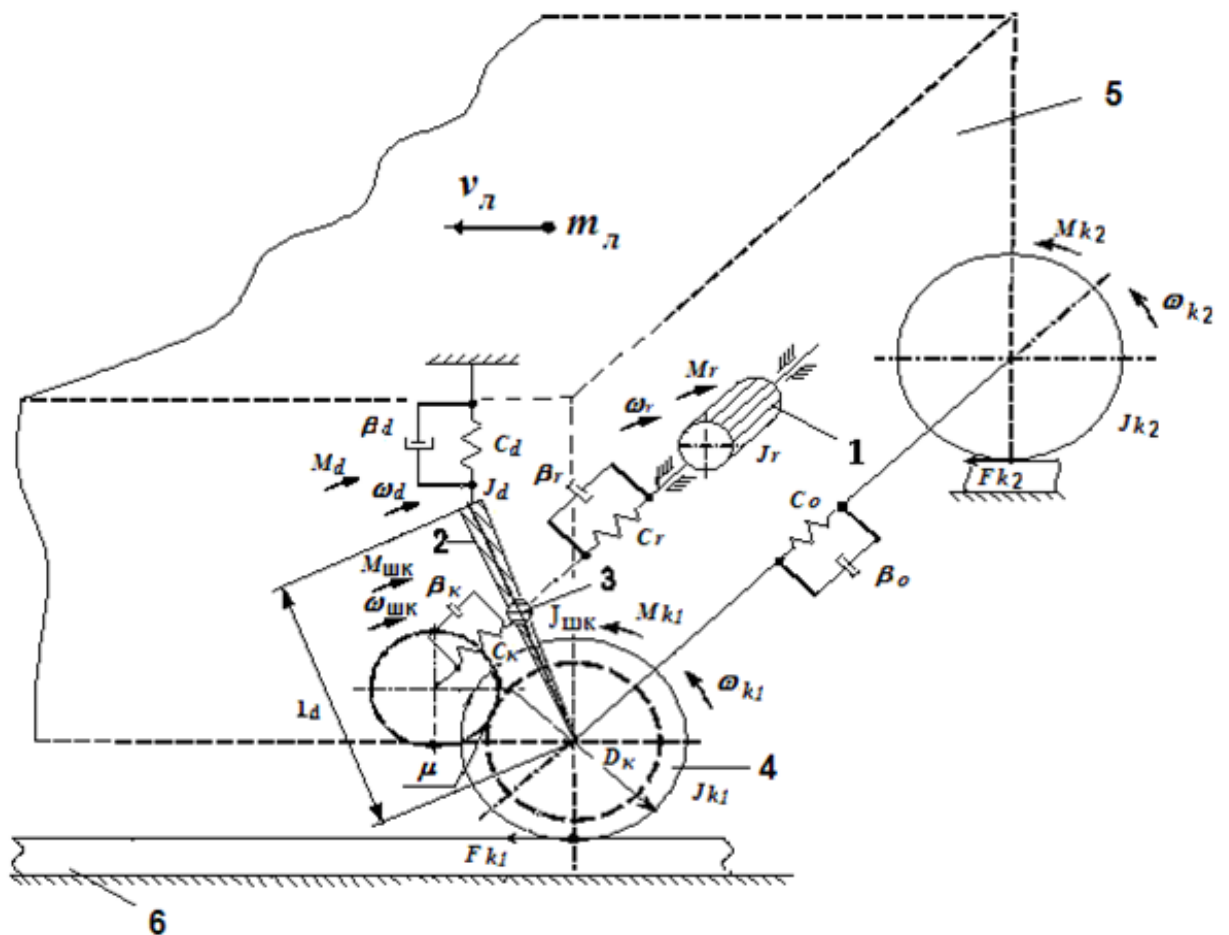


Рис. 3.1. Расчетная схема механической подсистемы ТЭП оси тепловоза ТЭМ9Н:  
 1 – ротор двигателя; 2 – корпус двигателя; 3 – шестерня и венец зубчатого колеса редуктора; 4 – колесная пара; 5 – локомотив и поезд; 6 – рельсовый путь

В схему включен один колесно-моторный блок тележки, содержащий ротор с моментом инерции  $J_r$  относительно собственной оси, корпус АД с моментом инерции  $J_d$  относительно оси колесной пары; суммарную массу шестерни и венца упругого зубчатого колеса с общим моментом инерции  $J_{шк}$  относительно оси шестерни; колесную пару с моментами инерции колес  $J_{k1}$  и  $J_{k2}$  относительно собственной оси и локомотив (и поезд) массой  $m_d$ , приходящейся на одну ось. Упруго-диссипативные свойства вала ротора, подвески остова двигателя и оси колесной пары учитываются введением соответствующих жесткостей и коэффициентов демпфирования:  $C_p, C_k, C_o, C_d$  – угловые жесткости вала ротора, упругих элементов зубчатого колеса редуктора, оси колесной пары и жесткость подвески двигателя соответственно;  $\beta_d, \beta_k$  – коэффициенты эквивалентного вязкого трения подвески двигателя и упругих элементов зубчатого колеса,  $\beta_r, \beta_o$  – коэффициенты демпфирования вала ротора и оси колесной пары соответственно [116].

Расчетная кинематическая схема тягового привода оси локомотива (рис. 3.1) составлена при следующих основных допущениях: учитывались только угловые колебания системы ротор – остов АД в продольной вертикальной плоскости по отношению к оси пути; колебания подрессоренных частей экипажа и тележки, а также рельсового основания не учитывались; возмущающие воздействия со стороны пути не учитывались; динамические процессы в приводе рассматривались без учета зазора в зубчатом зацеплении тягового редуктора; в системе учитывалось вязкое трение. Кроме того, считалось, что силы и моменты, действующие в расчетной схеме, приложены в месте сосредоточенных масс; упругие звенья невесомы и обладают податливостью, характеризуемой неизменным коэффициентом жесткости; деформации подчиняются закону Гука [13;65]. Параметры элементов моделей механической части ТЭП приведены в приложении 3.

Система уравнений механической части ТЭП оси, соответствующая расчётной схеме (рис. 3.1), составлена на основе принципа Даламбера с учетом

эффекта планетарного механизма тяговой передачи [103;116].

$$\left\{ \begin{array}{l}
 J_r \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_r - \beta_r [\omega_r - (\mu + 1)\omega_d - \mu\omega_{k1}]; \\
 J_d \frac{d\omega_d}{dt} = M_r(\mu + 1) + \beta_r(\mu + 1) [\omega_r - (\mu + 1)\omega_d - \mu\omega_{k1}] - M_d - \beta_d l_d^2 \omega_d - M; \\
 J_{шк} \frac{d\omega_{шк}}{dt} = M_r + \beta_r [\omega_r - (\mu + 1)\omega_d - \omega_{шк}] - M_{шк} - \beta_{\kappa} (\omega_{шк} - \mu\omega_{k1}); \\
 J_{k1} \frac{d\omega_{k1}}{dt} = M_{шк} \mu + \beta_{\kappa} \cdot \mu [\omega_{шк} - \mu\omega_{k1}] - M_{ok} - \beta_{ok} (\omega_{k1} - \omega_{k2}) - M_{k1}; \\
 J_{k2} \frac{d\omega_{k2}}{dt} = M_o + \beta_o (\omega_{k1} - \omega_{k2}) - M_{k2}; \\
 m_{л} \frac{dv_{л}}{dt} = F_{k1} + F_{k2} - F_c; \\
 \frac{dM_r}{dt} = C_r [\omega_r - (\mu + 1)\omega_d - \mu\omega_{шк}]; \\
 \frac{dM_d}{dt} = C_d l_d^2 \omega_d; \\
 \frac{dM_{шк}}{dt} = C_{\kappa} (\omega_{шк} - \mu\omega_{k1}); \\
 \frac{dM_o}{dt} = C_o (\omega_{k1} - \omega_{k2}); \\
 F_{k1} = N_{k1} \psi_0 k_1; \\
 F_{k2} = N_{k2} \psi_0 k_2; \\
 M_{k1} = F_{k1} \frac{D_{k1}}{2}; \\
 M_{k2} = F_{k2} \frac{D_{k2}}{2},
 \end{array} \right. \quad (3.1)$$

где  $M$  – электромагнитный момент АТД;  $M_r, M_{шк}, M_d, M_o$  – моменты упругих сил на валу ротора, в упругих элементах зубчатого колеса, в подвеске корпуса и на оси колесной пары соответственно;  $\mu$  - передаточное число редуктора;  $\omega_r, \omega_{шк}, \omega_{k1}, \omega_{k2}$  – угловые скорости ротора, шестерни редуктора совместно с приведенной к ней массой венца зубчатого колеса, первого и второго колес относительно собственных осей соответственно;  $\omega_d$  - угловая скорость корпуса относительно оси колесной пары;  $v_{л}$  – линейная скорость локомотива (и

поезда);  $l_d$  – база подвески двигателя;  $D_k$  – диаметр колеса;  $F_c$  – сила сопротивления движению поезда;  $N_{k1}, N_{k2}$  – силы вертикального нажатия колес на рельсы;  $M_{k1}, M_{k2}$  – тяговые моменты первого и второго колес соответственно;  $\psi_0$  – потенциальный коэффициент сцепления;  $k_1, k_2$  – коэффициенты сцепления первого и второго колес с рельсом в относительных единицах (рис. 1.1) [116].

Упругие и диссипативные моменты:

$$M_r = C_r \cdot \varphi_{\delta l} = C_r [\varphi_r - (\mu + 1) \varphi_d - \varphi_{шк}]; \quad (3.2)$$

$$M_{r\beta} = \beta_r \cdot d\varphi_{\delta l} / dt = \beta_r [\omega_r - (\mu + 1) \omega_d - \omega_{шк}], \quad (3.3)$$

где  $\varphi_{\delta l} = \varphi_r - (\mu + 1) \varphi_d - \varphi_{шк}$  – угол скручивания вала АД;  $\varphi_{шк}$  – угловое перемещение шестерни.

Путём дифференцирования (3.2) находим выражение (3.1).

Моменты упругих ( $M_{шк}$ ) и вязких ( $M_{шк\beta}$ ) взаимодействий

$$M_{шк} = C_k (\varphi_{шк} - \mu \cdot \varphi_{к1}); \quad (3.4)$$

$$M_{шк\beta} = \beta_k (\omega_{шк} - \mu \cdot \omega_{к1}) \quad (3.5)$$

Нелинейная характеристика упругих элементов колеса представлена ниже (рис. 3.2)

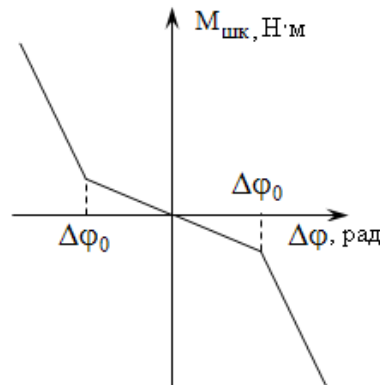


Рис. 3.2. Нелинейная характеристика упругих элементов

Для корпуса АД момент инерции вычисляется по приближённой формуле

$$J_d \approx 0,5m_d \cdot R_d^2 + m_d \cdot n^2 = m_d(0,5R_d + n^2), \text{ где}$$

где  $m_d$  – масса корпуса;  $R_d$  – радиус корпуса АД;  $n$  – межцентровое расстояние.

Параметры подвешивания корпуса ( $C_d, \beta_d$ ) справедливы лишь при незначительных линейных перемещениях, и при составлении математической модели МЧ получены соотношения между линейными ( $L$ ) и угловыми деформациями подвески АД (рис. 3.2).

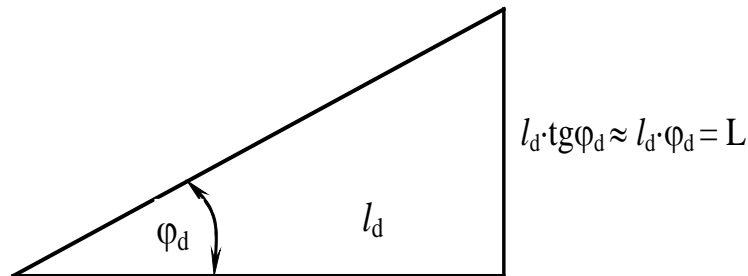


Рис. 3.2. Пояснение соотношений деформаций подвески

В этом получают случае следующие уравнения сил упругости и диссипации подвески

$$F_{dc} = C_d \cdot L = C_d \cdot l_d \cdot \varphi_d;$$

$$F_{d\beta} = \beta_d \frac{dL}{dt} = \beta_d \cdot l_d \frac{d\varphi_d}{dt}$$

Выражения моментов от данных упругих ( $M_d$ ) и диссипативных ( $M_{d\beta}$ ) сил:

$$M_d = C_d \cdot l_d \cdot \varphi_d \cdot l_d = C_d \cdot l_d^2 \cdot \varphi_d; \quad (3.6)$$

$$M_{d\beta} = \beta_d \cdot l_d \frac{d\varphi_d}{dt} \cdot l_d = \beta_d \cdot l_d^2 \frac{d\varphi_d}{dt} = \beta_d \cdot l_d^2 \cdot \omega_d \quad (3.7)$$

Выражения для диссипативного и упругого моментов подвески корпуса подставляются в общую математическую модель МЧ (3.1). Чтобы вывести соотношение для упругого момента подвески АД в дифференциальной форме, используемой для моментов упругих сил в (3.1), необходимо продифференцировать формулу упругого момента подвешивания.

Относительно корпуса, с учётом его линейных перемещений и угловых перемещений упругого колеса редуктора, ротор движется со следующей угловой скоростью [65].

$$\omega_{r-d} = 2\omega_r - (\mu + 1)\omega_d - \omega_{шк}. \quad (3.8)$$

Получается, что ротор перемещается относительно корпуса двигателя не только за счёт того, что он вращается вокруг собственной оси, но дополнительно учитываются перемещения корпуса АД, который колеблется на собственном подвешивании. Поэтому скорость  $\omega_{r-d}$  определяет скольжение асинхронного двигателя, от которого зависит его электромагнитный момент, и включается в модель двигателя, обуславливая электромеханическую связь в исследуемой электрической машине.

С учётом упругости и диссипации оси вычисляется скорость  $\omega_{k2}$  второго колеса. Несмотря на то, что ось колёсной пары обладает весьма высокой жёсткостью, учет ее упругости необходим, чтобы не потерять одну из основных форм колебаний при срыве сцепления [45; 59; 65].

Силы тяги колёс определяются из одиннадцатого и двенадцатого уравнений системы (3.1) с учётом реализации силы сцепления, описанного в разделе 1 (рис. 1.1), формулы (1.1)-(1.3).

При реализации сил торможения и тяги, как уже отмечалось, возникает крип, - проскальзывание колёс. При упрощённом моделировании применен расчет сил крипа в соответствии с методикой Меншутина [55] с учетом работ [2;6;65]. Кривая сцепления локомотива (рис. 3.3) аппроксимирована тремя участками [65]:



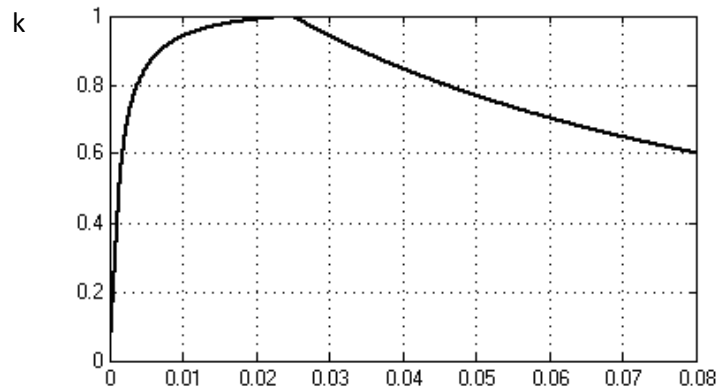


Рис. 3.3. Характеристика сцепления  $|\xi|$

1)  $0 \leq |\xi| \leq 0,0014$  – участок упругого пропорционального проскальзывания [65]:

$$k = 359,61178 \cdot |\xi|; \quad (3.9)$$

2)  $0,0014 < |\xi| \leq 0,025$  – участок упругого проскальзывания [65]:

$$k = \frac{350 \cdot |\xi| - 0,155}{0,195 + 336 \cdot |\xi|}; \quad (3.10)$$

3)  $|\xi| > 0,025$  – участок избыточного скольжения (буксования или юза)

$$k = \frac{1}{1 - \chi \cdot V_L (0,025 - |\xi|)}, \quad (3.11)$$

где  $v_L$  – скорость локомотива, м/с;  $\chi$  - жесткость третьего (падающего) участка характеристики сцепления, с/м,  $\xi$  - крип (скорость скольжения колеса в относительных единицах, обозначаемая также  $v_{ск}$ ). В зависимости от скорости локомотива  $v_L$  жесткость  $\chi$  принимает следующие значения (табл. 3.1) [65]:

Таблица 3.1

Жесткость падающего участка характеристики сцепления

$v_L$ , км/ч	0-5	5-20	20-40	40-120
$\chi$	0,9	0,6	0,5	0,35

Коэффициент сцепления  $i$ -го колеса подставляется в уравнения системы (3.1) для вычисления сил тяги и тяговых моментов колес  $F_{ki}$  и  $M_{ki}$  соответственно.

На основе опытных данных и литературных источников известно, что потенциальный коэффициент  $\psi_0$  зависит от скорости движения [65;59;118;119] (табл. 3.2), это учитывается при моделировании.

Таблица 3.2.

Изменение  $\psi_0$  от скорости движения

$v_l$ , км/ч	0...5	10	20	40	60	80	100	120	Источник данных
$\psi_0$	0,445	-	0,341	0,308	-	0,286	-	0,21	[118]
$\psi_0$	0,35...0,4	0,3...0,35	0,3	0,29	0,27	0,25	0,23	0,21	[59]
$\psi_0$	0,33...0,36	0,31	0,29	0,27	0,25	0,24	0,23	0,21	[119]

Чтобы создать модель двухосной тележки используются две системы (3.1) для двух осей, для модели ТЭМ9Н - 4 системы (3.1) для четырёх осей, при этом силы тяги всех колёс складываются.

### 3.2. Моделирование механической части гибридного тепловоза ТЭМ9Н с высокой степенью детализации

Чтобы более полно учесть параметры МЧ, в частности, изменение вертикальных нагрузок в тормозных и тяговых режимах локомотива, собственные формы колебаний, моделирование МЧ следует выполнить с высокой степенью детализации в разрабатываемых для этих целей ПК [113;115;120]. Моделирование механической подсистемы локомотива ТЭМ9Н выполнено в ПК УМ [100;101;121]. В этом комплексе с успехом применены методов моделирования динамики систем тел, уравнения синтезируются в символьном виде автоматически после разработки модели. В УМ имеется модуль УМ Лосо для создания моделей рельсовых экипажей

При моделировании МЧ локомотива в УМ экипаж необходимо представить в виде пространственной механической системы, состоящей из абсолютно твердых тел, соединенных шарнирами и силовыми элементами различных типов. Данными, описывающими моделируемый объект, являются: инерционные параметры тел, шарниры, силовые элементы и графические образы. Далее по введенным данным автоматически синтезируются системы уравнений, вывод которых вручную традиционными методами практически невозможен [65;114].

Модель тепловоза ТЭМ9Н (рис. 3.4а), разработанная совместно с сотрудниками лаборатории Вычислительной механики БГТУ [100], имеет 66 степеней свободы. Модель построена по методу подсистем. У кузова 6 степеней свободы, он представлен в виде твёрдого тела. Подсистема каждой тележки включает 30 степеней свободы (рис.3.5;3.6). К модели тепловоза для имитации состава с целью правильного отображения перераспределения вертикальных нагрузок осей, которое весьма важно при моделировании срыва сцепления, присоединены модели вагонов (рис. 3.4б).

