

Висновки

1. Обґрунтовано метод математичного моделювання комутаційних процесів в ГСЖК, який враховує як незалежність так і збіг у часі комутацій N - перетворювальних пристроїв і дозволяє використанням запропонованих уніфікованих алгоритмів здійснити оцінку якісних і кількісних характеристик електромагнітного (комутаційного) впливу при значному розкиді кутів керування і навантаження i -х установок (механізмів).

2. Запропонований критерій оцінки взаємовпливу в СГЖК механізмами з циклічно-нестабільними навантаженнями у вигляді відносної напруги спотворення на відміну від загальноприйнятого коефіцієнта несинусоїдності надав можливість отримати більш повну інформацію про механізм формування рівнів гармонік напруги спотворення в окремих ділянках мережі живлення неперервного прокатного стану для різних профілей прокату.

Перелік посилань

1. Высочанский В. С. Искажение формы напряжения сети при коммутации тока в мостовых выпрямителях / В. С. Высочанский. // Электричество. – 1973. –

№4. – С. 15–21.

2. Иванов В. С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В. С. Иванов, В. И. Соколов. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.
3. Шипилло В. П. Влияние тиристорного электропривода на питающую сеть / В. П. Шипилло // Электротехническая промышленность. Электропривод. – 1970. – №1. – С. 5–10.
4. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
5. Справочник по преобразовательной технике / под ред. И. М. Чиженко. – К. : Техніка, 1978. – 447 с.
6. Пивняк Г. Г. Коммутационные процессы в электроэнергетических сетях с групповыми преобразовательными устройствами / Г. Г. Пивняк, А. Ф. Синолицы // Науковий Вісник НГА України. – 1999. – №6. – С. 110–113.

Поступила в редакцию 02.12.08 г.

Приведены особенности формирования коммутационных процессов в системах группового питания и управления энергоемкими установками с учетом реальных нагрузок. Разработана математическая модель и построенный на ее основе алгоритм расчета коммутационных искажений при работе группы преобразовательных устройств на сеть. Приведены примеры расчета формирования коммутационных режимов группы турбомеханизмов и механизмов прокатного стана ДС-250/150-6 ВАТ «АРСЕЛОРМИТТАЛ КРИВОЙ РОГ»

The peculiarities of commutative processes creation in systems of group power supply and control of power-intensive installations subject to real loads are presented. The mathematical model and the algorithm of commutative distortions calculation constructed on its basis is developed at operation of converter installation group on a power line. The commutative calculations of turbomechanisms group and rolling mill mechanisms of «ArselorMittal Krivoy Rog» are given in the paper.

УДК 621.313.222:62-83

П. Д. Андриенко, С. И. Шило, А. О. Каплиенко, И. Ю. Немудрый

Исследование переходных режимов при последовательном соединении серийных электродвигателей постоянного тока

Предложена и исследована эффективная антибоксовочная система для подвижного состава железных дорог с тяговыми электродвигателями постоянного тока. В статье разработана модель для исследования переходных режимов работы электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения при их последовательном соединении. Приведены результаты моделирования электромеханических процессов, происходящих при боксовании колесных пар подвижного состава железных дорог.

Обеспечение надежности работы электроподвижного состава в эксплуатации требует принятия мер по устранению такого негативного режима, как боксование. Боксование – это явление проскальзывания колеса железнодорожного транспорта, которое возникает при

превышении тяговой силы, приложенной к колесу, силы сцепления колеса с рельсом. Данный режим очень опасен, так как при его возникновении появляются ползуны и мартенсит в зонах теплового воздействия, что приводит к повышенному износу и значительному

© П. Д. Андриенко, С. И. Шило, А. О. Каплиенко, И. Ю. Немудрый 2009 г.

снижению срока службы как колеса, так и рельса, и увеличению вероятности их повреждения [1].

В настоящее время на подвижном составе Украины очень широко применяется система, отслеживающая режим боксования на основании показаний датчиков напряжения, которые измеряют ЭДС якорных обмоток тяговых электродвигателей [2]. При этом система управления (исходя из сравнения разности показаний датчиков с опорным напряжением) выдает сигнал на пульт машиниста о возникновении указанного режима. На основании данного сигнала начинает работать система подсыпания песка, вследствие чего повышается коэффициент сцепления системы «колесо-рельс», из-за чего режим боксования прекращается. Но этого при определенных обстоятельствах (например, сильном загрязнении рельса) может быть недостаточно, и поэтому необходимо дополнительно снижать электромагнитный момент тягового двигателя боксующей колесной пары. Последнее в существующих контактных электротехнических тяговых комплексах подвижного состава постоянного тока достигается принудительным понижением якорного тока во всех тяговых электродвигателях (за счет понижения машинистом позиции тягового контроллера и, соответственно, введения в якорные цепи дополнительных пусковых резисторов, либо – путем уменьшения якорных напряжений импульсным регулятором в бесконтактных электротехнических тяговых комплексах) [2]. После указанного уменьшения якорного тока двигателей режим боксования прекращается, а на пульт машиниста подается сигнал о прекращении указанного режима. Затем машинист повышает позицию тягового контроллера и продолжает ведение поезда в нормальном режиме, если режим боксования не возникает вновь.