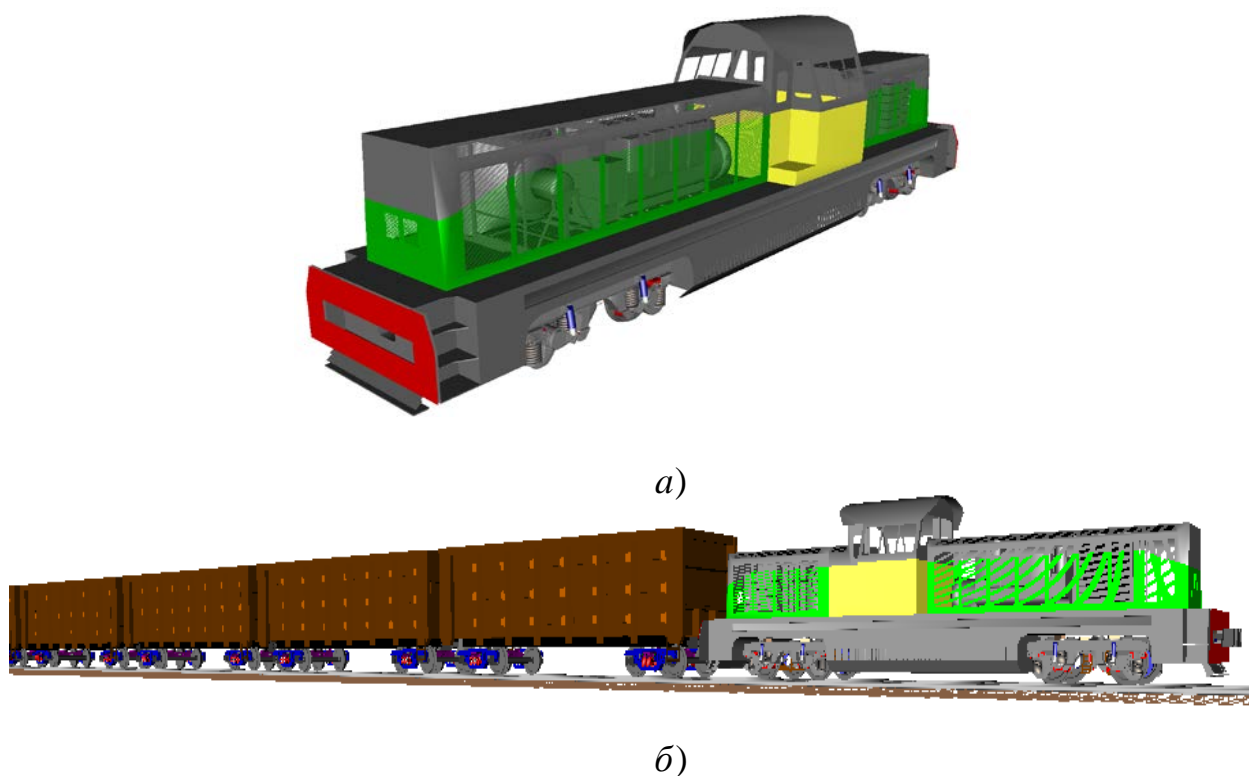


Рис. 3.4. Модель ТЭМ9Н в ПК УМ: а) тепловоз; б) тепловоз с составом

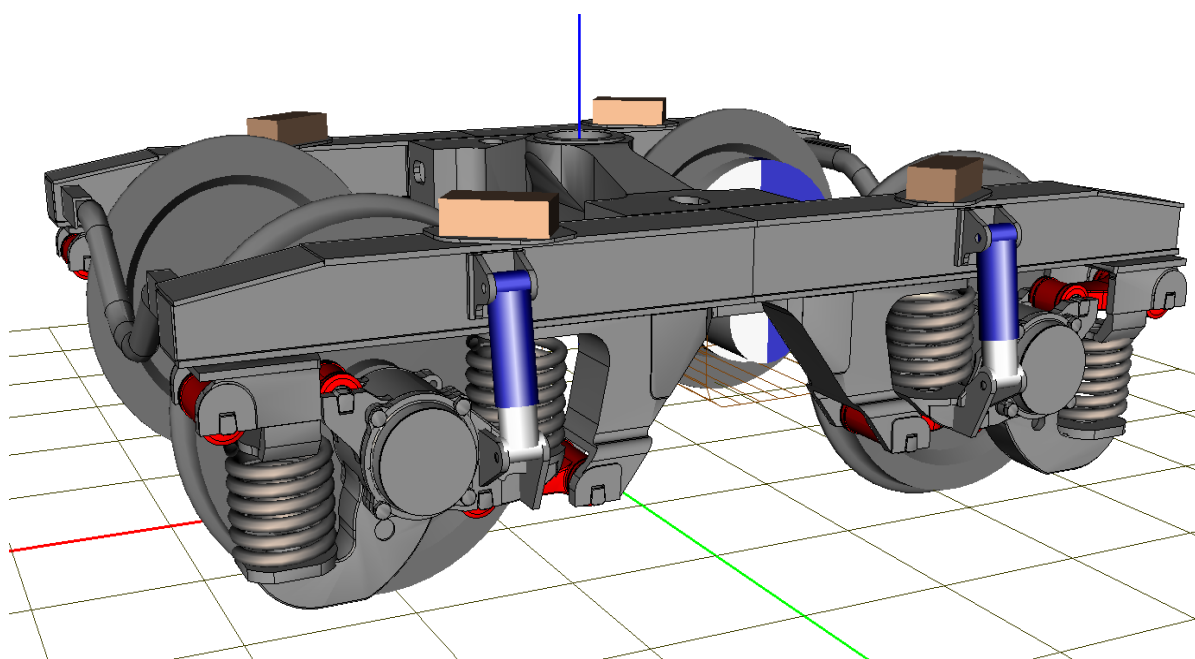


Рис. 3.5. Модель тележки ТЭМ9Н в ПК УМ

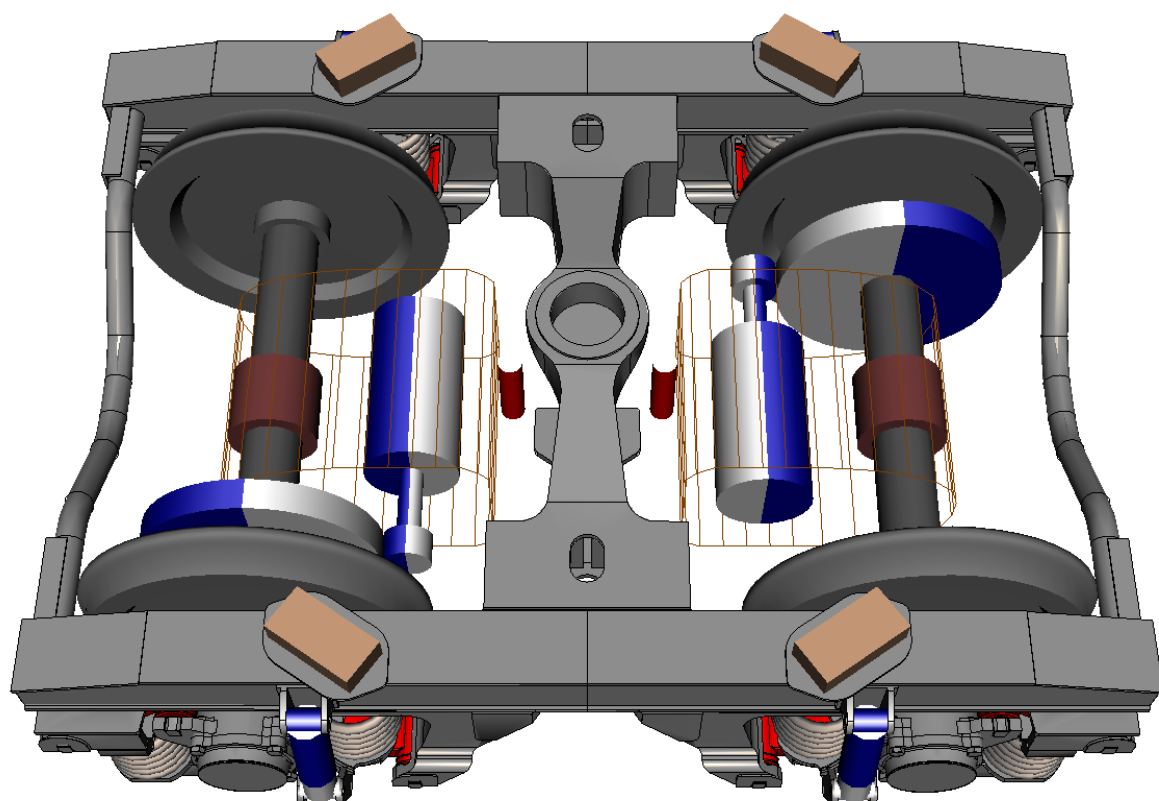


Рис. 3.6. Модели тележки ТЭМ9Н в ПК УМ, вид сверху

Локомотив имеет смешанное расположение АДД тележек (рис. 3.5, 3.6), в конструкции тележек не предусмотрены наклонные тяги или специальные догрузатели для выравнивания вертикальных нагрузок осей в режиме тяги, что может приводить к существенной неравномерности вертикальных нагрузок, ухудшающему использование сцепного веса локомотива [102].

Рассмотрим особенности моделирования колесно-моторного блока (рис. 3.7) с упругим зубчатым колесом редуктора. Колесная пара имеет 7 степеней свободы: 6 степеней свободы, как у твердого тела, и 1 вращательная степень свободы вокруг оси.

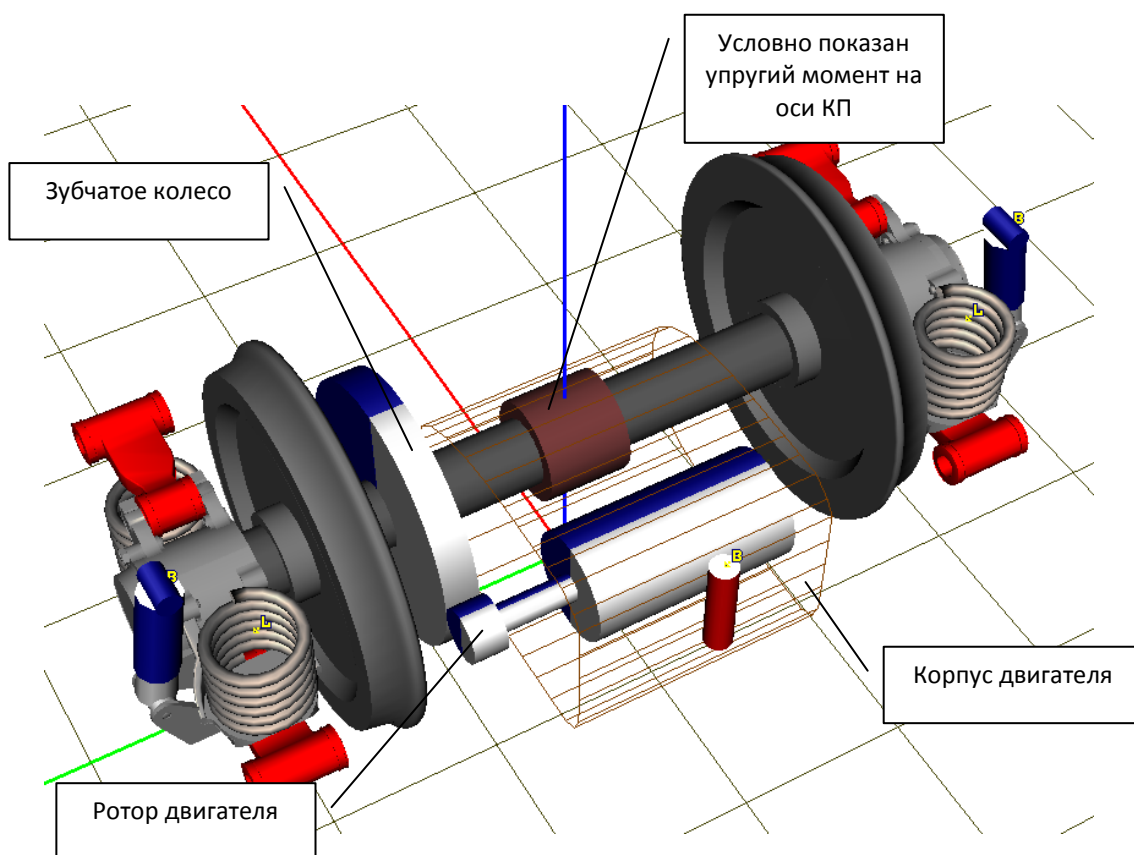


Рис. 3.7 Модель КМБ

На колесной паре упруго установлено зубчатое колесо, силовая характеристика упругого элемента представлена на рис. 3.8.

В качестве отдельных твердых тел в модель введены корпус двигателя, который имеет одну вращательную степень свободы относительно оси ко-

лесной пары, и ротор двигателя, который имеет одну вращательную степень свободы относительно корпуса двигателя. Зубчатое зацепление между шестерней, установленной на роторе двигателя и зубчатым колесом, установленным на оси колесной пары, моделируется упруго-диссипативной силой.

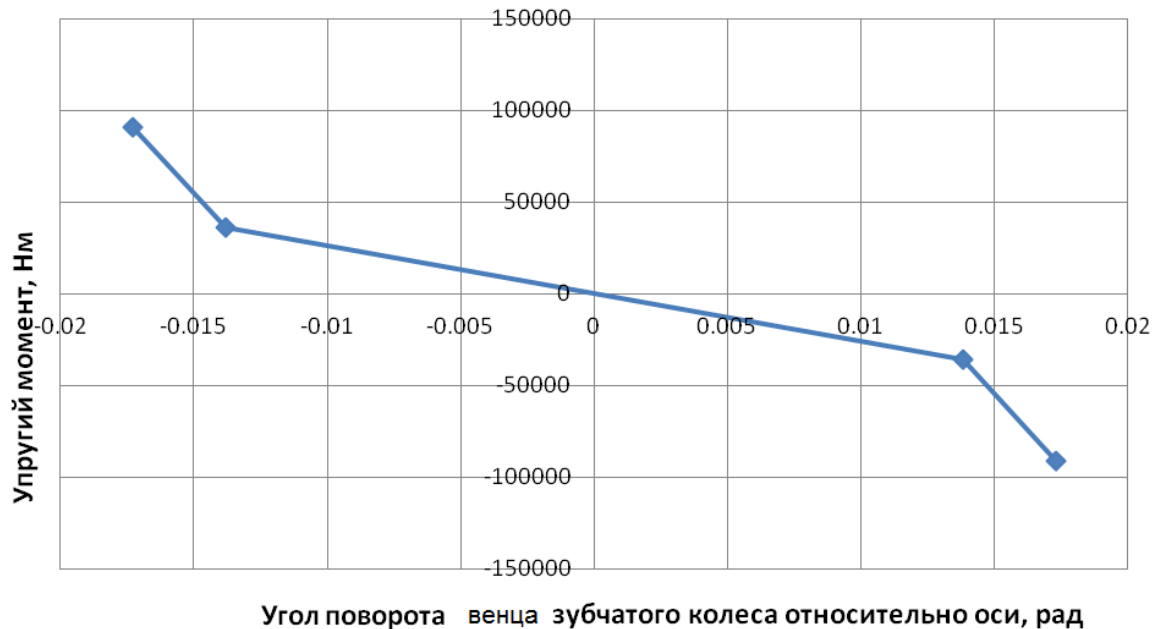


Рис. 3.8 Упругая характеристика для зубчатого колеса

Для анализа форм колебаний колесной пары локомотива использовалась конечноэлементная модель колесной пары, представленная на рис. 3.9.

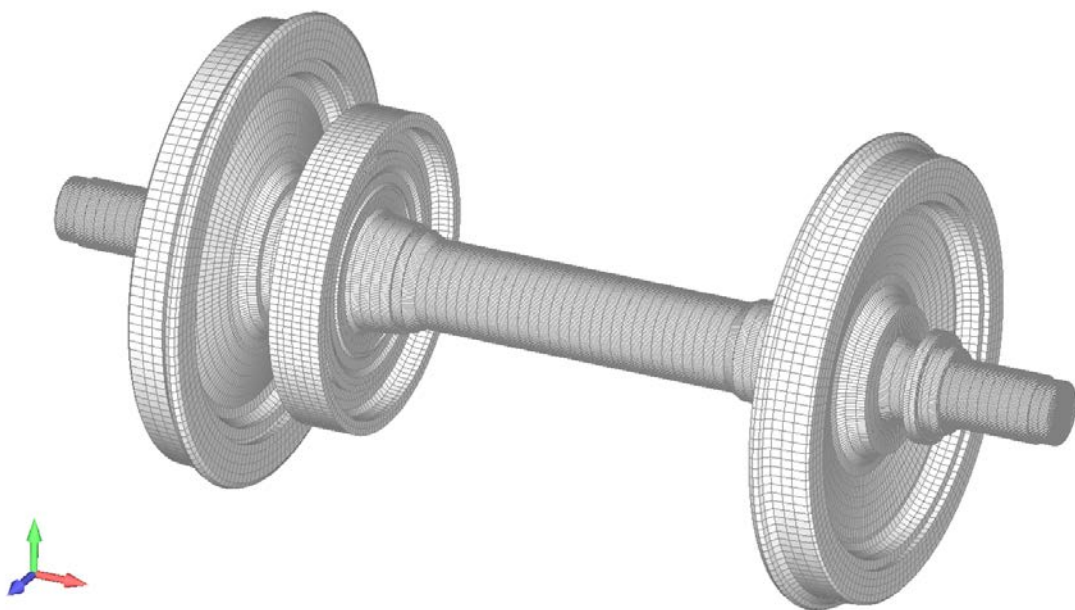


Рис. 3.9 Конечноэлементная модель колесной пары

Геометрическая модель колесной пары представляет собой сборку из двух колес с бандажами, оси, зубчатого колеса, внутренних колец подшипников и элементов уплотнений. Посадочные напряжения не учитывались, модель рассматривалась как единая область. Диаметр наружной цилиндрической поверхности зубчатого колеса принят равным диаметру делительной окружности 750 мм. Начало системы координат расположено на оси вращения колесной пары, посередине оси. Ось X направлена вдоль оси вращения.

Конечноэлементная сетка состоит из восьмиузловых и шестиузловых объёмных конечных элементов. Она получена вращением плоской сетки относительно оси колесной пары с шагом  $2,5^\circ$ . Сетка состоит из 111 888 конечных элементов и содержит 123 369 узлов.

При расчете форм колебаний модуль упругости принят равным  $E = 2 \cdot 10^{11}$  Па, коэффициент Пуассона принят равным 0,3, плотность материала  $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ . С использованием конечно-элементной модели определены также момент инерции относительно оси вращения половины колесной пары  $98 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  и  $114 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$  суммарный момент инерции половины колесной пары и зубчатого колеса,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ .

Собственные частоты и формы колебаний колесной пары рассчитаны для свободной (незакрепленной) колесной пары. В диапазоне частот от 0 до 500 Гц насчитывается 25 собственных частот, для которых формы колебаний соответствуют изгибу и кручению оси, повороту колес относительно осей координат, изгибу колес подобному изгибу пластины. Нас интересует первая собственная частота равна 81,94 Гц соответствует кручению колесной пары относительно оси вращения, необходимая для определения крутильной жёсткости оси.

Угловая жесткость момента на кручение, связывающего две половинки колесной пары (рис. 3.7), вычислена таким образом, чтобы парциальная частота крутильных колебаний была равна 81,94 Гц – частоте крутильных коле-

баний колесной пары. Модель колесной пары с разрезанной осью и одной дополнительной вращательной степени свободы (рис. 3.7) позволяет довольно детально учесть эффекты скручивания оси из-за несимметричного привода, а также возникающих при реализации предельных тяговых усилий фрикционных автоколебаний с узлом на оси колёсной пары.

Угловую жесткость оси колесной пары найдем из формулы для вычисления парциально частоты

$$k^2 = c \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} \quad (3.12)$$

где  $k$  – частота крутильных колебаний колесной пары, определенная методом конечных элементов, рад/с;

$J_1$  – момент инерции относительно оси вращения половины колесной пары, кг·м<sup>2</sup>;

$J_2$  – суммарный момент инерции половины колесной пары и зубчатого колеса, кг·м<sup>2</sup>;

$c$  – угловая жесткость оси колесной пары, приведенная к центру оси, Нм/рад.

Из формулы (3.12) выражаем угловую жесткость оси колесной пары  $c$ :

$$c = k^2 \frac{J_1 J_2}{J_1 + J_2} \quad (3.13)$$

В выражение (3.13) подставим следующие численные значения

$$k = 81,94 \cdot 2\pi = 514,84 \text{ рад/с};$$

$$J_1 = 114 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$J_2 = 98 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$$

и таким образом определим угловую жесткость оси колесной пары

$$c = 1,395 \cdot 10^7 \text{ Нм/рад.}$$

Зависимость коэффициента сцепления от скорости проскальзывания на падающем участке характеристики сцепления рассчитывается в УМ по методике О. Полаха [56;114]



$$\psi = \psi_0 \left[ (1 - A)e^{(-B \cdot V_s)} + A \right], \quad (3.14)$$

где  $V_s = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_k}$ ,  $\varepsilon_i$  – текущая скорость крива, м/с;  $\varepsilon_k$  – критическая скорость для крива, превышение которой вызывает срыв сцепления м/с;  $A$  – отношение коэффициентов трения при бесконечной и нулевой скорости проскальзывания;  $B$  – коэффициент экспоненциального уменьшения коэффициента трения.

Моделирование контактных сил выполняется по методу FastSim [114]. Для решения дифференциальных уравнений используется численный метод Парка, рассчитывается матрица Якоби.

Для иллюстрации изменения распределения вертикальных нагрузок осей, вызванного работой тяговых двигателей, на рис. 3.10 приведены результаты моделирования перераспределения вертикальных нагрузок в режиме тяги (рис. 3.10, слева) и электрического торможения (рис. 3.10, справа) локомотива с составом 1000 т из 10-и вагонов.

Задание на максимальный момент (ограничение по моменту) в данном эксперименте равно в режиме тяги 5400 Н·м и -5400 (момент на роторах АТД нарастает и снижается от нуля до максимума за 1 с) в режиме торможения. Из графиков видно, что в режиме тяги оси локомотива 1 и 3 (первые оси тележек) разгружаются, а оси 2 и 4 (вторые в тележках) – нагружаются; в режиме торможения нагружаются первые оси, разгружаются – вторые.

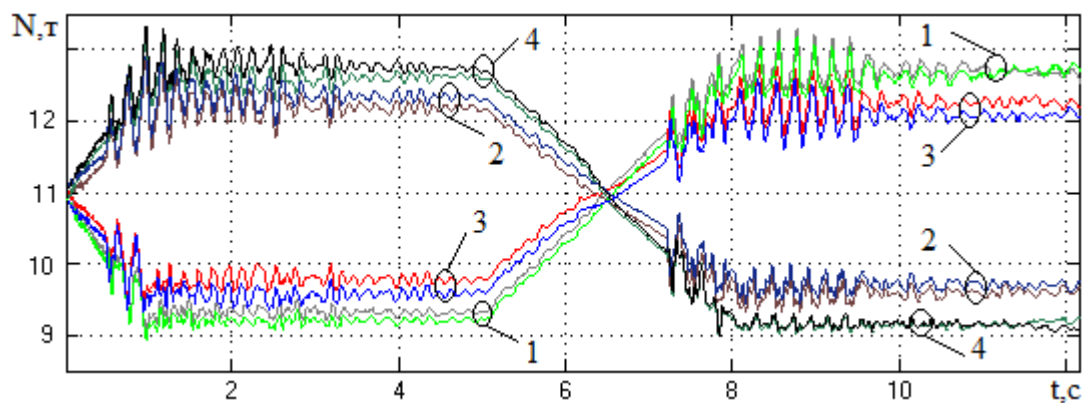


Рис. 3.10. Изменение вертикальных нагрузок колес 1-4 осей локомотива с составом

В пилотном варианте ТЭМ9Н не предусмотрены наклонные тяги в конструкции тележек или специальные догрузатели, которые бы позволили выровнять вертикальные нагрузки. Полученное распределение вертикальных нагрузок в тяговом и тормозном режимах отвечает аналитическим прогнозам и вызвано особенностями конструкции локомотива [102]. Пилообразные колебания вертикальных нагрузок вызваны продольными динамическими колебаниями локомотива и вагонов. Средние статические вертикальные нагрузки колёс в начале движения, – 10,98 тонн, – подтверждаются аналитическим расчетом и говорит о достоверности результатов моделирования (вес дизельного топлива и песка при моделировании не учитывался).

Дальнейшие исследования реализации тяговых усилий (на моделях, совмещённых с электрической подсистемой, раздел 4) показывают, что оси тележек тепловоза ТЭМ9Н, вращаемые параллельно подключенными к АИН двигателями, по нагрузкам очень существенно различаются, – до 10,8 Т при реализации потенциального коэффициента сцепления  $\psi_0 = 0,4$ , вращающие моменты на валу АТД при этом близки к номинальным.

Для определения резонансных частот механической части ТЭП было выполнено моделирование разгона ТЭМ9Н без состава (на автосцепке приложена специальная сила сопротивления) под действием экспоненциально нарастающего момента на роторах АТД (от 0 до 5400 Нм за 20 сек.). Причем, к экспоненциальному моменту ротора АТД1 первой оси, начиная с  $t=10$  сек., была добавлена гармоническая составляющая амплитудой 2000 Нм с линейно изменяющейся частотой от 0 до 100 Гц за 10 сек. (рис. 3.11).

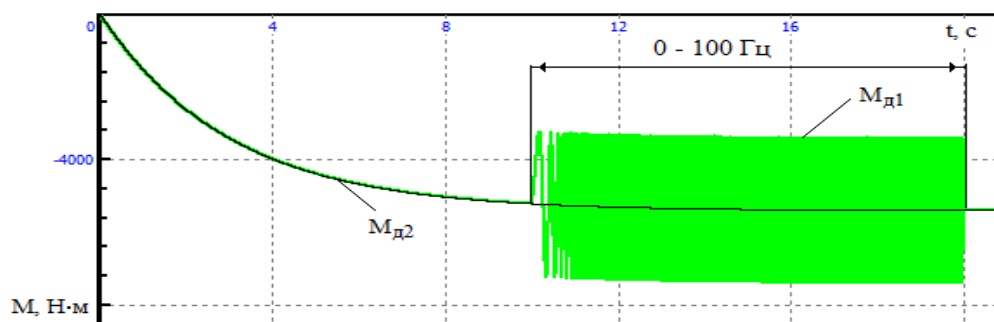


Рис. 3.11. Крутящие моменты, приложенные к роторам АТД

Исследование выполнено при  $\psi_0 = 0,35$  (рис. 3.12, без срыва сцепления) и  $\psi_0 = 0,25$  (рис. 3.13, со срывом сцепления). Там, где частота вынужденных колебаний с линейно нарастающей частотой совпадает с собственной частотой системы, наблюдаются резонансы.

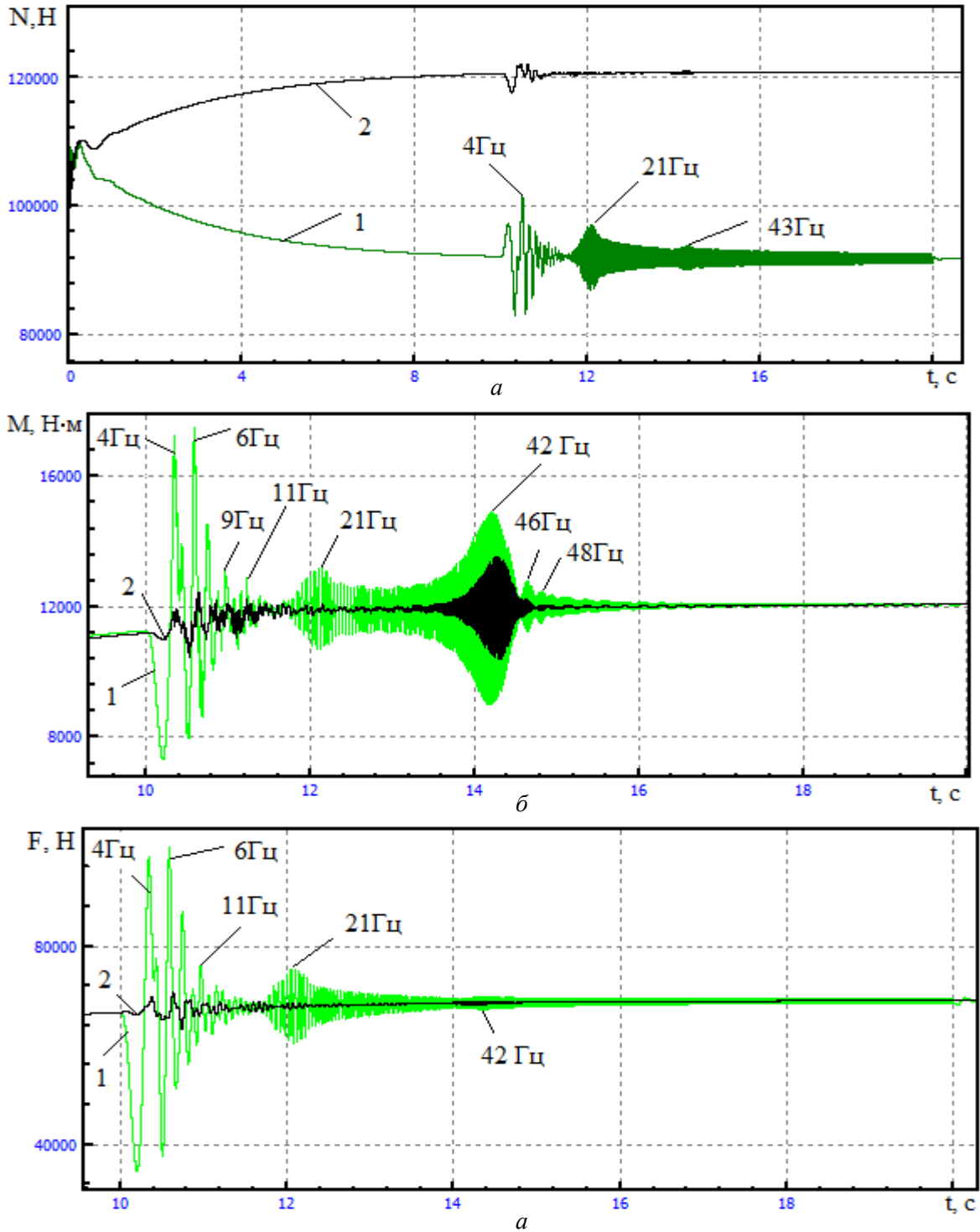


Рис. 3.12. Резонансы в механической части ТЭП ТЭМ9Н без срыва сцепления:  
 а) вертикальные нагрузки колёс 1-й и 2-й осей; б) крутящие моменты 1-й и 2-й осей;  
 в) усилия в зубчатом зацеплении редукторов 1-й и 2-й осей

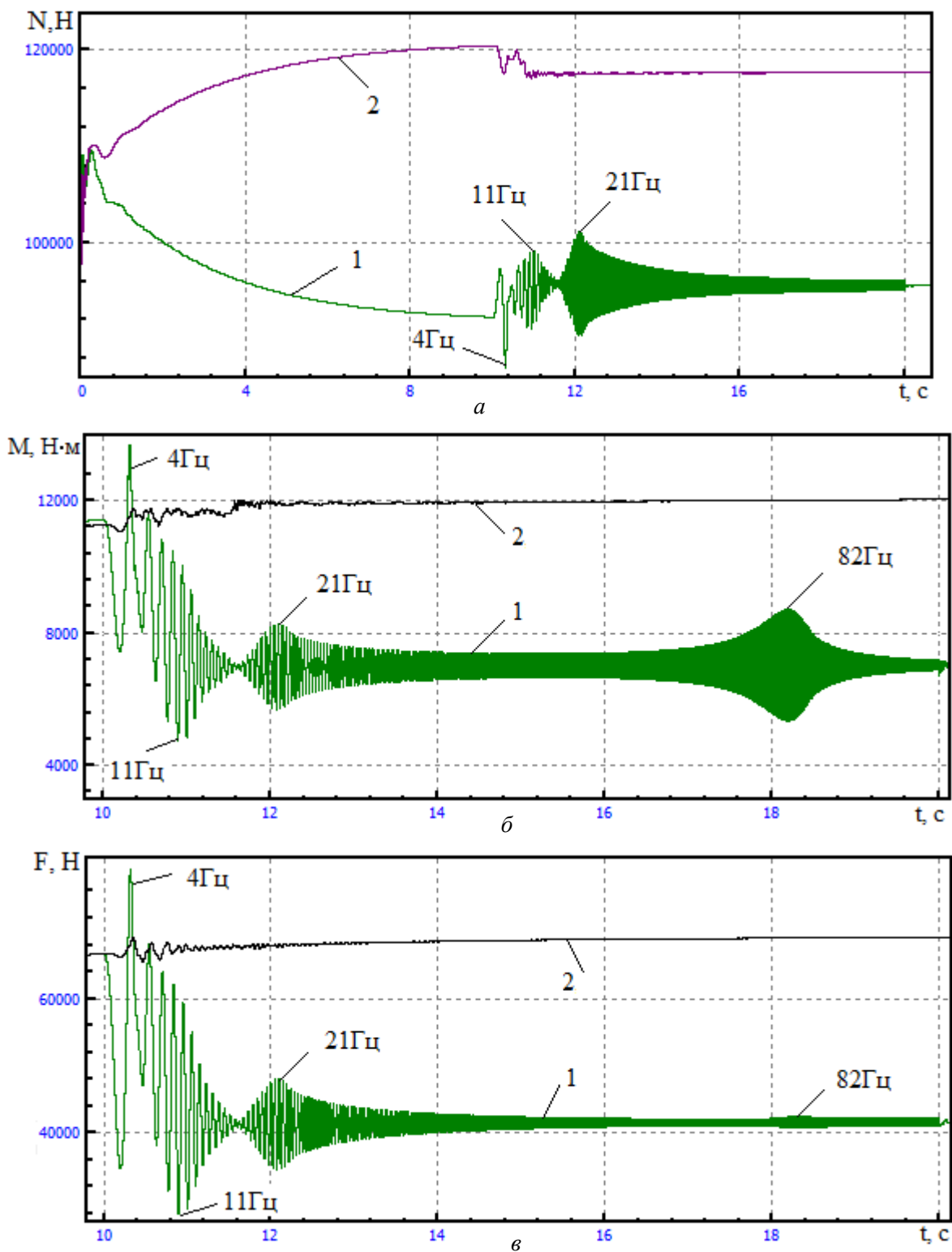


Рис. 3.13. Резонансы в механической части ТЭП ТЭМ9Н без срыва сцепления:  
 а) вертикальные нагрузки колёс 1-й и 2-й осей; б) крутящие моменты 1-й и 2-й осей;  
 в) усилия в зубчатом зацеплении редукторов 1-й и 2-й осей

На графиках видно, что при потере сцепления появляются колебания 82 Гц (рис. 3.13б) с узлом на оси. Частота 82 Гц соответствует первой собст-

венной 81,94 Гц рассчитанной методом конечных элементов. При срыве сцепления гармонический состав резонансных частот несколько меняется, что согласуется с работами [59;61;62]. В режиме без срыва сцепления наиболее существенно выражены резонансы на частотах 4, 6, 21 и 42 Гц. При срыве сцепления наибольшие резонансы наблюдаются при частотах 4, 11, 21 и 82 Гц.

### **3.3. Выводы по разделу 3**

1. Разработаны математические и компьютерные модели механической подсистемы ТЭП гибридного тепловоза ТЭМ9Н с опорно-осевой подвеской АД и упругим зубчатым колесом.

2. Определённые при моделировании средние статические вертикальные нагрузки колёс в начале движения составляют 10,98 тонн и соответствуют аналитическим расчетам.

3. Выявлена существенная неравномерность распределения вертикальных нагрузок осей в тормозных и тяговых режимах, причём при увеличении моментов АД она возрастает: в режиме тяги первые оси тележек разгружаются, вторые – нагружаются. В режиме торможения – наоборот. Такое распределение нагрузок при работе АД определяется конструктивными особенностями локомотива и соответствует аналитическим прогнозам.

4. Различие вертикальных нагрузок между первой и второй осью тележки может достигать до 10,8 тонн при номинальных вращающих моментах на валу двигателей.

5. На основе моделирования определены резонансные частоты механической части привода: без срыва сцепления наиболее ярко выражены резонансы на частотах 4, 6, 21 и 42 Гц. При срыве сцепления - 4, 11, 21 и 82 Гц.

## **РАЗДЕЛ 4. КОМПЛЕКСНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЭП С СОВМЕСТНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ АТД И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ УСИЛИЙ**

Комплексные электромеханические модели предполагают соединение моделей электрической (силовой и управляющей) и механической подсистем ТЭП в единую модель, учитывающие динамику электрической и механической части ТЭП в их взаимодействии и взаимовлиянии. Комплексные модели выполнены, как с упрощенной механической подсистемой, - в MatLab/Simulink, так и с детализированным представлением механической части, - на основе совмещения ПК MatLab/Simulink и УМ при помощи специального интерфейса CoSimulation [102,103,114].

### **4.1. Создание комплексных моделей ТЭП с совместным регулированием АТД**

На первом этапе логичной и методически правильной является разработка модели ТЭП с упрощенной механической частью. При создании такой модели по уравнениям (3.1-3.11) с учётом табл. 3.1, 3.2 в MatLab/Simulink из динамических звеньев составляется блок-диаграмма механической подсистемы ТЭП для одной оси локомотива и оформляется в виде подсистемы. На выходе подсистемы имеются рассчитываемые угловые скорости и моменты всех учитываемых элементов расчётной схемы (3.1), а также силы тяги колес. Разработанная модель МЧ ТЭП оси дублируется для второй оси тележки. На вход моделей механической части первой и второй осей подаются электромагнитные моменты первого и второго АТД соответственно (АТД1 и АТД2, рис. 2.3) из модели электрической подсистемы ТЭП тележки, составленной на основе уравнений (2.1-2.14; 2.17-2.19; 2.22-2.27 с учётом табл. 2.1, 2.2, 2.4). Далее суммируются силы тяги всех четырех колес тележки и прикладываются к инерционной массе локомотива и состава. В качестве примера на рис. 4.1 приведена комплексная электромеханическая модель ТЭП тележки.

Аналогично составляется модель ТЭП четырёхосного локомотива, включающая модели ТЭП двух тележек (рис. 4.2).

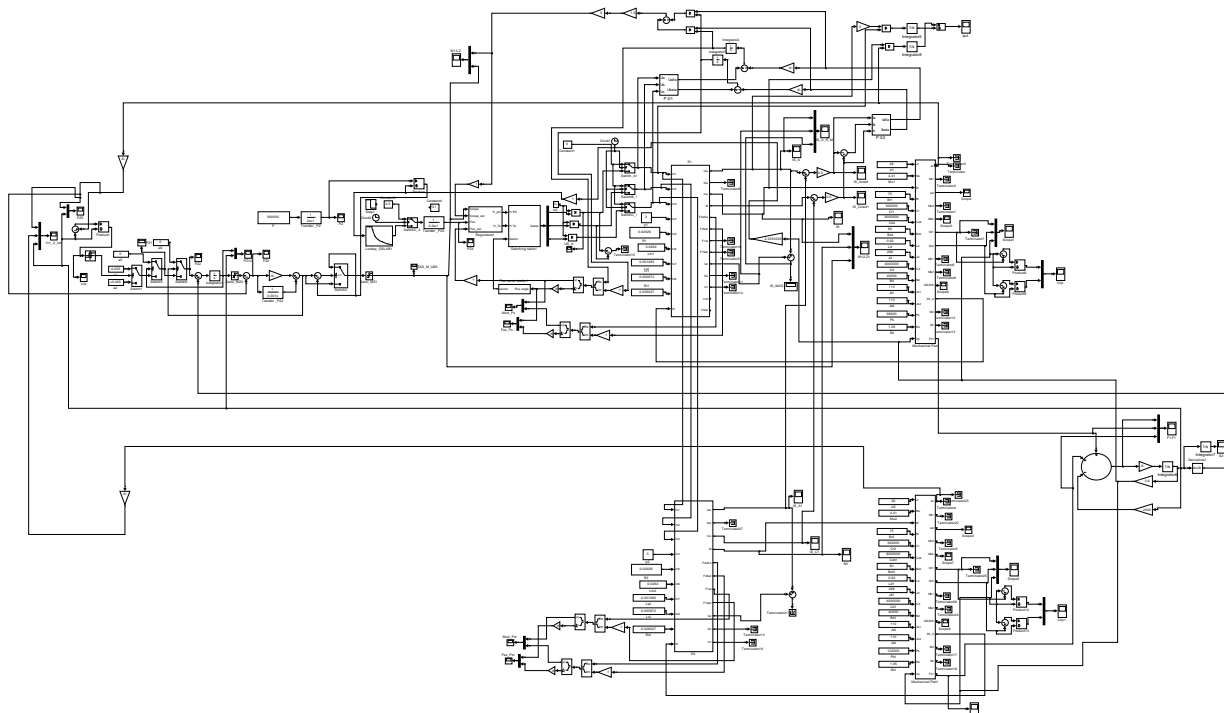


Рис. 4.1. Комплексная электромеханическая модель ТЭП тележки при упрощённом моделировании механической части

Модель выполнена по методу подсистем. На рис. 4.1 справа в центре расположены элементы блок-диаграммы, моделирующие суммарную массу локомотива и поезда, к которой прикладываются силы тяги четырех колес от двух подсистем механической части ТЭП осей тележки (расположены левее). И далее, ещё левее, расположены две подсистемы параллельно подключённых к инвертору (моделируемому коммутационными функциями) асинхронных двигателей с совместным регулированием (общей системой управления).

Разумеется, такая упрощённая модель отражает только крутильные колебания основных элементов ТЭП и не учитывает вертикальные колебания, а также динамику перераспределения нагрузок, что важно при регулировании на пределе по сцеплению. Однако она отражает и позволяет понять суть происходящих явлений. Перераспределение вертикальных нагрузок при таком моделировании можно приближённо задать на основе опытов, проведенных в УМ [102].

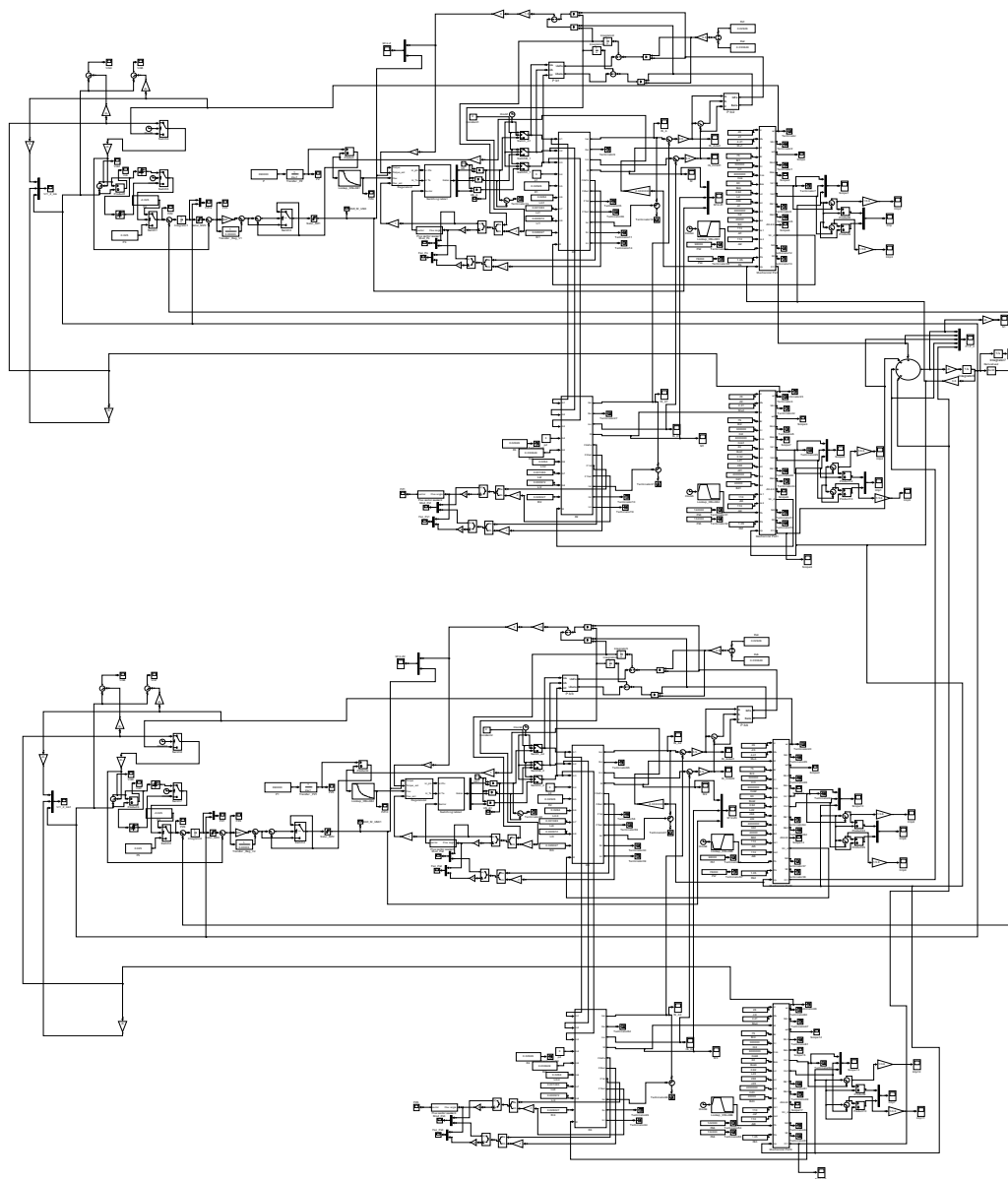


Рис. 4.2. Комплексная электромеханическая модель ТЭП четырёхосного локомотива при упрощённом моделировании механической части

Вторым этапом стала разработка с целью уточнения расчётов комплексной электромеханической модели с детализированным представлением механической части ТЭП. При этом модель ходовой и экипажной части локомотива, а также состава выполняется в UM, что позволяет более подробно учесть крутильно-вертикальные колебания и собственные резонансные частоты (рис. 3.12, 3.13), а также динамику изменения вертикальных нагрузок в тяговых и тормозных режимах (рис. 3.10).

Разработанная в UM модель МЧ интегрируется в MatLab (рис. 4.3) по-



средством её предварительного преобразования при помощи инструмента UM, - «Мастер связи с MatLab/Simulink» в S-функцию [114].

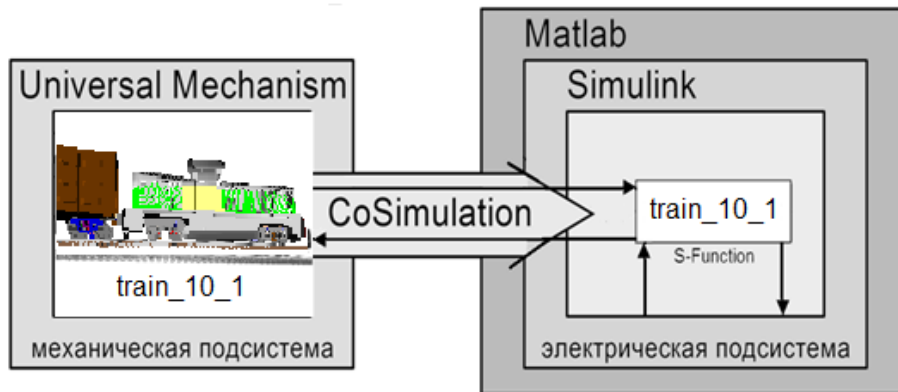


Рис. 4.3. Иллюстрация совмещения моделей UM и MatLab

Увеличенный фрагмент комплексной модели, выполненной с использованием взаимосвязи MatLab/Simulink и UM, включающий блок S-Function, приведен на рис. 4.4. Полная модель приведена на рис. 4.5. Интерфейс CoSimulation, используемый для этих целей, был создан разработчиками UM сравнительно недавно, в 2008 году, с его применением выполнялись работы [48; 65].