Указанная система имеет некоторые недостатки, основные из которых заключаются в следующем:

- низкое быстродействие (вызванное, прежде всего, необходимостью участия машиниста в работе данной системы);
- необходимость снижения тока всех тяговых двигателей при возникновении режима боксования, что при тяжелых условиях пуска (сильный подъем, значительное загрязнение рельса) может привести к задержке отправки состава, что недопустимо.

Поэтому задача разработки эффективных технических средств для исключения режима боксования колесной пары является актуальной. Особенно это востребовано при модернизации существующего подвижного состава постоянного тока и при разработке новых решений для высоковольтных тяговых электротехнических комплексов. Внедрению указанных антибоксовочных технических средств предшествует основательное исследование режима боксования колесных пар подвижного состава железных дорог и процессов, протекающих в данных комплексах в указанном режиме. В работе [1] предложена реализация имитационной модели тягового электропривода электропоезда ЭПЛ2Т при использовании реостатно-контактной системы управления, предназначенная для исследования электромагнитных и электромеханических процессов в данном электроприводе.

Целью данной статьи является разработка эффективной системы управления для режима боксования колесных пар подвижного состава, базирующейся на усовершенствованной схеме широтно-импульсного регулирования тока тяговых электродвигателей постоянного тока [3], и исследование для нее электромагнитных и электромеханических процессов в тяговом электроприводе.

Для проведения исследований электромагнитных и электромеханических процессов, происходящих при работе усовершенствованной схемы широтно-импульсного регулирования тока тяговых электродвигателей подвижного состава постоянного тока, с предложенной антибоксовочной системой разработана соответствующая имитационная модель. Работа данной имитационной модели осуществляется в среде SimPowerSystem пакета Matlab R2008a. Принципиальная схема и общий вид модели показаны на рис. 1. Для проведения исследования процессов в режиме боксования колесных пар подвижного состава блок М1-М2 был расширен и приобрел вид, показанный на рис. 2.

Данная имитационная модель позволяет проводить моделирование следующих режимов: разгон электропоезда при различных уставках ограничения тока тяговых двигателей; разгон и движение электропоезда при различных коэффициентах сцепления в системе «колесо-рельс»; боксование колесных пар в случае превышения силы тяги над силой сцепления в системе «колесо-рельс».

На рис. 3 представлены результаты моделирования режима трогания электропоезда при сниженном (равном половине номинального) коэффициенте сцепления колеса с рельсом (задаваемом константой $kscrp1$ на рис. 2) у колесной пары первого тягового двигателя. Графики зависимостей представлены в относительных единицах. За базовые значения приняты следующие параметры: номинальная частота вращения якоря тягового двигателя: $\omega_n = 60$ рад/с; номинальный ток якоря тягового двигателя: $I_n = 370$ А; напряжение источника питания: $U_{cp} = 1650$ В, коэффициент сцепления: $kscrp1_{nom} = 0,35$ (рис. 2). При этом под первым тяговым двигателем подразумевается электрическая машина М1, под вторым – соответственно М2.

Имитационная модель на рис. 3 содержит:

- Е1 – источник питания (с напряжением равным 1500 В);
- Т1 – силовой ключ;
- Т2 – силовой ключ, включающий тормозной резистор R_t ;
- Д4 – диод обратного тока;
- М1, М2 – двигатели постоянного тока последовательного возбуждения;
- Д5, Д6 – диоды, вводимые в схему при исследовании усовершенствованной системы импульсного регулирования частоты вращения двигателя.