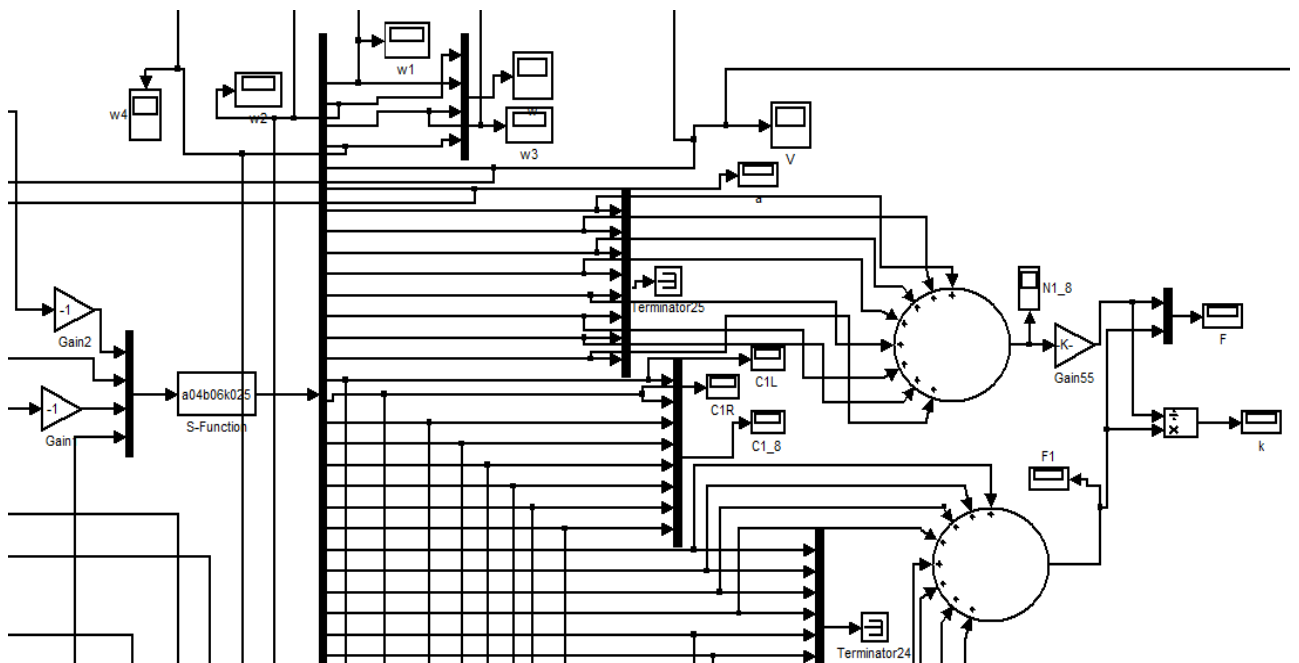


Рис. 4.4. Фрагмент блок-диаграммы комплексной модели

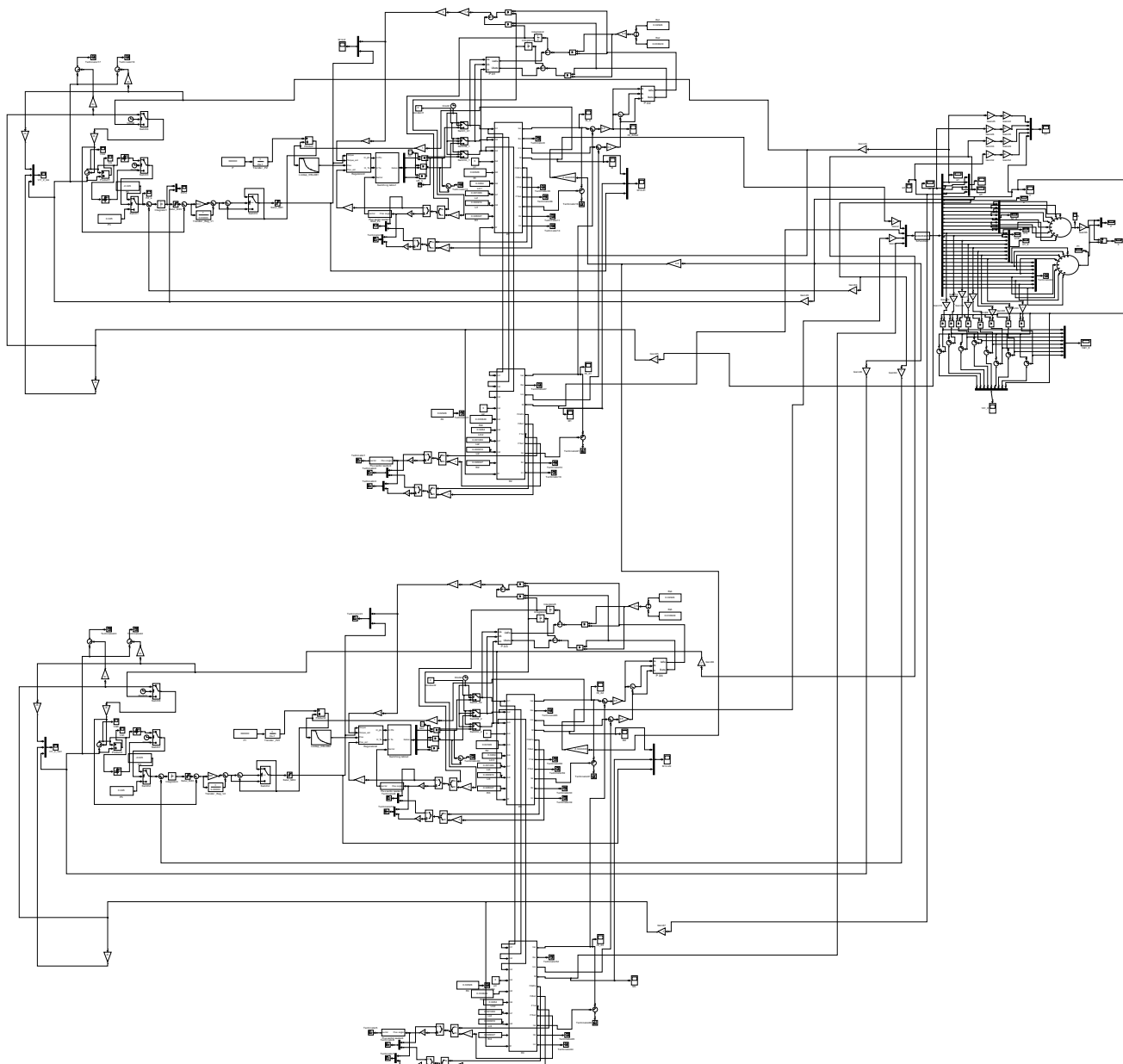


Рис. 4.5. Блок-диаграмма комплексной модели

К блоку S-Function, содержащему модель механической подсистемы, синтезированную в UM, из модели электрической подсистемы подаются электромагнитные моменты четырёх АД (на рис. 4.4. входят слева в блок S-Function слева). Из механической подсистемы (из блока S-Function справа на рис. 4.4) на шину выходят все необходимые переменные состояния МЧ (скорости роторов АД, колёс, локомотива, крип и др.). Скорости роторов и локомотива, входящие в уравнения моделей АД и системы управления ТЭП,

передаются из механической подсистемы в электрическую часть.

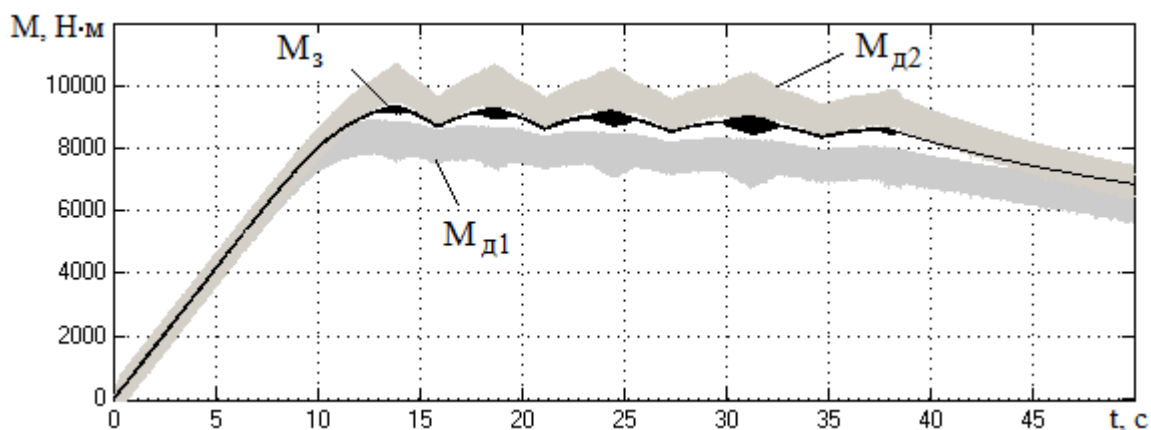
Для возможности анализа реализации предельных тяговых и тормозных усилий ТЭП локомотива и использования потенциальных условий сцепления нижний сумматор (рис. 4.4) складывает силы тяги (торможения) всех колёс, определяя общую силу тяги (торможения) локомотива, верхний сумматор складывает вертикальные нагрузки колёс, определяя динамический сцепной вес. Умножая динамический сцепной вес на потенциальный коэффициент сцепления, определяем предельную по сцеплению силу тяги (торможения). Далее, разделив общую силу тяги (торможения) локомотива на максимально возможную силу, определяем реализуемый в каждый момент времени коэффициент сцепления в относительных единицах, то есть получаем в динамике долевое (или процентное) использование потенциального коэффициента сцепления.

#### **4.2. Предварительный анализ реализации предельных усилий на упрощенных моделях ТЭП**

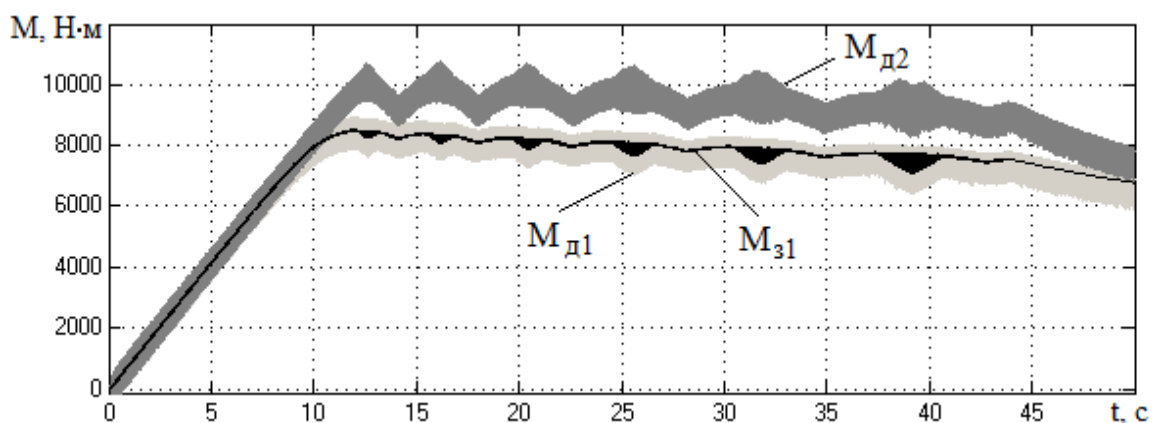
Исследование предлагаемых вариантов управления предварительно произведено на комплексной модели, включающей упрощенную модель механической части ТЭП четырехосного локомотива (рис. 4.2). В модель подставлены усредненные вертикальные нагрузки колес, вычисленные на основе моделирования механической подсистемы ТЭП в УМ. В упрощенной модели не учитываются колебания подрессоренных частей тележки, экипажа и рельсового основания.

В качестве примера на рис. 4.6, 4.7 представлены результаты моделирования ТЭП первой тележки при разгоне на пределе сцепления тепловоза ТЭМ9Н с составом 2000 Т. Моделировалось регулирование параллельно включенных двигателей на пределе по сцеплению: 1) по скорости АТД1 первой оси (рис. 4.6); 2) по скорости АТД2 второй (рис. 4.7). При этом в первом случае в СУ применялось вычисление переменных состояния по усреднённой

модели двигателя с использованием среднего тока АТД1 и АТД2 (рис. 4.6,а) или использовались переменные состояния первого АД (рис. 4.6,б) [102].



а)



б)

Рис. 4.6. Результаты моделирования реализации предельных тяговых усилий при разгоне тепловоза ТЭМ9Н с составом 2000 Т при регулировании ТЭП тележки по скорости АТД1: а – при регулировании ТЭП тележки по переменным состояниям, вычисляемым по усредненной модели двигателя; б – при регулировании ТЭП тележки по переменным состояниям АТД1 ( $M_{д1}$  и  $M_{д2}$  – электромагнитные моменты АТД1 и АТД2 соответственно;  $M_3$  – здание на момент, вычисляемое по усредненной модели,  $M_{31}$  – здание на момент, вычисляемое по переменным состояниям АТД1)

Реализация предельных сил связана с регулированием скорости ротора АТД, приведенной к линейной скорости точки на ободе колеса (далее скорость ротора), вблизи оптимального проскальзывания, обеспечивающего максимальный коэффициент сцепления. Так как величина оптимального проскальзывания имеет случайный разброс, то на практике применяются различные методики самонастройки на максимум [102].

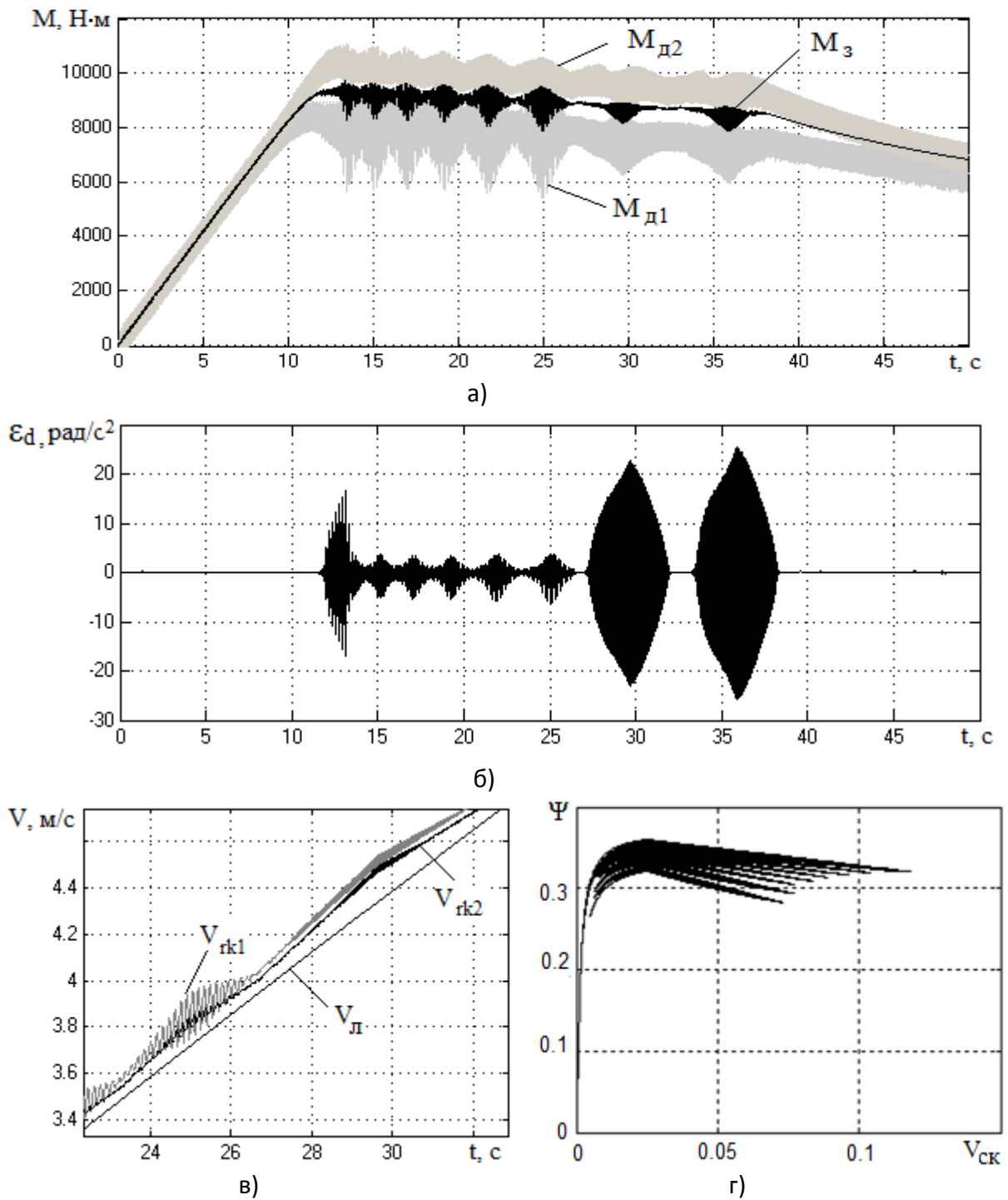


Рис. 4.7. Результаты моделирования реализации предельных тяговых усилий при разгоне тепловоза ТЭМ9Н с составом 2000 Т при регулировании ТЭП тележки по скорости АД2 и переменным состояниям, вычисляемым с использованием общих токов  $I_A$  и  $I_C$ :  
а – электромагнитные моменты двигателей первой ( $M_{д1}$ ) и второй ( $M_{д2}$ ) осей и задание на электромагнитный момент ( $M_3$ );  
б – виброускорение корпуса АД1;  
в – скорости роторов первого ( $V_{rk1}$ ) и второго ( $V_{rk2}$ ) двигателей, приведенные к линейной скорости колеса, и скорость локомотива ( $V_{л}$ );  
г – коэффициент сцепления, реализуемый колесом первой оси

При моделировании использовалось наиболее распространенное вычисление задания на скорость ротора путем интегрирования заданного приведенного к ускорению колеса ускорения ротора АТД, вычисляемого по оценочному ускорению локомотива. Если в при разгоне заданное ускорение ротора больше ускорения локомотива, то задание на скорость ротора увеличивается быстрее скорости локомотива, соответственно растет электромагнитный момент во внутреннем контуре регулирования ТЭП (рис. 4.6а,б; 4.7а), и рабочая точка смещается вправо по характеристике сцепления (рис. 1.1а, 4.7г); если заданное ускорение ротора меньше ускорения локомотива на определенную величину, электромагнитный момент соответственно снижается, и рабочая точка на характеристике сцепления смещается влево. Таким образом, изменяя скачком заданное ускорение ротора (привязанное к ускорению локомотива) при переходе момента АТД через максимум и его фиксированном снижении, мы удерживаем рабочую точку вблизи максимума характеристики сцепления [102].

При регулировании ТЭП по скорости АТД1 первой оси (рис. 4.6) и вычислении переменных состояния двигателя по усредненной модели с использованием общих токов параллельно включённых двигателей ( $I_A$ ,  $I_C$ , рис. 2.2) задание на момент  $M_3$ , снимаемое с регулятора скорости и сравниваемое с модельным моментом, имеет вид, представленный на рис. 4.6а. Инвертор напряжения, к которому подключены оба двигателя, регулируется с учетом полученных по усредненной модели значений, и двигатели АТД1 и АТД2 в каждый момент времени работают по своим естественным механическим характеристикам, соответствующим текущей частоте и напряжению АИН. Для представленных на рис. 4.6, 4.7 расчетных вариантов параметры АТД всех осей, диаметры бандажей колес и условия сцепления приняты одинаковыми. Поэтому АТД1 и АТД2 работают по одинаковым естественным характеристикам, но за счет того, что вертикальная нагрузка колес первой оси меньше, АТД1 вращается быстрее и по естественной характеристике реализует мень-

ший электромагнитный момент  $M_{д1}$ , чем момент  $M_{д2}$  двигателя АТД2 второй оси, которая имеет большую вертикальную нагрузку и вращается медленнее. Таким образом, ось с большей вертикальной нагрузкой реализует больший электромагнитный момент (рис. 4.6а), что в значительной мере компенсирует негативный эффект снижения силы тяги из-за неравномерного перераспределения вертикальных нагрузок тепловоза ТЭМ9Н. Однако в электрической части при этом АТД2 нагружается большим током, чем первый АД [102].

Для сравнения (рис. 4.6б) даны результаты расчёта того же режима движения при использовании в адаптивной модели двигателя токов АТД1 вместо усредненных токов. В этом случае задание на момент меньше, и электромагнитный момент двигателя первой оси  $M_{д1}$  изменяется в соответствии с заданием  $M_{з1}$ , как это и должно быть, но в целом результаты аналогичны. При выходе ТЭП на максимум сцепления в механической передаче усиливаются собственные формы колебаний, которые передаются на корпус двигателя (рис. 4.7б) и частично на ротор, это вызывает соответствующие компенсационные колебательные изменения в заданиях на электромагнитный момент  $M_з$ ,  $M_{з1}$  (на рис. 4.6, 4.7 сигналы приведены без фильтрации). При регулировании по скорости АТД1 первой оси эти колебания незначительны и обусловлены, в основном, крутильными с узлом на оси колебаниями колес [102].

Существенное усиление собственных форм колебаний происходит при регулировании ТЭП по скорости двигателя второй оси АТД2 (рис. 4.7б). Реализуемый АТД2 электромагнитный момент  $M_{д2}$  (рис. 4.7а) при таком управлении больше, чем в первом случае, однако, выводя АТД2 на предел по сцеплению, мы превышаем предел сцепления для АТД1 и смещаем его в зону буксования (рис. 4.8). Работая по текущей естественной характеристике, ротор АТД1 увеличивает скорость  $V_{rk1}$  (рис. 5.7в), попадая в зону буксования (рис. 4.7г), электромагнитный момент  $M_{д1}$  при этом резко снижается (рис. 4.7а), обороты АТД1 и соответственно  $V_{rk1}$  падают, сцепление восстанавли-

вается, электромагнитный момент  $M_{д1}$  вновь нарастает, и далее процесс повторяется, возникают нежелательные фрикционные автоколебания, которые могут привести к повышенному износу и поломкам [102].

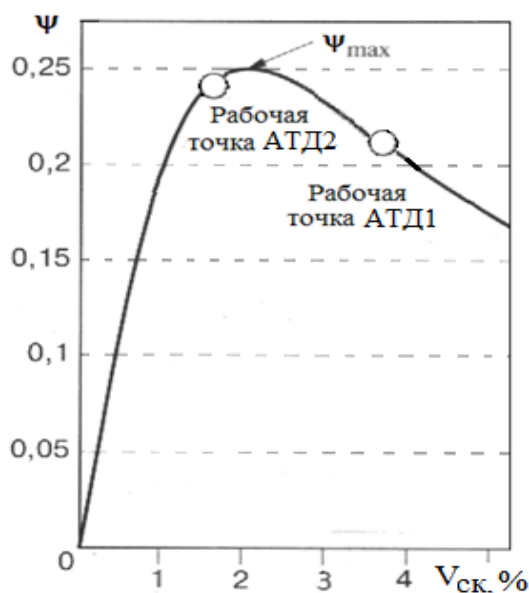


Рис. 4.8. Положение рабочих точек при регулировании двигателя второй оси (АТД2)

Усиление вибрации элементов ТЭП в определенных частотных диапазонах при попадании на падающую ветвь характеристики может служить дополнительным индикатором для снижения задания на ускорение ротора [45, 48] (а значит, и снижения электромагнитного момента), возможно также активное гашение колебаний с использованием модального регулирования [42], однако последнее весьма сложно реализовать [102].

### **4.3. Исследование динамических процессов в ТЭП с совместным разрывным управлением АД при разгоне и торможении на пределе по сцеплению**

На основе моделирования с использованием комплексной электромеханической модели с детализированным представлением механической части была исследована работа ТЭП с совместным регулированием АД в различ-



ных режимах движения при варьировании потенциального коэффициента сцепления  $\psi_0$  в диапазоне от 0,4 до 0,1, моделировался разброс активных сопротивлений обмоток статора и ротора параллельно работающих АД до 15 %. Основной упор делался на работу ТЭП в первой зоне регулирования (без ослабления поля), где возможна и наиболее вероятна реализация максимально допустимых по условиям сцепления электромагнитных нагрузок АД.

Как пример на рис. 4.9 даны графики расчёта разгона тепловоза с составом весом 1000 т при реализации предельных тяговых усилий на горизонтальном прямолинейном участке в хороших погодных условиях (результаты приведены для первой тележки локомотива) [103].

В данном случае контроллером машиниста установлена максимальная сила тяги, которой соответствует ограничение по моменту 13000 Н·м, а предел по сцеплению находится ниже. Поэтому СУ ТЭП при разгоне выводит на предел по сцеплению колеса первой оси, регулируя скольжение по частоте вращения АД1 (рис. 2.3), который реализует при этом предельный электромагнитный момент  $M_1$  (рис. 4.9а), а двигатель второй оси, подключенный к тому же инвертору, развивает при этом больший электромагнитный момент ( $M_2$ ) и меньшее скольжение (вращается медленнее), так как вторая ось имеет большую, чем первая, вертикальную нагрузку. В связи с требуемым изменением частоты коммутаций (рис. 2.4) на графиках (рис. 4.9а) видно ступенчатое изменение коридора момента [103].

Колеса первой оси, разгоняясь, достигают предела сцепления ( $\psi_0$ ), это видно из того, что достигает единицы относительный коэффициент сцепления  $k$ , определяемый по выражению (1.2). Реализуемый коэффициент сцепления  $\psi$  при таком движении снижается (рис. 4.9в) с ростом скорости из-за того, что зависит от скорости и с увеличением скорости снижается  $\psi_0$  в соответствии с табл. 3.2. В ПК УМ данную зависимость приходится реализовывать в функции расстояния, предварительно рассчитав скорость.

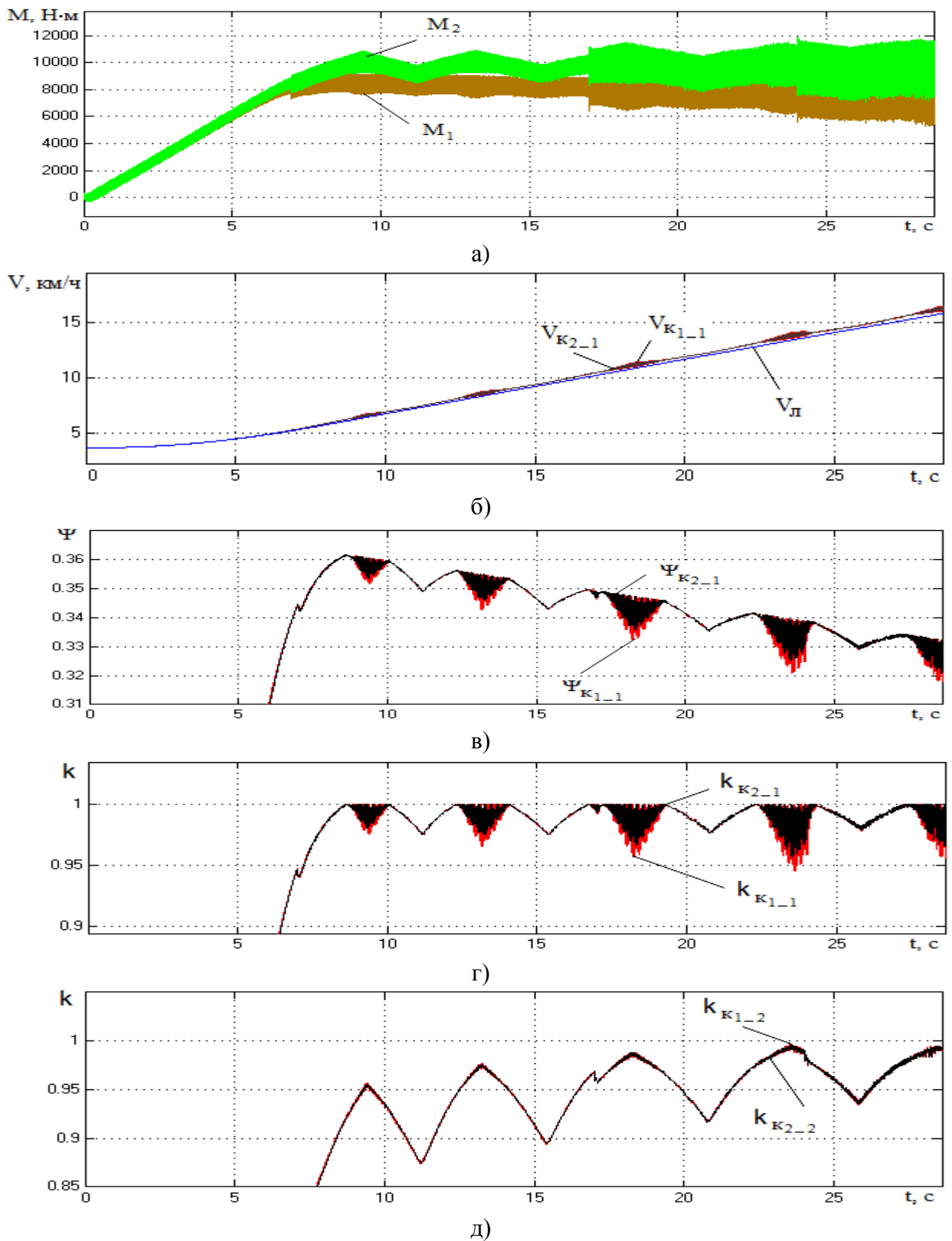
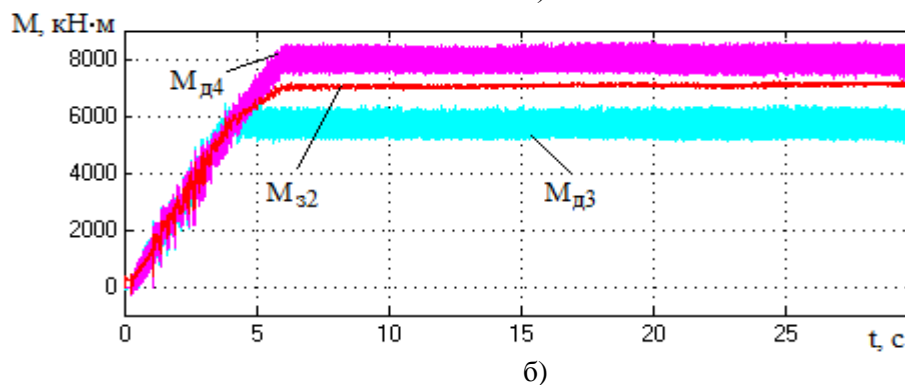
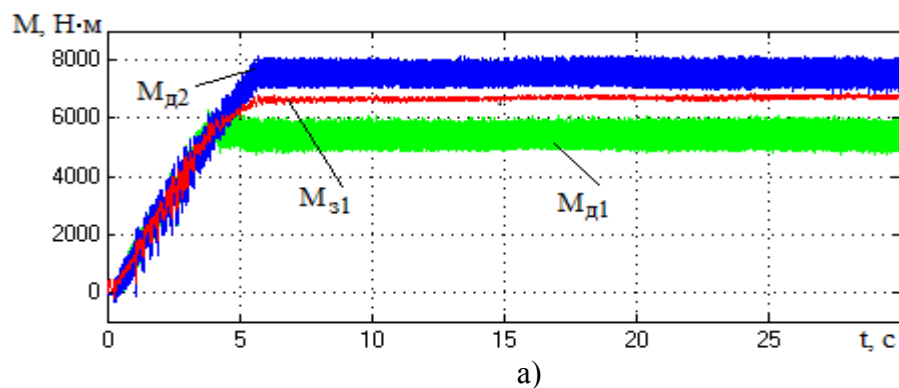


Рис. 4.9. Результаты моделирования разгона тепловоза с составом 1000 т на прямолинейном горизонтальном участке при реализации предельных тяговых усилий:  
а) электромагнитные моменты АД первой ( $M_1$ ) и второй ( $M_2$ ) осей; б) скорости колес 1-й оси ( $V_{K1-1}$  и  $V_{K2-1}$ ) и локомотива ( $V_{\text{л}}$ ); в) коэффициенты сцепления колес 1-й оси ( $\Psi_{K1-1}$  и  $\Psi_{K2-1}$ ); г) коэффициенты сцепления колес 1-й оси в относительных единицах ( $k_{K1-1}$  и  $k_{K2-1}$ ); д) коэффициенты сцепления колес 2-й оси в относительных единицах ( $k_{K1-2}$  и  $k_{K2-2}$ )

При увеличении проскальзывания развиваются фрикционные колебания колес первой оси с узлом на оси (рис. 4.9б), из-за которых возникают колебания абсолютного (рис. 4.9в) и относительного (рис. 4.9г) коэффициента сцепления колес первой оси. Колеса второй оси при этом не достигают предела по сцеплению (рис. 4.9д), так как в режиме тяги вторая ось имеет большую вертикальную нагрузку. За отведенное время моделирования (рис. 4.9) локомотив не успевает разогнаться до заданной КМ скорости, поэтому продолжает разгоняться на пределе по сцеплению в режиме полного поля [103].

Как видно из графиков 4.9г,д, в данном режиме при реализации предельных усилий, средний коэффициент сцепления в относительных единицах, реализуемый ТЭП тележки на опускается ниже 0,94, то есть обеспечивается использование потенциальных условий сцепления не менее 94 %.

Получить использование условий сцепления на 100 % (рис. 4.10) удаётся только при слабо падающей кривой сцепления практически без максимума (рис. 1.3), что в реальных условиях может наблюдаться на влажных рельсах.



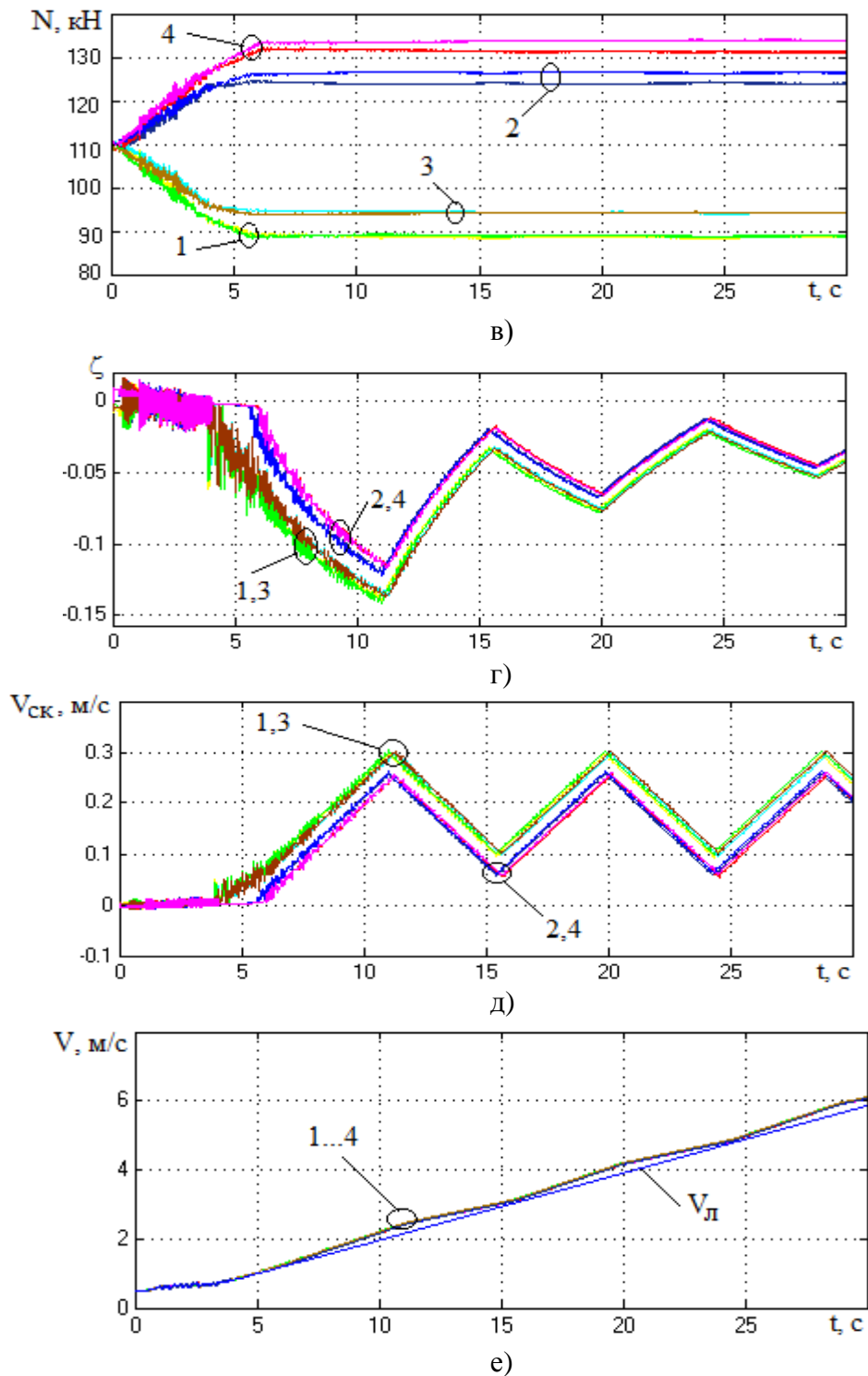
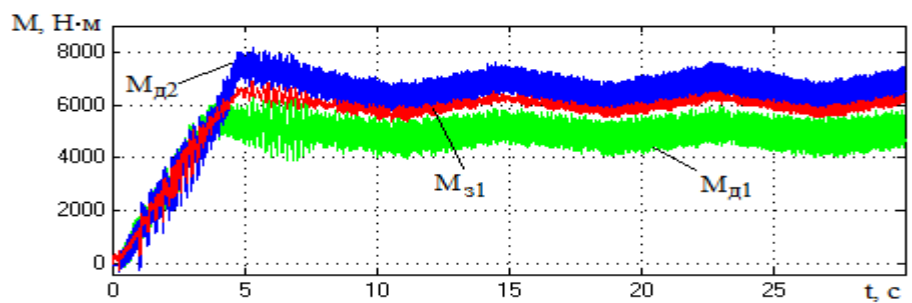


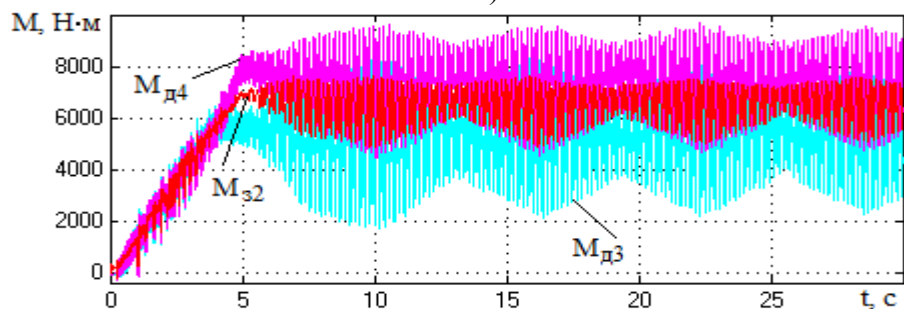
Рис. 4.10. Разгон локомотива с составом 1000 т на пределе по сцеплению,  $\psi_0 = 0,25$ , кривая сцепления слабо падающая (без максимума, - в формуле О.Полаха  $A=0,5$ ;  $B=0,15$ ,  $\varepsilon_k=0,25$  м/с), скольжение колес регулируется в абсолютных единицах от 0,3 м/с до 0,1 м/с по скорости двигателей первых осей тележек (АТД1 и АТД3 соответственно): а) задание на момент ( $M_{31}$ ) и моменты АТД1 ( $M_{д1}$ ), АТД2 ( $M_{д2}$ ) 1-й тележки; б) задание на момент ( $M_{32}$ ) и моменты АТД3 ( $M_{д3}$ ), АТД4 ( $M_{д4}$ ) 2-й тележки; в) вертикальные нагрузки колес осей 1-4; г) крип (относительное проскальзывание) колес осей 1-4; д) проскальзывание колес осей 1-4; е) скорости локомотива ( $V_{л}$ ) и колес осей 1-4

Как видно из рис. 4.10, в случае отсутствия падающего участка на кривой сцепления фрикционных автоколебаний в системе ТЭП не возникает. Кривая доходит до 0,14 (то есть, относительное проскальзывание 14 %, рис. 4.10г), но относительный коэффициент сцепления при этом практически не падает и остаётся равным единице, так как в данном случае характеристика сцепления без падающего участка. Сила тяги изменяется только за счёт изменения вертикальных нагрузок осей при изменении СУ электромагнитных моментов АД с целью регулирования проскальзывания.

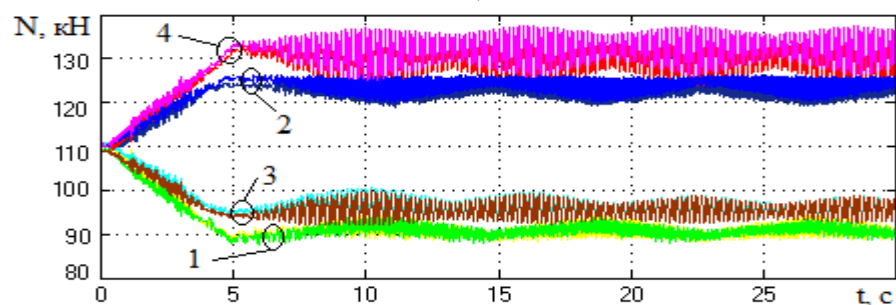
Если же характеристика сцепления имеет максимум (и падающий участок), то существенное значение имеет то, по скорости двигателя, какой из осей тележки ведётся управление. Управление в режиме тяги по скорости двигателя второй оси тележки (рис. 4.11) может привести при реализации предельных усилий к увеличению фрикционных автоколебаний.



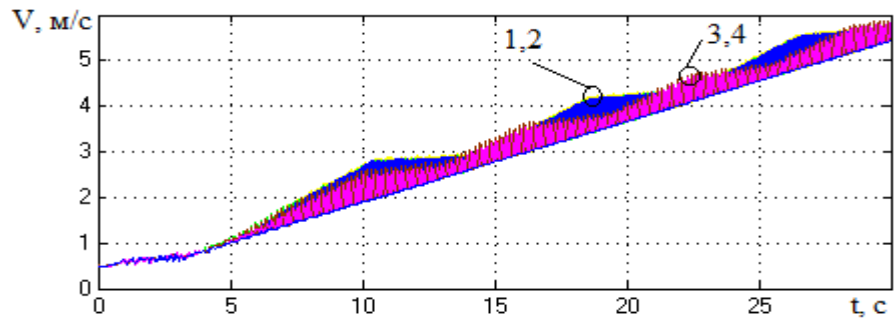
а)



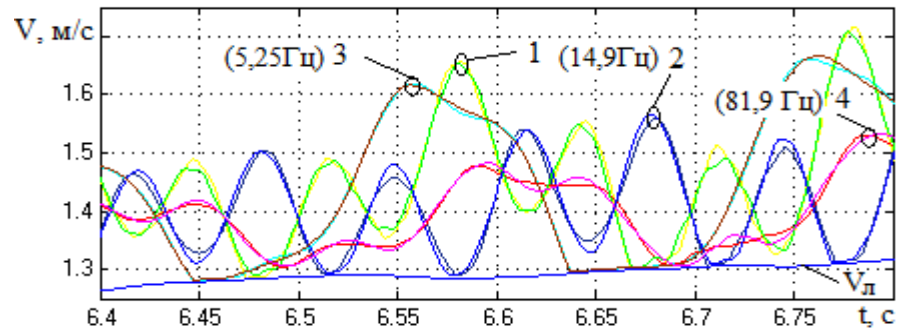
б)



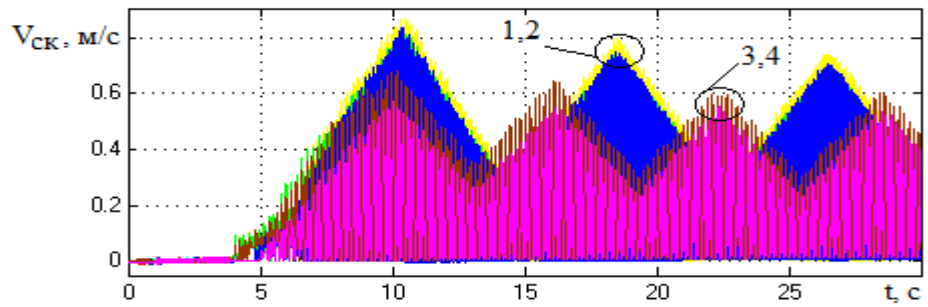
в)



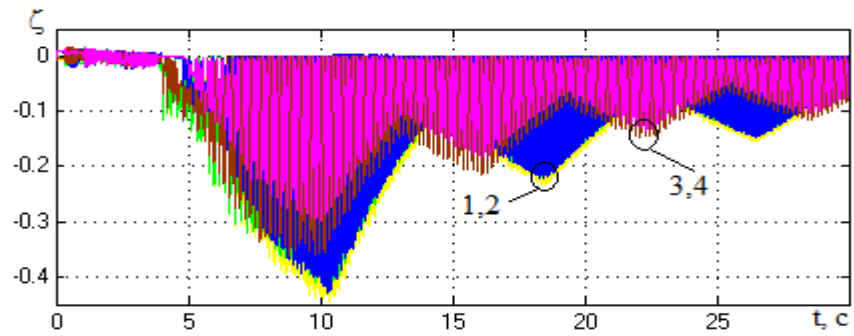
г)



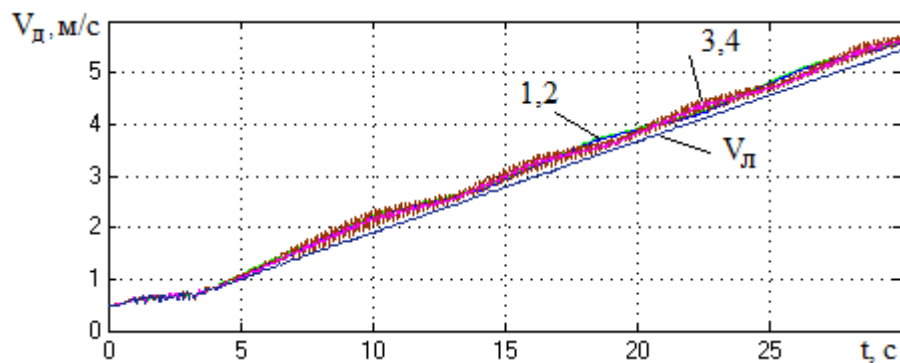
д)



е)



ж)



з)

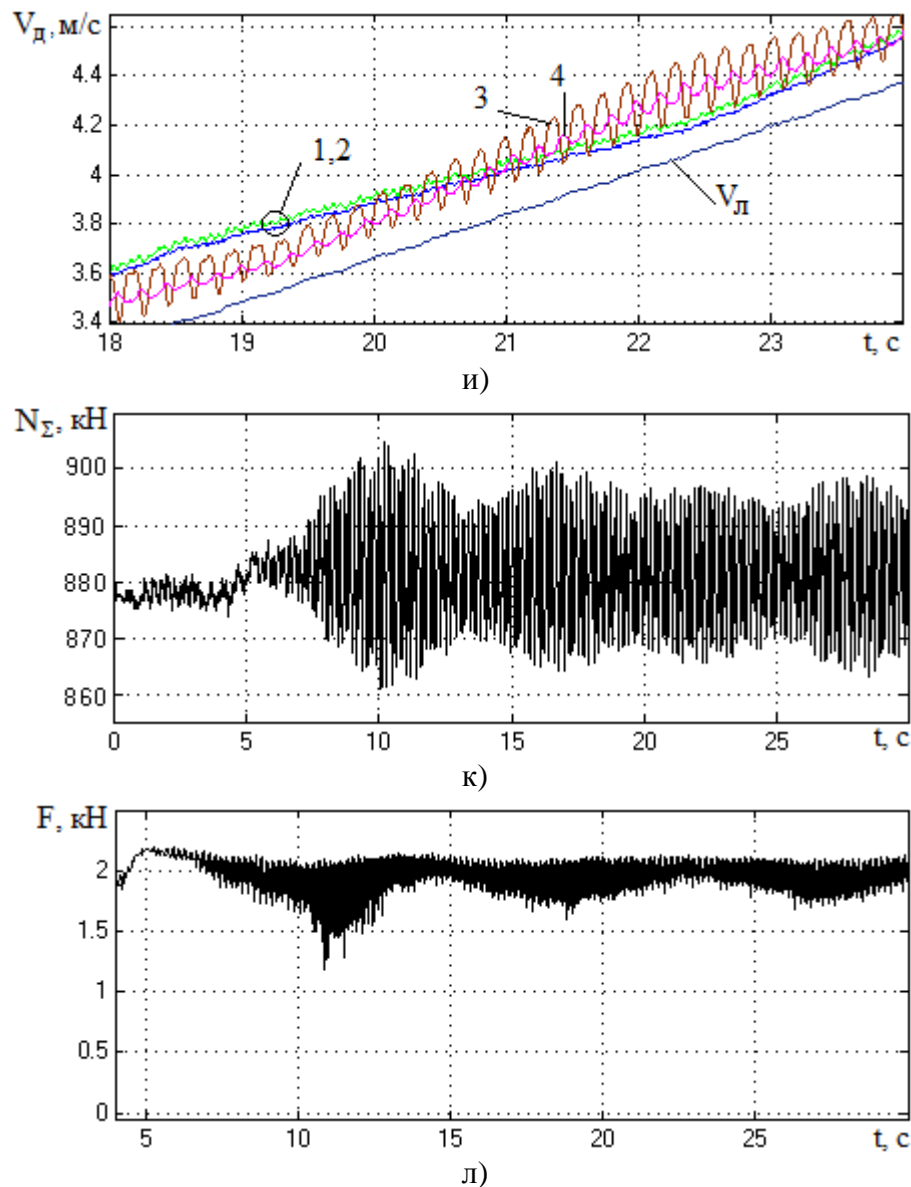


Рис. 4.11. Разгон локомотива с составом 1000 т на пределе по сцеплению,  $\psi_0 = 0,25$ , кривая сцепления с максимумом (в формуле О.Полаха:  $A=0,4$ ;  $B=0,6$ ,  $\epsilon_k=0,25$  м/с), скольжение колес регулируется в абсолютных единицах от 0,3 м/с до 0,1 м/с по скорости двигателей вторых осей тележек (АТД2 и АТД4 соответственно): а) задание на момент ( $M_{31}$ ) и моменты АТД1 ( $M_{д1}$ ), АТД2 ( $M_{д2}$ ) 1-й тележки; б) задание на момент ( $M_{32}$ ) и моменты АТД3 ( $M_{д3}$ ), АТД4 ( $M_{д4}$ ) 2-й тележки; в) вертикальные нагрузки колес осей 1-4; г) скорости локомотива ( $V_л$ ) и колес осей 1-4; д) скорости локомотива ( $V_л$ ) и колес осей 1-4 (увеличенный фрагмент); е) проскальзывание колес осей 1-4; ж) крип (относительное проскальзывание) колес осей 1-4; з) скорость локомотива ( $V_л$ ) и скорости роторов АТД 1-4, приведенные к скорости локомотива; и) увеличенный фрагмент графика «з»; к) суммарная вертикальная нагрузка ( $N_\Sigma$ ) всех осей локомотива (динамический сцепной вес); л) сила тяги локомотива

Результаты моделирования показывают возможность возникновения различных форм автоколебаний при движении на пределе по сцеплению и

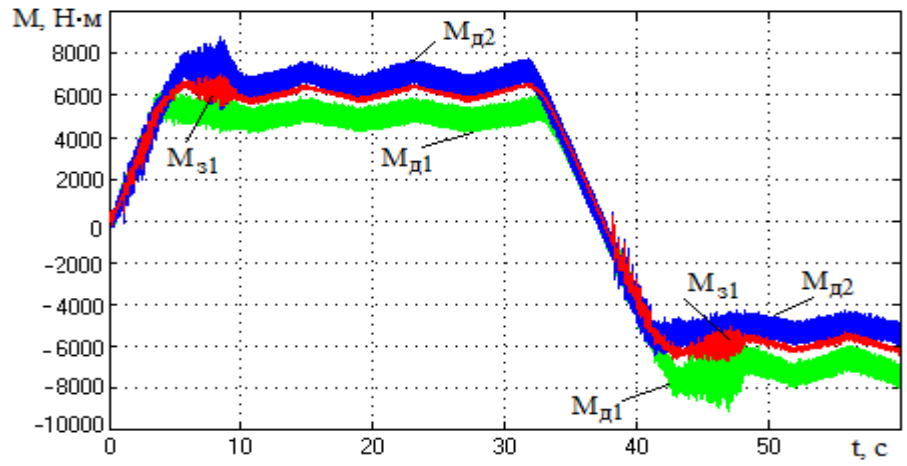
регулировании ТЭП в режиме тяги по скорости двигателя второй оси тележки, это было проиллюстрировано также на упрощённой модели (рис. 4.7). Расчёты с использованием детализированной модели механической подсистемы ТЭП ТЭМ9Н показывают (рис. 4.11е), что при регулировании ТЭП на пределе по сцеплению и достаточной крутизне падающего участка характеристики сцепления возможно возникновение релаксационных автоколебаний колес с частотой 5,25 Гц, а также квазигармонических автоколебаний с частотой 14,9 Гц и квазигармонических колебаний с узлом на оси колесной пары, имеющих резонансный максимум на частоте 81,9 Гц. Крип колес достигает в начале разгона 0,45 (рис. 4.11ж), что соответственно приводит к снижению силы тяги (рис. 4.11л).

Учет в модели ТЭП, кроме разброса параметров АТД, различия диаметров бандажей и условий сцепления колес ведёт при управлении по скорости двигателя второй оси тележки и неблагоприятном сочетании дополнительно учитываемых факторов к существенному увеличению фрикционных автоколебаний в тяговой передаче [102].

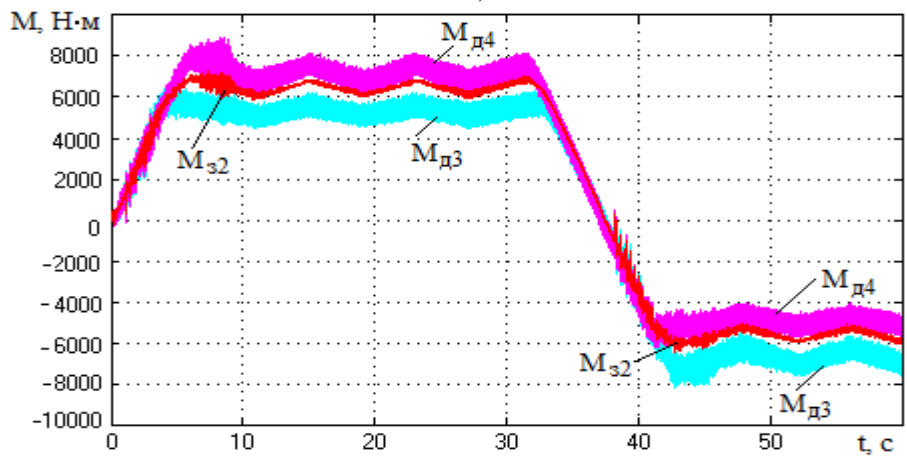
В то же время при управлении в процессе разгона по скорости двигателя первой оси тележки вибрации существенно снижаются, и качество регулирования улучшается. Как пример на рис. 4.12 приведены результаты моделирования разгона и торможения ТЭП ТЭМ9Н на пределе по сцеплению, - в режиме тяги управление ведётся по скорости двигателей первых осей тележек (АТД1 и АТД3), а в режиме торможения - по скорости двигателей вторых осей тележек (АТД2 и АТД4). Это обусловлено тем, что в режиме тяги разгружаются первые оси тележек (1 и 3), а вторые – нагружаются (2 и 4), а в режиме торможения наоборот: нагружаются первые оси тележек (1 и 3), а вторые разгружаются (рис. 4.12в). Таким образом, системой управления на предел по сцеплению и в режиме тяги, и в режиме торможения выводится двигатель наименее нагруженной оси, что способствует уменьшению автоколебаний, но исключить их полностью не удаётся (рис. 4.12г) при наличии па-



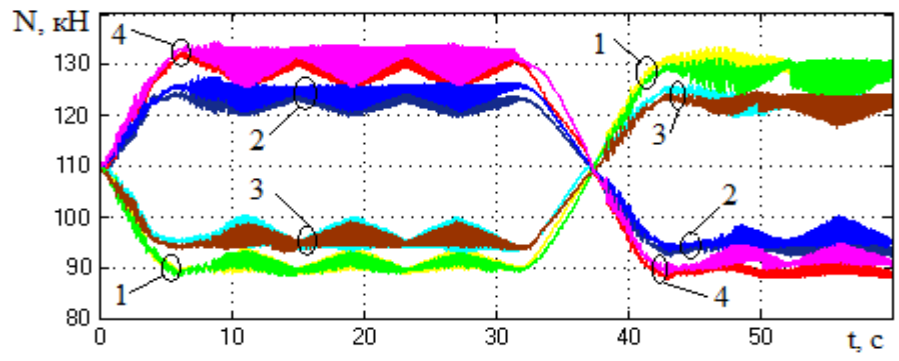
дающего участка на характеристике сцепления.



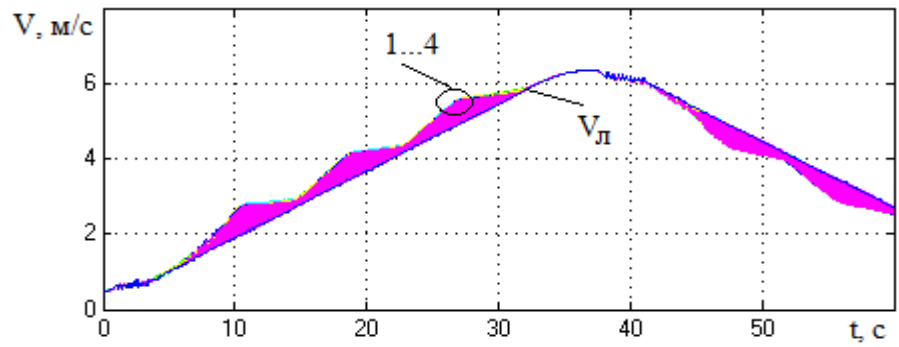
а)



б)



в)



г)

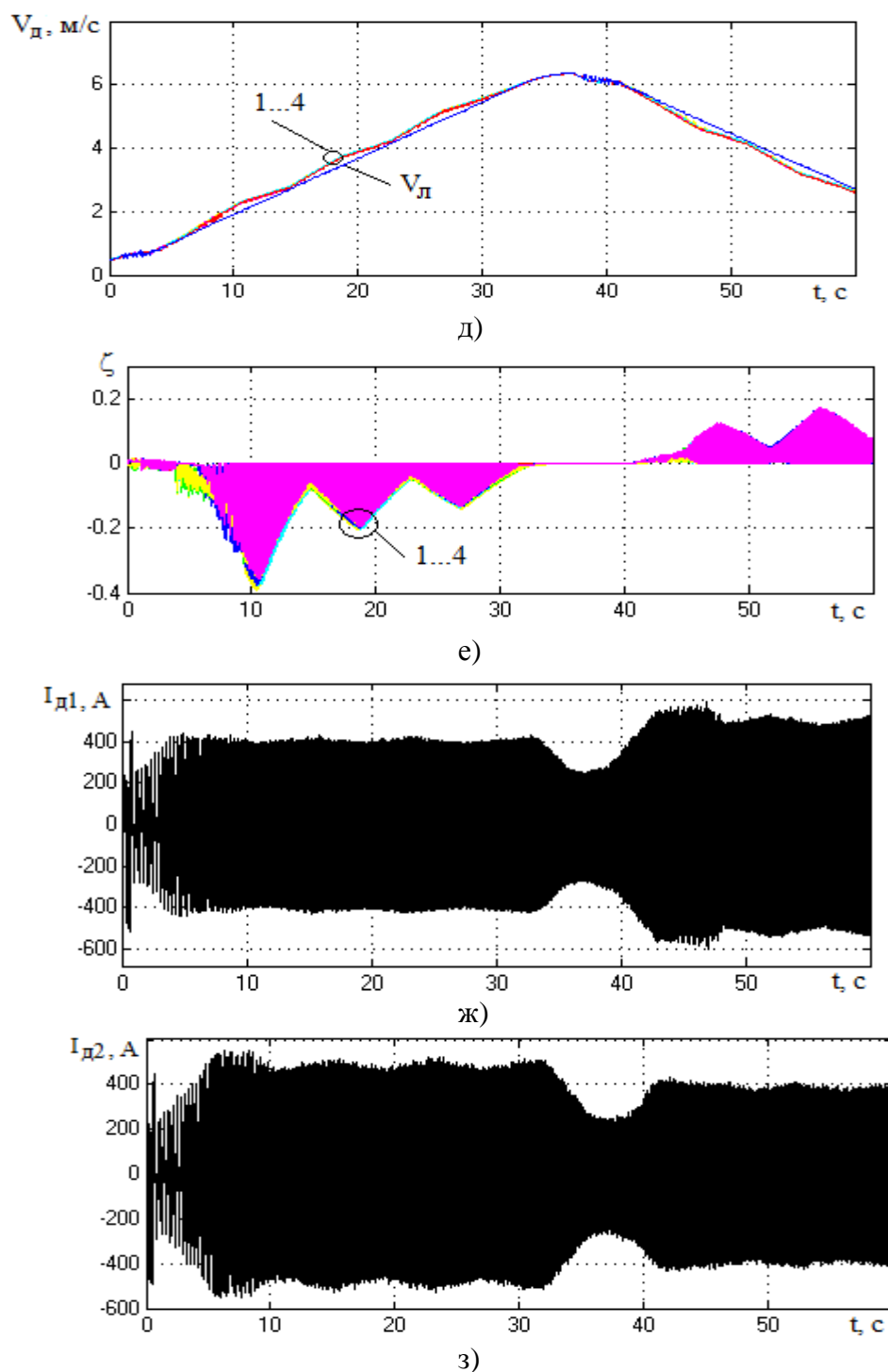


Рис. 4.12. Результаты моделирования разгона и торможения локомотива с составом 1000 т на пределе по сцеплению,  $\psi_0 = 0,25$ , кривая сцепления с максимумом (в формуле О.Полаха:  $A=0,4$ ;  $B=0,6$ ,  $\varepsilon_k=0,25$  м/с), скольжение колес регулируется в абсолютных единицах от 0,3 м/с до 0,1 м/с в режиме тяги по скорости двигателей первых осей тележек (АТД1 и АТД3 соответственно), в режиме торможения по скорости двигателей вторых осей тележек (АТД2 и АТД4 соответственно): а) задание на момент ( $M_{31}$ ) и моменты АТД1 ( $M_{д1}$ ), АТД2 ( $M_{д2}$ ) 1-й тележки; б) задание на момент ( $M_{32}$ ) и моменты АТД3 ( $M_{д3}$ ), АТД4 ( $M_{д4}$ ) 2-й тележки; в) вертикальные нагрузки колес осей 1-4; г) скорости локомотива ( $V_{л}$ ) и колес осей 1-4; д) скорость локомотива ( $V_{л}$ ) и скорости роторов АТД 1-4, приведенные к скорости локомотива; е) крип (относительное проскальзывание) колес осей 1-4; ж) фазный ток АТД1; з) фазный ток АТД4

Двигатели осей с большей вертикальной нагрузкой вращаются медленнее (с повышенным скольжением АТД), при этом реализуют большой электромагнитный момент и нагружаются большим током (рис. 4.12ж,з).

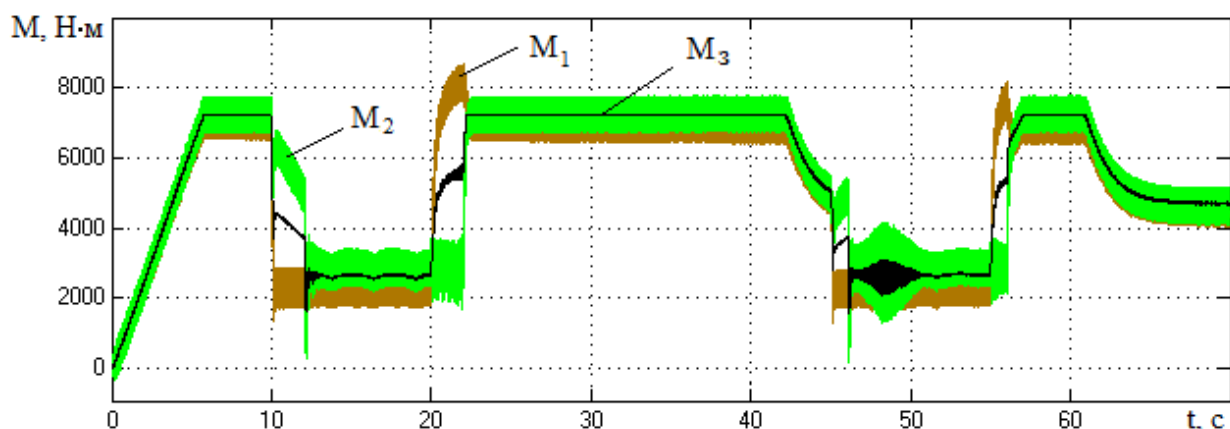
Чем лучше условия сцепления, тем выше реализуемые электромагнитные моменты, что усиливает неравномерность распределения вертикальных нагрузок осей. Исследования показывают, что оси тележек тепловоза ТЭМ9Н, вращаемые параллельно подключенными к АИН двигателями, по нагрузкам очень существенно различаются, – до 10,8 Т при реализации потенциального коэффициента сцепления  $\psi_0 = 0,4$ , усреднённые вращающие моменты АТД (моменты задания  $M_{31}$ ,  $M_{32}$ ) при этом близки к номинальным, неравномерность токовой нагрузки двигателей достигает 30 %. Моделирование показывает, что разброс активных сопротивлений обмоток статора и ротора параллельно работающих АТД до 15 % при правильном определении параметров усреднённой модели АТД не снижает качества регулирования.

В целом предлагаемый алгоритм позволяет обеспечить использование потенциальных условий сцепления не менее чем на 90 % в диапазоне изменения потенциального коэффициента сцепления от 0,4 до 0,1.

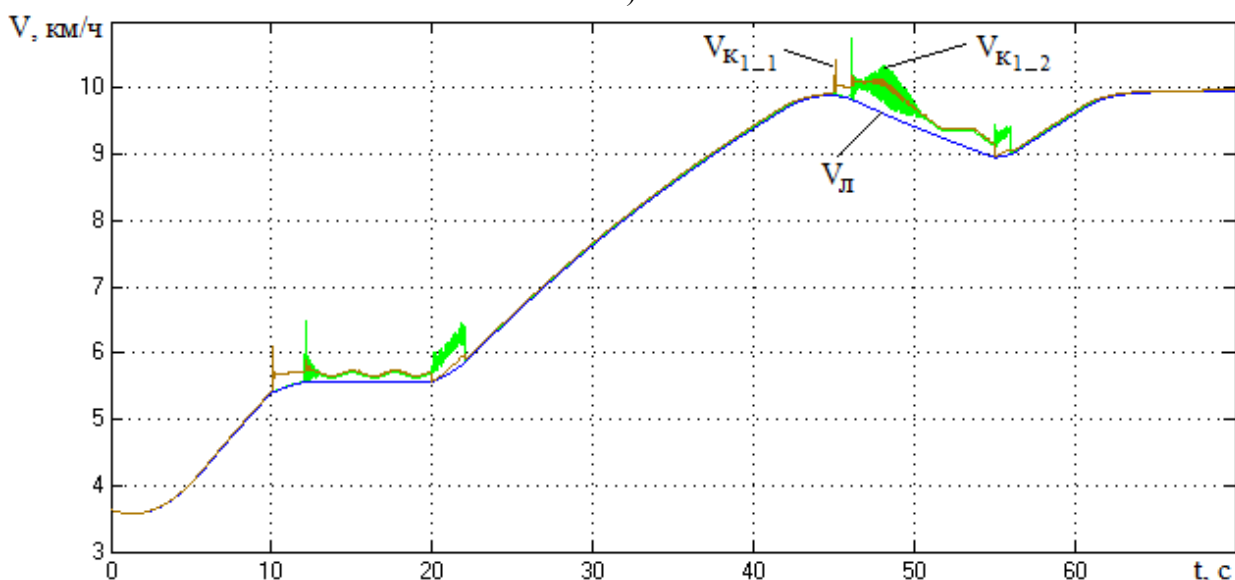
Исследовалась также работа СУ ТЭП при наезде на масляное пятно. На рис. 4.13 в качестве примера представлены результаты моделирования режима разгона тепловоза ТЭМ9Н с составом 1000 т на подъеме с увеличивающимся уклоном, результаты приведены для первой тележки. На подъеме смоделировано два масляных пятна, в пределах которых потенциальный коэффициент сцепления снижается с  $\psi_0 = 0,35$  до  $\psi_0 = 0,15$ . В данном режиме контроллером машиниста установлена требуемая скорость локомотива 10 км/ч и максимальная сила тяги, которой соответствует ограничение по моменту АТД на уровне 7200 Н·м.

В процессе разгона тепловоза (рис. 4.13) задание на электромагнитный момент ( $M_3$ ) увеличивается, а затем ограничивается на уровне 7200 Н·м (рис. 4.13,а). Этот уровень ограничения меньше момента, предельного по сцепле-

нию. Тепловоз продолжает разгон (рис. 4.13,б) с запасом по сцеплению до наезда на первое масляное пятно. Оси тележки наезжают на масляное пятно поочередно. При этом происходит увеличение скорости АТД1, связанного с первой колёсной парой, увеличивается ее рассогласование с заданием скорости, и РЧВ (рис. 2.3) снижает задание на момент (рис. 4.13,а), ТЭП регулируется на пределе по сцеплению, но скорость тепловоза не увеличивается, так как сила тяги в данном случае равна силе сопротивления движению (так подобраны параметры).



а)



б)

Рис. 4.13 Результаты моделирования разгона тепловоза с составом 1000 т на подъеме с увеличивающимся уклоном при задании на максимальный момент 7200 Н м, задании на скорость 10 км/ч и двукратном наезде тепловоза в процессе разгона на масляное пятно: а) задание на электромагнитный момент ( $M_3$ ) и расчетные электромагнитные моменты АТД первой ( $M_1$ ) и второй ( $M_2$ ) осей; б) скорости первого (ближайшего к редуктору) колеса первой оси ( $V_{к1_1}$ ), первого колеса второй оси ( $V_{к1_2}$ ) и локомотива ( $V_{л}$ );

После окончания первого масляного пятна оси тележки поочередно съезжают с него, момент  $M_3$  и моменты АТД увеличиваются, и тепловоз продолжает разгоняться с запасом по сцеплению до наезда на второе масляное пятно. Здесь РЧВ опять снижает задание на момент, и ТЭП реализует предельные тяговые усилия, но скорость локомотива при этом снижается, так как уклон увеличился, и сила сопротивления движению стала больше силы тяги. На этом участке возникают колебания электромагнитного момента АТД2 (рис. 4.13а) и скорости колес второй оси, так как при увеличении скольжения возникают фрикционные автоколебания, а регулирование скорости ведется по частоте вращения первого двигателя тележки (рис. 2.3). Но при правильных настройках СУ возникшие колебания не приводят к существенному увеличению динамических нагрузок и быстро затухают. После окончания второго масляного пятна тепловоз продолжает разгон с ограничением  $M_3$  на уровне 7200 Н·м до достижения заданной КМ скорости 10 км/ч. После этого электромагнитный момент снижается и становится равным моменту сопротивления движению (обусловленному силой сопротивления движению) [103].

Таким образом, предложенная система управления плавно выводит ТЭП на предел по сцеплению в процессе разгона и, обладая высоким быстродействием и точностью, даже в случае резкого изменения условий сцепления, обеспечивает реализацию предельных усилий при совместном регулировании асинхронных двигателей тележки [103].

#### **4.4. Выводы по разделу 4**

1. Созданы комплексные электромеханические компьютерные модели ТЭП гибридного тепловоза ТЭМ9Н с упрощённой механической частью – в ПК MatLab/Simulink; с детализированной механической подсистемой – на основе совмещения ПК MatLab/Simulink и «Универсальный механизм» с

применением интерфейса CoSimulation.

2. При регулировании ТЭП ТЭМ9Н на пределе по сцеплению по скорости АТД наиболее нагруженной оси тележки и достаточной крутизне падающего участка характеристики сцепления возможно возникновение релаксационных автоколебаний колес с частотой 5,25Гц, а также квазигармонических автоколебаний с частотой 14,9 Гц и квазигармонических колебаний с узлом на оси колесной пары, имеющих резонансный максимум на частоте 81,9 Гц.

3. Для предотвращения релаксационных автоколебаний ТЭП при реализации предельных усилий следует выводить на предел по сцеплению асинхронный тяговый двигатель оси с меньшей вертикальной нагрузкой: АТД первой оси тележки в режиме тяги и АТД второй оси в режиме торможения.

4. Определен характер изменения вертикальных нагрузок осей гибридного локомотива, вызванного работой АТД в режимах тяги и электрического торможения. При реализации потенциального коэффициента сцепления 0,4, разница вертикальных нагрузок первой и второй осей тележек составляет в среднем 10,8 Т, что приводит к неравномерности токовых нагрузок двигателей до 30 %.

5. Предлагаемый алгоритм позволяет частично скомпенсировать неравномерность вертикальных нагрузок осей и обеспечить использование потенциальных условий сцепления не менее чем на 90 % в диапазоне изменения потенциального коэффициента сцепления от 0,4 до 0,1.

6. При разбросе сопротивлений параллельно работающих АТД в диапазоне до 15 % и правильном определении среднего для двух АТД значения каждого параметра (правильности параметров усредненной модели) система сохраняет работоспособность и устойчивость.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы:

1. Выполнена классификация алгоритмов управления ТЭП в режиме реализации предельных по сцеплению усилий и обосновано применение системы разрывного управления при совместном регулировании АТД.
2. Предложен способ управления ТЭП с реализацией предельных по сцеплению усилий асинхронными тяговыми двигателями, подключенными параллельно к одному инвертору.
3. Разработана функциональная схема и алгоритмы работы СУ ТЭП гибридного маневрового тепловоза с совместным регулированием асинхронных двигателей тележки на пределе по сцеплению колес с рельсами.
4. Разработаны математические и компьютерные модели электрической подсистемы ТЭП с совместным разрывным управлением АТД тележки в режиме реализации предельных усилий.
5. Разработаны математические и компьютерные модели механической части (подсистемы) ТЭП гибридного маневрового тепловоза ТЭМ9Н с опорно-осевым подвешиванием АТД и упругим зубчатым колесом редуктора, выполненные с различной степенью детализации в ПК MatLab/Simulink и «Универсальный механизм».
6. Созданы комплексные электромеханические компьютерные модели ТЭП ТЭМ9Н на основе совмещения ПК MatLab/Simulink и «Универсальный механизм» с применением интерфейса CoSimulation.
7. На основе моделирования установлено, что при регулировании ТЭП ТЭМ9Н на пределе по сцеплению и достаточной крутизне падающего участка характеристики сцепления возможно возникновение релаксационных автоколебаний колес с частотой 5,25 Гц, а также квазигармонических автоколебаний с частотой 14,9 Гц и квазигармонических колебаний с узлом на оси колесной пары, имеющих резонансный максимум на частоте 81,9 Гц.
8. Для предотвращения релаксационных автоколебаний ТЭП при ре-

лизации предельных усилий следует выводить на предел по сцеплению асинхронный тяговый двигатель оси с меньшей вертикальной нагрузкой: АТД первой оси тележки в режиме тяги и АТД второй оси в режиме торможения.

9. Определен характер изменения вертикальных нагрузок осей гибридного локомотива, вызванного работой АТД в режимах тяги и электрического торможения. При реализации потенциального коэффициента сцепления 0,4, разница вертикальных нагрузок первой и второй осей тележек составляет в среднем 10,8 Т, что приводит к неравномерности токовых нагрузок двигателей до 30 %.

10. При разбросе сопротивлений параллельно работающих АТД в диапазоне до 15 % и правильном определении среднего для двух АТД значения каждого параметра (правильности параметров усредненной модели) система сохраняет работоспособность.

11. Предложенные алгоритмы регулирования тягового электропривода позволяют частично скомпенсировать неравномерность распределения вертикальных нагрузок осей, вызываемую работой АТД, и обеспечить использование потенциальных условий сцепления не менее чем на 90 % в режиме реализации предельных усилий при изменении потенциального коэффициента сцепления в диапазоне от 0,4 до 0,1.

12. С применением основных элементов моделей, разработанных для гибридного тепловоза, можно на стадии проектирования производить проверку различных алгоритмов реализации тяговым электроприводом локомотивов с совместным регулированием АТД тележки предельных усилий.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Розенфельд, В.Е. Тиристорное управление электрическим подвижным составом постоянного тока/Под. Ред. В.Е. Розенфельда. – М.: Транспорт, 1970. - 280 с.
4. Тулупов В.Д. Автоматическое регулирование сил тяги и торможения электроподвижного состава. – М.: Транспорт, 1978. – 368 с.
5. Ротанов Н.А. Проектирование систем управления электроподвижным составом/Под ред. Н.А. Ротанова. – М.: Тпанспорт, 1986, -328 с.
6. 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.
7. Степанов А.Д., Андерс В.И., Пречисский В.А., Гусевский Ю.И. Электрические передачи переменного тока тепловозов и газотурбовозов. - М: Транспорт, 1982.- 254 с.
8. Савоськин А.Н., Баранов Л.А., Плакс А.В., Феоктистов В.П. Автоматизация электроподвижного состава; Под. Ред. А.Н. Савоськина. – М.: Транспорт, 1990. – 311 с.
9. Стрекопытов В.В. Грищенко А.В., Кручек В.А. Электрические передачи локомотивов. – М: Маршрут, 2003. – 310 с.
10. 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.
12. Будницкий А.А., Перегудов Ю.М., Сергеев В.Л., Варегин Ю.А. Исследование электрических передач. Схемные решения, улучшающие тяговые показатели тепловоза с электрической передачей// Труды ВНИТИ, 1977, Выпуск 45. – С. 16-21.
  13. Шаров В.А. Исследование электромагнитных переходных процессов в силовых цепях асинхронного тягового привода электрического локомотива: Дис. ... канд. техн. наук.- М: МИИТ, 1981. – 180 с.
  14. Вилькевич Б.И. Автоматическое управление электрической передачей и электрические схемы тепловозов/ Б.И. Вилькевич – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
  15. Лисунов. В.Н. Использование сил взаимодействия движущих колес с рельсами в режимах тяги и торможения. - Омск: Омская гос. акад. Путей сообщения, 1994. – 87 с.
  16. Бурков А.Т. Управление электроэнергетическими процессами локомотивов с асинхронным приводом: Дис. ... д-ра техн. наук.- Л., 1982.- 470 с.
  17. Бурков А.Т., Пармас Я.Ю. Применение асинхронных двигателей в тяговом приводе локомотивов //Полупроводниковая техника в устройствах электрических железных дорог: Межвуз. сб. тр. - Л., 1983.- С. 7 - 17.
  18. Литовченко В.В. Внедрение асинхронного привода на тяговом подвижном составе// Железнодорожный транспорт. ОИ/ЦНИИТИ МПС. - 1988. - Вып. 1. - С. 1-36.
  19. 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.
  20. Иньков Ю.М., Федяева Г.А., Феоктистов В.П. Системы управления для электроприводов с асинхронными тяговыми двигателями// Электротехника.– 2009. - № 4. - С. 31-35.

- 21.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.
- 22.Фаминский Г.В. Автоматические системы для повышения сцепления колес локомотива с рельсами//Тр. ВНИИЖТ. Вып. 396. – М.: Трансжелдориздат.- 1974. – 135 с.
- 23.Клименко Ю.И. Раздельное регулирование тягового усилия обмоторенных осей тепловоз//Сб. научных трудов. – Санкт-Петербург: Из-во ПГУПС, 2003.- С. 86-91.
- 24.Киржнер Д.Л., Клименко Ю.И., Кулабухов А.С., Путинцев С.В. Тепловоз с высоким коэффициентом тяги// Труды ВНИТИ. – Коломна, 2004.- Выпуск 83. – С. 15 – 24.
- 25.Клименко Ю.И. Исследование электропривода с изменяемой жесткостью тяговой характеристики: Дис. ... канд. техн. наук.- Коломна: ВНИКТИ, 2004. – 171 с.
- 26.Федяев В.Н. Влияние электрической и механической подсистем магистрального тепловоза на реализацию предельных тяговых усилий: Дис. ... канд. техн. наук. – Брянск: БГТУ, 2006. – 129 с.
- 27.Федяева Г.А. Моделирование динамики пуска и электрического торможения асинхронного тягового привода со скалярным управлением при ухудшении условий сцепления// Вестник ВНИИЖТ.- 2006.- № 5.- С. 26-31.
- 28.Колпахчян П.Г. Адаптивное управление асинхронным тяговым приводом магистральных электровозов. – Ростов н/Д: Изд-во журн. «Изв. вузов. Сев. Кавк. регион, 2006. – 131 с.
- 29.Колпахчян П.Г. Методология комплексного моделирования и способы управления асинхронным тяговым приводом магистральных электровозов: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Новочеркасск: НГТУ, 2006.– 36 с.

30. Колпахчян П.Г. Управление двумя асинхронными тяговыми двигателями при питании от одного инвертора // Изв. вузов. Электромеханика. - 2006, - № 2, - С. 45- 51.
31. 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.
32. 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.
33. Осинковский О.А. Результаты натурных испытаний микропроцессорной системы предупреждения буксования колесных пар магистральных тепловозов // Вест. Восточноукр. нац. ун-та. Технические науки. Ч. 2. – Луганск: Изд-во ВНУ, 2006.- № 8. - С. 25-31.
34. Осинковский О.А. Улучшение тягово-сцепных и эксплуатационных качеств тепловозов за счет совершенствования их противобуксовочных систем Автореф. дис. ... канд. техн. наук.- Луганск: ВНУ, 2007. – 22 с.
35. Мейер Б. Локомотивы с высокими тягово-сцепными свойствами и регулируемым крипом // Железные дороги мира, 1989, № 5. – С. 33-37.
36. Петров П.Ю. Быстродействующая система управления тяговым электроприводом для улучшения сцепных свойств электроподвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.- М: МИИТ, 1998. – 19 с.
37. Универсальные тепловозы нового поколения Blue Tiger // Железные дороги мира (по материалам фирм Adtranz и General Electric. – 1998. – №9. – С.36–41.
38. Бауэр Х.-П. и др. Оптимальное использование сцепления на электровозе с трехфазным тяговым приводом // Железные дороги мира. - 1987. - № 8. -

С. 10 - 24.

- 39.Энгель Б. Регулирование тяги с высоким использованием сил сцепления// Железные дороги мира. - 1999.- № 2.- С. 39-45.
- 40.Шварц Х. Е. Регулирование проскальзываний в контакте колесо-рельс моторных вагонов трамвая// Железные дороги мира. - 2001. - № 6. - С. 50-56.
41. Buscher M. Регулирование проскальзывания колес на электровозах с асинхронным тяговым приводом// Железные дороги мира. - 1994.- № 4.- С. 30-45.
42. M. Fleischer Modal State Control in the Frequency Domain for Active Damping of Mechanical Vibrations in Traction Drive-Trains, AMC 2004- Kawasaki, Japan// 0-7803-8300-1/04/\$20.00 © 2004 IEEE.
- 43.Литовченко В.В., Шаров В.А., Петров П.Ю. Быстродействие тягового электропривода – резерв повышения тяговых свойств локомотивов// Материалы IV Междунар. научно-техн. конф., посв. 100-летию Моск. гос. ун-та путей сообщ. (МИИТ) «Проблемы развития локомотивостроения», Москва 28-31 октября 1996. – С. 81.
44. Литовченко В.В., Шаров В.А., Петров П.Ю. Высокодинамичный асинхронный тяговый электропривод// Тез. докл. II Междунар. конф. 4 - 6 июня 1997 г. – Новочеркасск.- 1997. - С. 42 - 44.
- 45.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.
- 46.Федяева Г.А. Моделирование магистрального тепловоза с асинхронным тяговым приводом// Железные дороги мира, 2007. - № 9. - С. 59-67.
- 47.Федяева Г.А. Реализация предельных тяговых усилий перспективными тепловозами с асинхронным тяговым приводом// Вестник ВНИИЖТ.- 2007.- № 5.- С. 29-34.
- 48.Матюшков С.Ю. Снижение автоколебаний в тяговой передаче грузового

- магистрального тепловоза при индивидуальном управлении асинхронными электродвигателями: Дис. ... канд. техн. наук.- Брянск: БГТУ, 2013. – 19 с.
49. Johnson K.L. Tangential Traction and Microslip in Rolling Contact Phenomena. - Amsterdam: Ed. by Bidwell Elsevier publishing Company, 1962. - P. 6-28.
50. Kalker J.J. Survey of wheel-rail contact theory/ Veh. Syst. Dyn.- 1979.- № 5.- P. 317-358.
51. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. -М.: Наука, 2001.- 478 с.
52. Исаев И.П. Случайные факторы и коэффициент сцепления. - М.: Транспорт, 1970. - 184 с.
53. Исаев И.П., Лужнов Ю.М. Проблемы сцепления колес локомотива с рельсами. - М.: Машиностроение, 1985. - 238 с.
54. 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.
55. Меншутин Н.Н. Исследование скольжения колесной пары электровоза при реализации силы тяги в эксплуатационных условиях // Науч. труды Всесоюз. н.-и. ин-та ж.-д. транспорта. - М.: Трансжелдориздат, 1960. - Вып. 188. - С. 113-132.
56. Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicle running on adhesion limit. Wear 258 (2005) 992–1000.
57. Кёрнер О. Сравнение концепций механической части трехфазного тягового привода// Железные дороги мира. - 2005. - № 9. - С. 31 - 41.
58. Бирюков И.В. Беляев А.И., Рыбников Е.К. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог. - М.: Транспорт, 1986.- 256 с.
59. Павленко, А.П. Динамика тяговых приводов магистральных локомотивов/А.П. Павленко. - М.: Машиностроение, 1991. - 192 с.
60. Павленко А.П., Клипаков Н.В. О влиянии электромагнитных процессов в

- цепях тяговых электродвигателей на развитие фрикционных автоколебаний в тяговых приводах и экипажной части локомотивов при буксовании// Вестник Восточноукр. нац. ун-та. Технические науки. Ч. 1. – Луганск: Изд-во ВНУ.- 2007 - № 8.- С. 73-79.
- 61.Павленко А.П., Клипаков Н.В. Прогнозирование развития фрикционных автоколебаний в произвольных конструкциях тяговых приводов при буксовании// Вестник Восточноукр. нац. ун-та. Технические науки. Ч. 1. – Луганск: Изд-во ВНУ, 2005 - № 8.- С. 66-70.
- 62.Павленко, А.П., Клипаков Н.В. Прогнозирование характера динамических процессов и оценка динамической нагруженности элементов тягового привода и экипажной части локомотивов при буксовании// Вестник Восточноукр. нац. ун-та. Технические науки. Ч. 1. – Луганск: Изд-во ВНУ, 2006 - № 8.- С. 84-91.
- 63.Погорелов Д.Ю., Симонов В.А. Проверка возможности развития опасных режимов при буксовании электровоза ЭП2К методом компьютерного моделирования // Вест. Восточноукр. нац. ун-та.– 2011.– №4.– Ч. 2.– С. 7-10.
- 64.Антипин Д.Я., Воробьёв В.И., Измеров О.В., Корчагин В.О., Космодамианский А.С. Проблемы снижения уровня фрикционных автоколебаний в тяговых приводах рельсового подвижного состава. – Брянск: БГТУ, 2017. – 188 с.
- 65.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.
- 66.Ключев, В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
- 67.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.

68. Филонов, С.П. Тепловоз 2ТЭ116/С.П. Филонов, А.И. Гибалов, Е.А. Никитин и др. – М.: Транспорт, 1996. -334 с.
69. Орлов Ю.А. Управление тяговыми двигателями независимого возбуждения на электроподвижном составе переменного тока. Автореф. дис. ... канд. техн. наук.- Новочеркасск: ЮРГТУ[НПИ], 2010. – 19 с.
70. Козаченко В.Ф., Остриров В.Н., Лашкевич М.М. Электротрансмиссия на базе вентильно-индукторного двигателя с независимым возбуждением//Электротехника.– 2014. - № 2. - С. 54-60.
71. Гусевский Ю.И., Носков В.И., Тараненко А.И. и др. Система автоматического регулирования электропередачи тепловоза с выпрямительно-инверторным преобразователем частоты и тяговыми асинхронными короткозамкнутыми двигателями//Тяговое и подъемно-транспортное электрооборудование. – М: Информэлектро, 1974, вып. 1. – С. 14-15.
72. Бахвалов Ю.А., Бузало Г.А., Зарифьян А.А, Петров П.Ю. и др. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровазов/под ред. А.А. Зарифьяна.- М.: Маршрут, 2006. – 374 с.
73. Бахвалов Ю.А., Зарифьян А.А., Кашников В.Н., Колпахчян П.Г., Плохов Е.М., Янов В.П. Моделирование электромеханической системы электровазов с асинхронным тяговым приводом/ Под. ред. Е.М. Плохова.- М.: Транспорт, 2001.- 286 с.
74. Рунге В. Современная силовая электроника в системах тяговых преобразователей// Железные дороги мира. - 2006. - № 4. - С. 28 - 40.
75. Люттин Т., Покровский С.В. Унифицированные многосистемные преобразователи нового поколения для электровазов с асинхронными тяговыми двигателями// Железные дороги мира. - 2005. - № 5. - С. 31 - 38.
76. Лувишис А.Л. Применение силовых биполярных транзисторов с изолированным затвором (ИГБТ) в преобразователях зарубежного тягового подвижного состава // Железнодорожный транспорт. ОИ/ЦНИИТИ МПС -



1999. - Вып. 1-2. - С. 1 - 59.
77. Бандура Г., Пастухов В. Российские IGBT-модули производства ОАО «Контур» // Силовая электроника. – 2007. – № 1. – С. 28 – 31.
78. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die TRANS-VEKTOR-Regelung von Drehfeldmaschinen// Siemens-Z. – 1971. – Bd.45.-H. 10. – S. 757-760.
79. Bocker Joachim, Mathapati Shashidhar. State of the art of induction motor control / Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International, Publication Date: 3-5 May 2007 Volume: 2, on page(s): 1459-1464.
80. Tripathi A., Anbarasu R.S., Somakumar R. Control of AC Motor Drives: Performance Evaluation of Industrial State of Art and New Technique / Industrial Technology, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on Publication Date: 15-17 Dec. 2006. On page(s): 3049-3054.
81. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ИГЭУ, 2008. – 298 с.
82. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями/: СПбГУ ИТМО, 2006, – 94 с.
83. Depenbrock M. Direkte Selbstregelung (DSR) für hochdynamische Drehfeldantriebe mit Stromrichterspeisung, etzArchiv, Bd. 7.- 1985.- Heft 7.- S. 211-218.
84. Takahashi L., Noguchi T. A new quick response and high efficiency control strategy of an induction motor, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-22, no. 5, Sep/Oct 1986.- P. 820-827.
85. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Системы прямого управления моментом в частотно-регулируемых электроприводах переменного тока/под ред. Народицкого А.Г.– СПб.: Санкт-Петербургская электротехническая компания, 2005. – 100 с.
86. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов, Санкт-Петербургская электротехническая компания, 2004 г, - 128с.

87. Синюкова Т.В. Системы частотного асинхронного электропривода с корректирующими элементами и прямым управлением моментом. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - СПб., 2015. - 19 с.
88. Технический проект на тяговое и вспомогательное оборудование магистрального тепловоза 2ТЭ25А с асинхронными тяговыми двигателями 2ТЭ25А.000.00.000ПЗ. Разраб. ВНИТИ. - Коломна, 2004 г. – 352 с.
89. Аникин А.С. Система управления многодвигательным асинхронным электроприводом с частотным регулированием самоходного вагона: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Челябинск, 2012. - 19 с.
90. Бабков Ю.В., Перфильев К.С., Бурцев Г.В., Алексеев С.Н. Тяговый статический преобразователь частоты для перспективных тепловозов с асинхронными двигателями//Инженер и промышленник сегодня.-2013.-№ 5.
91. Сорин Л.Н., Бондарев А.Л., Зарифьян А.А., Колпахчян П.Г., Янов В.П. Математическое моделирование режима трогания с места электровоза с асинхронными тяговыми двигателями// Вест. Восточноукр. нац. ун-та. Технические науки ч. 2. – Луганск: Изд-во ВНУ, 2002. - № 6(52).- С. 26-30.
92. Абросимов А.С. Разработка и исследование векторных систем управления асинхронными электроприводами с автономными инверторами тока с релейным регулированием. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Липецк: ЛГТУ, 2015. - 18 с.
93. Технический проект на тяговое и вспомогательное оборудование модернизированного тепловоза ТЭМ2 с асинхронными тяговыми двигателями 27.Т.098.00.00.000ПЗ. Разраб. ВНИТИ. - Коломна, 1997. - 415с.
94. Перфильев К.С., Весновский И.В. Система векторного управления тяговым электроприводом с непосредственным регулированием момента и потокосцепления//Труды ВНИКТИ.-2002.-№ 41.- С.250-251.
95. Зарифьян А.А., Петров П.Ю., Фроянц Г.С., Явна Д.В. Автономное бортовое устройство для определения положения и скорости рельсового экипажа// Вест. Восточноукр. нац. ун-та. Технические науки ч. 2. – Лу-

- ганск: Изд-во ВНУ/- 2007. - № 8(114).- С. 139-143.
- 96.«Первая локомотивная компания» - современное локомотивостроительное предприятие//Евразия-Вести. – 2015.- № XI - <http://www.eav.ru/publ1.php?publid=2015-11a16>.
- 97.Устенко А.В., Пасько О.В. Тенденции развития тяговых двигателей подвижного состава//Электротехника и электромеханика (Киев). – 2013. - № 1.- С 65-68.
- 98.Герман-Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. Matlab 6.0.- Санкт-Петербург: Корона принт, 2001.-320 с.
- 99.Доцковский Л.Х., Роговой В.И. и др. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор)// Электротехника. – 1996.- № 10. – С. 17-22.
100. Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Ковалев Р.В., Смородова Т.В. Управление тягой и торможением гибридного маневрового тепловоза с асинхронными тяговыми двигателями// Вестник Брянского гос. техн. ун-та. – 2014. – № 3. – С. 87-91.
101. Федяева Г.А., Тарасов А.Н. Ковалев Р.В., Михальченко Г.С. Динамические процессы при совместном регулировании асинхронных тяговых двигателей тележки тепловоза// Вестник Брянского гос. техн. ун-та. – 2014. – № 4. – С. – 129-132.
102. Иньков Ю.М., Федяева Г.А., Тарасов А.Н. Управление тяговым электроприводом гибридного маневрового тепловоза с асинхронными двигателями в режиме реализации предельных усилий// Электротехника.- 2016. - № 9. - С. 38-43.
103. Федяева Г.А., Иньков Ю.М., Тарасов А.Н., Конохов Д.В. Совершенствование системы управления тягового электропривода гибридного маневрового тепловоза// Электроника и электрооборудование транспорта.- 2017. - № 1. - С. 30 - 36.
104. Система регулирования асинхронного тягового электропривода локо-

- мотива на пределе по сцеплению колес с рельсами. Патент РФ на полезную модель RU 161280/ Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Смородова Т.В., Конохов Д.В.//Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Оpubл. 20.04.2016.- Бюл. № 11.
105. Система энергоэффективного двухзонного регулирования скорости асинхронного двигателя с прямым управлением моментом. Патент РФ на полезную модель RU 159422/ Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Смородова Т.В., Конохов Д.В.//Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Оpubл. 10.02.2016.- Бюл. № 5.
106. Энергоэффективный способ управления асинхронными тяговыми двигателями, подключенными параллельно к одному инвертору. Патент РФ на изобретение RU2586944/ Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Смородова Т.В., Ковалев Р.В.// Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Оpubл. 10.06.2016. - бюл. № 16.
107. Энергосберегающая система управления асинхронными тяговыми двигателями, подключенными параллельно к одному инвертору. Патент РФ на полезную модель RU163263/ Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Смородова Т.В., Ковалев Р.В.// Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Оpubл. 10.07.2016. - бюл. № 19.
108. Способ энергоэффективного двухзонного регулирования скорости асинхронного двигателя в системе прямого управления моментом. Патент РФ на изобретение RU 2587162/ Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Смородова Т.В., Конохов Д.В.// Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Оpubл. 20.06.2016.- бюл. № 17.

109. Способ энергоэффективного двухзонного регулирования скорости асинхронного электропривода с гибким ограничением мощности. Патент РФ на изобретение RU 2605458/ Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Смородова Т.В., Конохов Д.В.// Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Оpubл. 20.12.2016.- бюл. № 35.
110. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. - М.: Высш. шк., 2001. - 328 с.
111. Герман-Галкин С.Г. «Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК», Корона-Век, Санкт- Петербург, (2008).
112. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1966.
113. Погорелов Д.Ю. Компьютерное моделирование динамики технических систем с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» /Вест. комп. и информац. технол. – 2005. - №4. – С. 27-34.
114. Программный комплекс «Универсальный механизм», [www.universalmecanism.com](http://www.universalmecanism.com).
115. Федяева Г.А., Погорелов Д.Ю. Оценка динамических нагрузок тягового привода на электромеханических моделях перспективных тепловозов// Тяжелое машиностроение.- 2007.- № 10.- С. 30-35.
116. Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Михальченко Г.С., Сидорова Н.Н. Математическая модель механической подсистемы тяговой электропередачи маневрово-вывозного тепловоза ТЭМ9Н// Вест. Брянского гос. техн. ун-та. - 2013. - № 4.- С. 139-142.
117. Погорелов Д.Ю., Сиимонов В.А., Скало В.И., Томашевский С.Б. Анализ напряженного состояния бандажей локомотивов//Вестн. Восточноукр. нац. ун-та. Технические науки.– Луганск: ВНУ, 2013. - Ч. 1. - № 18.- С. 98 -102.
118. Хлебников В.Н. Исследование фрикционного взаимодействия колес с

- рельсами // Железнодорожный транспорт за рубежом. - 1978. - № 3. - С. 3- 26.
119. Правила тяговых расчетов для поездной работы. М.: Транспорт, 1985. - 288 с.
120. Kotz H.-P. Simulation of Effects based on the Interaction of Mechanics and Electronics in Railway Vehicles/ EUROMECH 452. Advances in Simulation Techniques for Applied Dynamics. March 1-4, 2004, Halle (Saale), Germany (комплексная электромеханическая модель, пульсации).
121. Тарасов А.Н. Моделирование асинхронного тягового электропривода гибридного маневрового тепловоза в режиме реализации предельных тяговых усилий/ III Научно-технический семинар Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте. - Брянск.- 2016.- С. 87 - 89.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1



ГОСУДАРСТВЕННОЕ АГЕНТСТВО УКРАИНЫ ПО УПРАВЛЕНИЮ ГОСУДАРСТВЕННЫМИ КОРПОРАТИВНЫМИ ПРАВАМИ И ИМУЩЕСТВОМ

№ 202/204-19-38 от 15.01.13г.  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ ЗАВОД  
**ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ**  
пр. Московский, 299, г. Харьков, 61089, Украина  
Тел.: +38 (0572) 93-51-44, +38 (057) 727-50-01  
Факс: +38 (0572) 94-98-90  
E-mail: etm@spetm.com.ua www.spetm.com.ua

Заместителю главного конструктора  
ООО «ЦИР СТМ»  
А.Н. Тарасову  
e-mail: office@sinara-group.com

Об асинхронном тяговом  
электродвигателе АД917УХЛ1

Уважаемый Алексей Николаевич!

На Ваш №Ц40-01/14-13 от 11.01.2013 г. направляем расчетные  
параметры асинхронного тягового двигателя АД917УХЛ1:

– мощность на валу, кВт	470
– напряжение линейное, В	710
– ток фазный, А	485
– частота, Гц	21,9
– частота вращения ротора номинальная, об/мин	427,4
– частота вращения ротора максимальная, об/мин	2200
– момент на валу, Нм	10500
– КПД, %	92,5
– коэффициент мощности, д.е.	0,85
– момент инерции ротора, кг·м <sup>2</sup>	23,2
– момент инерции статора с подшипниковыми щитами относительно оси вращения ротора, кг·м <sup>2</sup>	170,9

Параметры схемы замещения приведены в приложении.

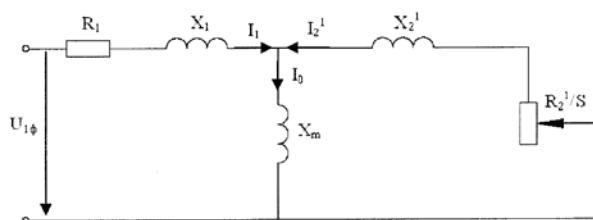
С уважением,  
/ Главный конструктор

В.А. Иванов

Исполнитель: Рябов Е.С., тел./факс: (057)7275104, д.65-03, e-mail: ivanov@spetm.com.ua

Приложение

Расчетные параметры Т – образной схемы замещения тягового асинхронного электродвигателя АД917УХЛ1



Активное сопротивление фазы обмотки статора при температуре 20 °С  $R_{1(20)} = 0,0220 \text{ Ом}$

Приведенное активное сопротивление обмотки ротора при температуре 20 °С  $R'_{2(20)} = 0,0150 \text{ Ом}$

Индуктивность рассеяния обмотки статора  $L_{\sigma 1} = 0,000637 \text{ Гн}$

Приведенная индуктивность рассеяния обмотки ротора  $L_{\sigma 2} = 0,000582 \text{ Гн}$

Характеристика главной индуктивности двигателя  $L = f(I_{\mu 0})$

L, Гн	0,0130	0,0134	0,0204	0,0215	0,0216	0,0217
$I_{\mu 0}$ , А	226	217	101	63	47	41

Примечание:  $I_{\mu 0}$  – намагничивающая составляющая тока холостого хода, А



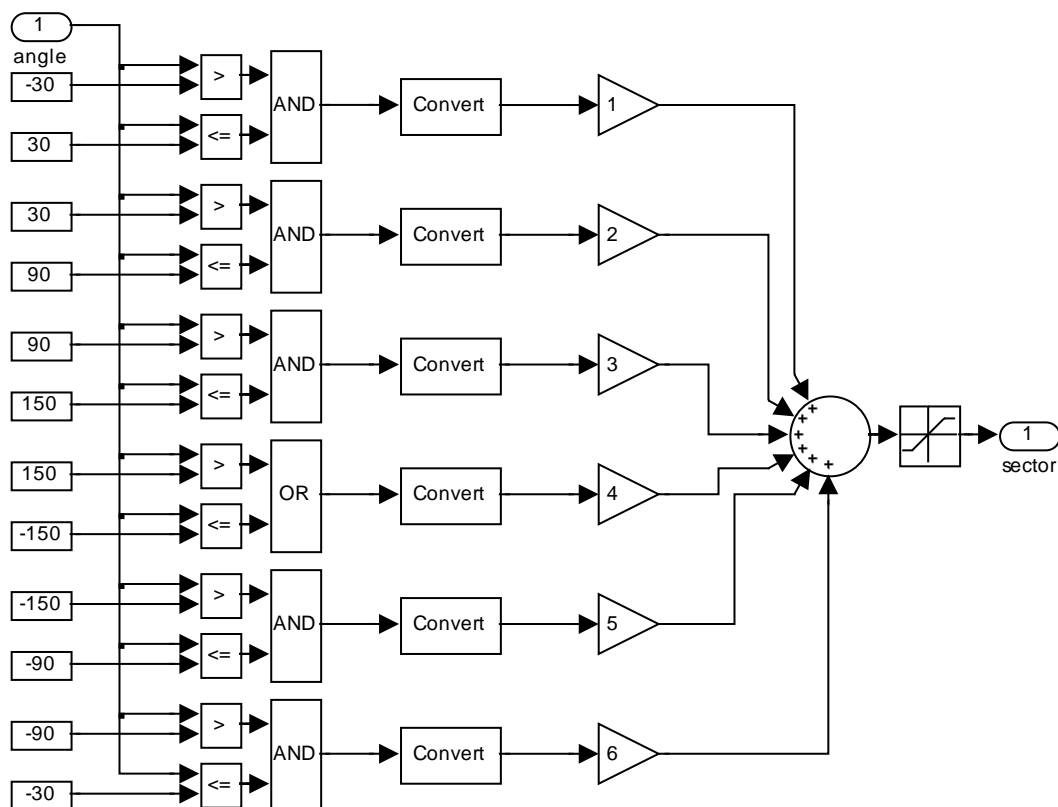


Рис. П2.1. Модель подсистемы, определяющей сектор потокоцепления статора

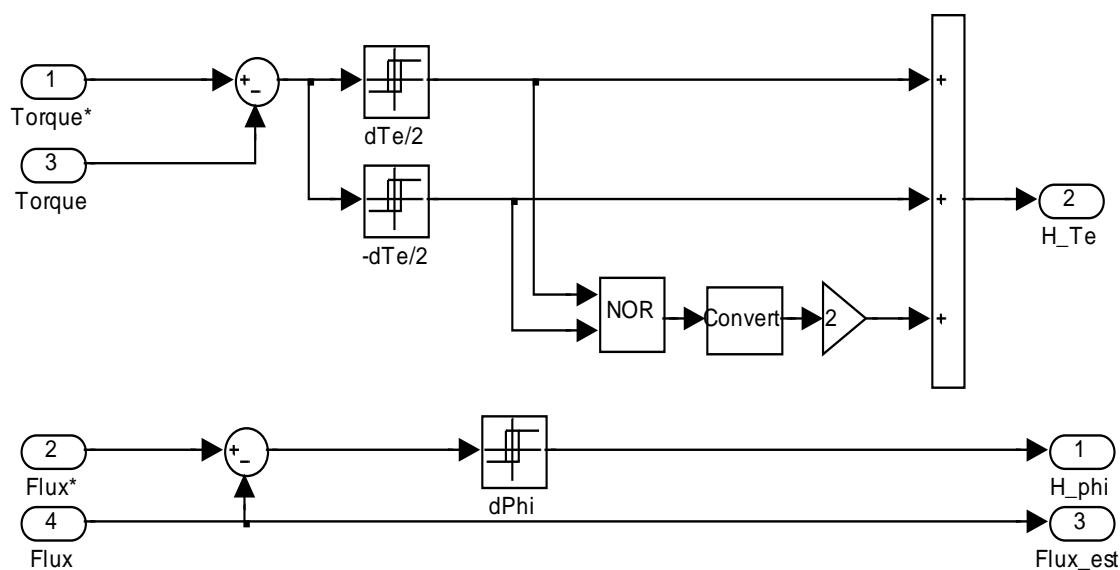


Рис. П2.2. Модель подсистемы релейных регуляторов при  $a=0$  в регуляторе момента

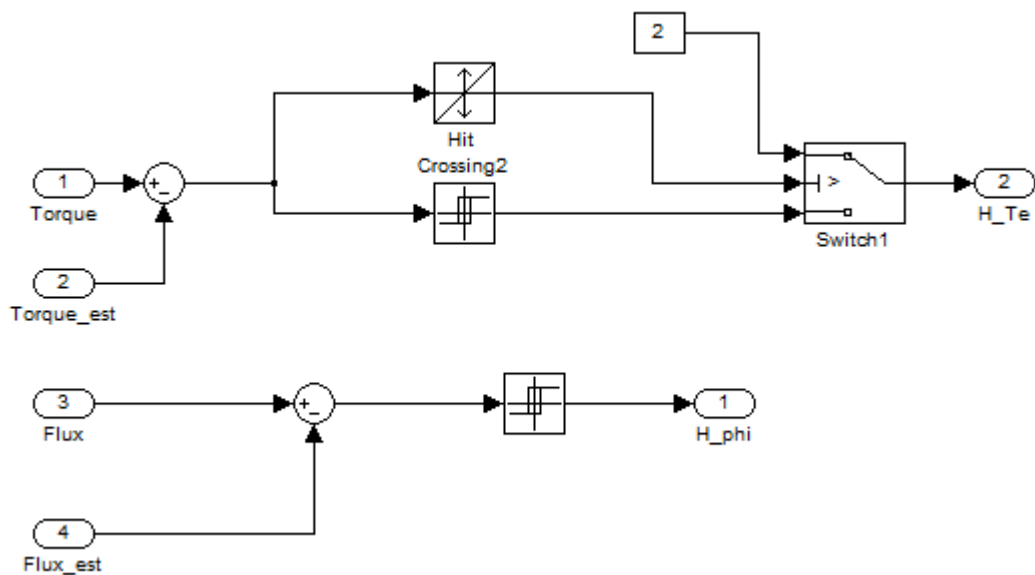


Рис. П2.3. Модель подсистемы релейных регуляторов при  $a \neq 0$  в регуляторе момента

## Приложение 3

Таблица П3.1

Параметры механической части модели тепловоза ТЭМ9Н  
(все параметры приведены в единицах системы СИ)  
Параметры, используемые в подсистеме “Vehicle”

Параметр	Выражение	Значение	Комментарий
xsh		6.535	Шкворневая полубаза
mc		88400	Масса кузова
icx		160000	X Момент инерции кузова
icy		2000000	Y Момент инерции кузова
icz		1900000	Z Момент инерции кузова
zc		1.8	Высота центра масс кузова над осями колесных пар
dxspring2		0.085	смещение центра симметрии пружин
v_1		0.03	точка перелома хар. гасителя виляния
d_1		250000	Параметр гасителя виляния тел. до перелома хар.
d_2		10000	Параметр гасителя виляния тел. после перелома хар.
g_width		3.08	Габаритная ширина кузова
g_height		5.268	Габаритная высота
g_length		21.2	Габаритная длина
wheel_height		0.5	Высота колёс
mp		4000000	Масса состава (инерц)
key_train		1	Ключ сопротивл. движ 1/0 (есть/нет)
mtrain		4000000	Масса состава (сопрот. движ)
c1xpodv		4000000	жесткость подвеса двигателя
d1xpodv		40000	диссипация в подвесе двигателя

Таблица П3.2

Параметры, используемые в подсистеме “Тележка”

Параметр	Выражение	Значение	Комментарий
mrama		6800	масса рамы тележки
iramax		3600	Момент инерции рамы относительно оси x
iramay		35600	Момент инерции рамы относительно оси y
iramaz		30700	Момент инерции рамы относительно оси z
ybuksa		1.13	Поперечное положение буксы
fst2		0.1	Статический прогиб второй ступени
yspring2		1.13	Координата пружины
xspring2_int		0.3	Координата пружины
dxspring2		0.085	Смещение центра симметрии пружин
xspring1		0.31	Продольное положение пружины
zspring2		0.59	Координата пружины
zspring1		0.05	Вертикальная координата при-крепления пружины к буксе
ldampery2		0.5	Координата гасителя

Продолжение таблицы ПЗ.2

hspring1		0.25	Высота пружин первой ступени с учетом статической деформации
xpovodok		0.25	Прикрепление поводка к буксе
lpovodok		0.7	Длина поводка
zpovodok		-0.075	Прикрепление поводка к буксе
ydamper1		1.33	Координата гасителя трения первой ступени
xmotsusp		1	Коорд. подвески двигателя отн. ц.м.
cz2	$mc \cdot 9.81 / 20 / fst$	433602	Вертикальная жесткость отдельной пружины второй ступени
cx2		80000	Продольная жесткость отдельной пружины второй ступени
cy2		80000	Поперечная жесткость отдельной пружины второй ступени
betaz2		0.3	
dz2	$2 \cdot betaz2 \cdot \sqrt{mc \cdot cz2 \cdot 20} / 8$	65667.1294	Диссипация во второй ступени
dz2_0		10000	Коэфф. демпф. после перелома
vz2		0.12	Перелом характеристики гасителя
betay2		0.3	
dy2	$2 \cdot betay2 \cdot \sqrt{mc \cdot cy2 \cdot 20} / 4$	56412.7645	Диссипация во второй ступени
dy2_0		10000	Коэфф. демпф. после перелома
vy2		0.12	Перелом характеристики гасителя
xdamper		1	Продольное смещение поперечного гасителя
irythag		10	Момент инерции балансира
xrythag		0.95	Координата рычага
yrythag		1.31	Координата рычага
mbalanc		220	Масса балансира
ibalancz		75	Момент инерции балансира
xbalanc1		2.6	Координата балансира
xbalanc2		1.2	Координата балансира
zbalanc		0.19	Координата балансира
zbalanc2		0.04	Координата балансира
cxbalanc		50000	Жесткость балансира
cphi_balanc		7000	Жесткость балансира
dphi_balanc	$0.2 \cdot \sqrt{ibalancz \cdot cphi\_balanc}$	144.913767	Коэфф. демпфирования балансира
zrythag		0.1	z-координата рычага РУКП
ctyaga2		20000000	продольная жесткость тяги
dtyaga1	$beta\_tyaga \cdot 2 \cdot \sqrt{ibalancz \cdot ctyaga1 \cdot 1.7}$	10099.5049	Коэфф. демпфирования в тяге
x_balanc_tyaga		0.25	Координата тяги
z_rythag_tyaga		0.3	Координата рычага

Продолжение таблицы ПЗ.2

d_r1		100000	Коэфф демпфирования гасителя в РУКП до перелома
d_r2		10000	Коэфф демпфирования гасителя в РУКП после перелома
cxrychag		8000000	Жесткость рычага
mrychag		50	Масса рычага механизма РУКП

Таблица ПЗ.3

Параметры, используемые в подсистеме “КМБ”

mmotor		3100	Масса двигателя
mc		88400	Масса кузова
fst1		0.06	Статическая деформация первой ступени
xmotsusp		1	Коорд. подвески двигателя отн. ц.м.
xmotor		0.5333	Коорд. ц.м. мотора от оси к.п.
p	$(mc+2*mrama+6*(1-xmotor/xmotsusp)*mmotor)*9.81$	1085776.88 2	Вес на буксах
c1x		400000	Продольная жестк. пружины крайних кол пар тележки
c1y		1400000	Поперечная жестк. пружины крайних кол пар тележки
c1z	P/24/fst1	754011.723 8	Вертикальная жесткость пружины
xreductoraxial		0.47	Межосевое расстояние редуктора
ireductor		3.9	Передаточное число редуктора
rrotor	$xreductoraxial/(ireductor+1)$	0.09591836 7	Радиус шестеренки
rgear	$xreductoraxial*ireductor/(ireductor+1)$	0.37408163 3	Радиус зубчатого колеса
ydamper1		1.33	Координата гасителя трения первой ступени
creductor		4560000	Коэффициент жесткости зацепления в редукторе
dreductor		320	Коэффициент диссипации в редукторе
clearance		0	Зазор в зубчатом зацеплении
imotorz		400	Момент инерции двигателя относительно оси z
c1xlead		25000000	Жесткость поводка
d1xlead		200000	Коэфф. диссипации в поводке
imotorx		400	Момент инерции двигателя относительно оси x
imotory		280	Момент инерции двигателя относительно оси y

Продолжение таблицы ПЗ.3

iyrotor		26	Момент инерции ротора относительно оси вращения
inyozzle		16	Момент инерции венца относительно оси кп
hspring1		0.25	Высота пружин первой ступени с учетом стат. деформации
ygearing		-0.6	Смещение у зацепления
ibuksay		10	Момент инерции буксы
ybuksa		1.13	Поперечное положение буксы
xspring1		0.31	Продольное положение буксы
zspring1		0.05	Вертикальная координата прикрепления пружины к буксе
cphi1x	$c1x*\sqrt{hspring1}/3$	8333.33333 3	Изгибная жесткость пружины
cphi1y	$c1y*\sqrt{hspring1}/3$	29166.6666 7	Изгибная жесткость пружины
xpovodok		0.25	Прикрепление поводка к буксе
lpovodok		0.7	Длина поводка
zpovodok		0.075	Прикрепление поводка к буксе
betaz1		0.2	Доля демпфирования
dz1	$2*betaz1*\sqrt{(mrama+1.5*mmotor)*c1z*12}/4$	32187.1419 7	Коэфф. демпфирования гасителя
dz1_0		100000	Коэфф. демпфир. после перелома
vz1		0.12	Перелом хар. гасителя
c1xpodv		4000000	Жесткость поводка
d1xpodv		40000	Коэффициент демпфирования поводка
wset.mw		2790	Масса колесной пары
wset.iwy		98	Момент инерции 1го колеса
wset.iwy2		98	Момент инерции 2го колеса
wset.c_ws		13950000	Жесткость оси кп
wset.d_ws		60	Коэффициент демпфирования в оси кп

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе БГТУ



В.М. Сканцев

2018 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов, полученных в диссертационной работе Тарасова Алексея Николаевича, выполненной на тему «Управление асинхронными тяговыми электродвигателями тележки локомотива в предельных по сцеплению режимах движения»

Настоящий акт подтверждает использование в учебном процессе магистратуры 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» математических моделей и методик моделирования тягового электропривода с совместным регулированием асинхронных двигателей тележки в режимах реализации предельных тяговых и тормозных усилий.

Данные разработки используются в научно-исследовательской работе магистров, а также при выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Моделирование динамики электромеханических систем» и «Мехатроника».

Исполняющий обязанности  
заведующего кафедрой  
«Промышленная электроника  
и электротехника»

А.А. Пугачёв

УТВЕРЖДАЮ

Главный конструктор  
ООО «Центр инновационного  
развития СТМ»

  
А.А. Сачков  
« 16 » мая 2018 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов, полученных в диссертационной работе Тарасова Алексея Николаевича, выполненной на тему «Управление асинхронными тяговыми электродвигателями тележки локомотива в предельных по сцеплению режимах движения»

Настоящий акт подтверждает внедрение математических моделей тягового электропривода с совместным регулированием асинхронных двигателей и методик расчёта динамических процессов в электромеханической системе локомотива при реализации предельных тяговых усилий.

Данные разработки используются при проектировании маневровых тепловозов нового поколения с асинхронными тяговыми двигателями.

Заместитель главного конструктора  
ООО «ЦИР СТМ»

Д.А. Коваленко