Анализ проведенных исследований показывает, что при возникновении режима боксования изменяется распределение падений напряжения на якорях тяговых двигателей. Как видно из рис. 3 а, б, при рассогласовании скоростей тяговых электродвигателей на 10 % рассогласование якорных напряжений со-

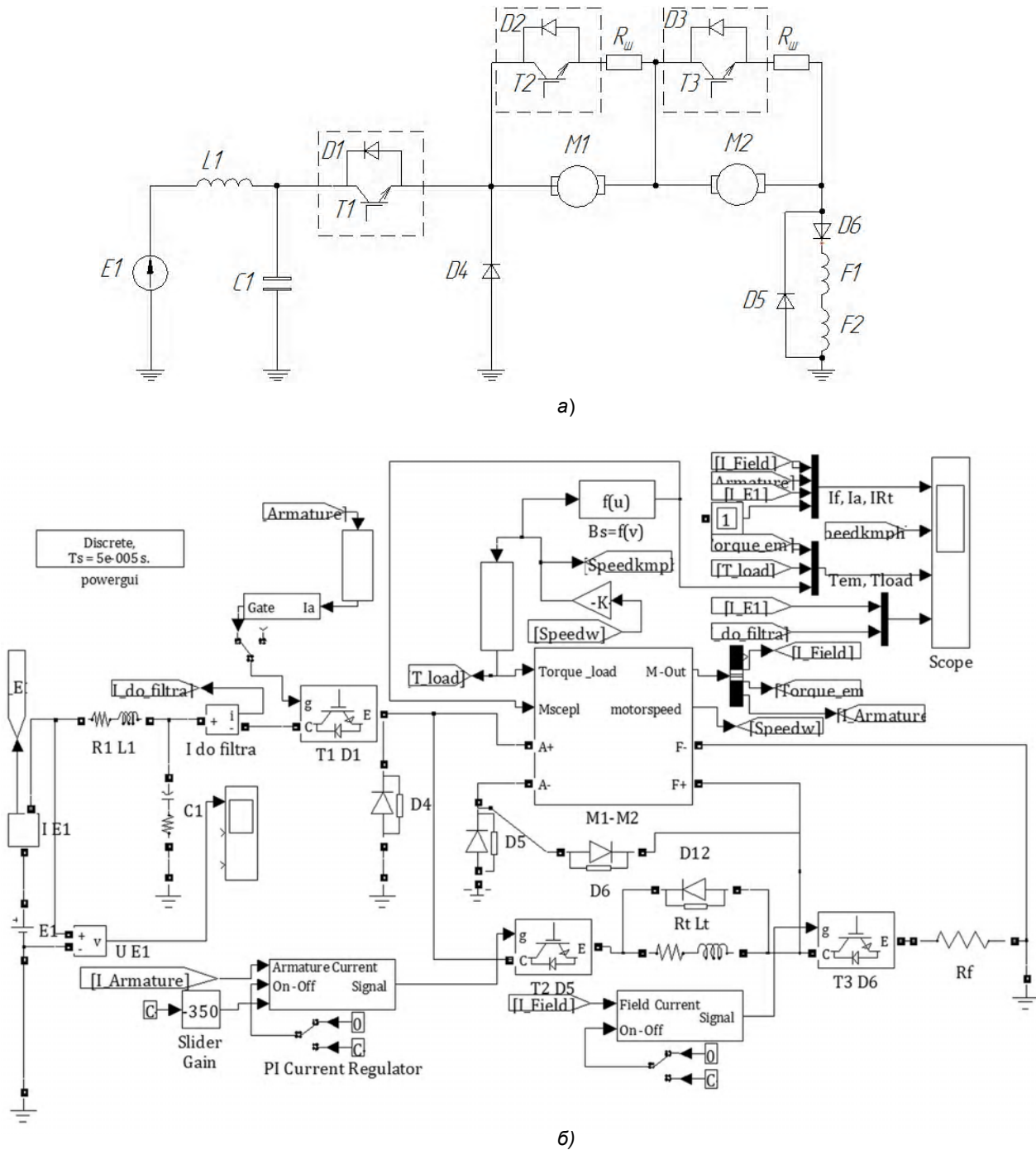


Рис. 1. Усовершенствованная схема широтно-импульсного регулирования тока тяговых электродвигателей:
 а) принципиальная схема; б) общий вид имитационной модели

ставляет 6 %. С учетом этого существует возможность создания антибоксовочной системы, которая будет препятствовать возникновению режима боксования при снижении силы сцепления колеса с рельсом.

Для прекращения боксования колесной пары необходимо уменьшить электромагнитный момент электродвигателя, приводящего ее в движение. Для электродвигателя постоянного тока при такой схеме включения электромагнитный момент будет прямо пропорционален току якоря. Соответственно для сниже-

ния электромагнитного момента достаточно снизить ток якоря электродвигателя. Для этого якорь электродвигателя с помощью силового ключа шунтируется сопротивлением шунтирующего резистора R_{sh} . Чтобы оценить влияние резистора R_{sh} на снижение тока якоря с учетом действия противоЭДС E_1 тягового электродвигателя, рассмотрим упрощенную (соответствующую установившемуся режиму) схему замещения на рис. 4. На указанной схеме приняты следующие обозначения: I_{10} – источник тока, задающий ток, который

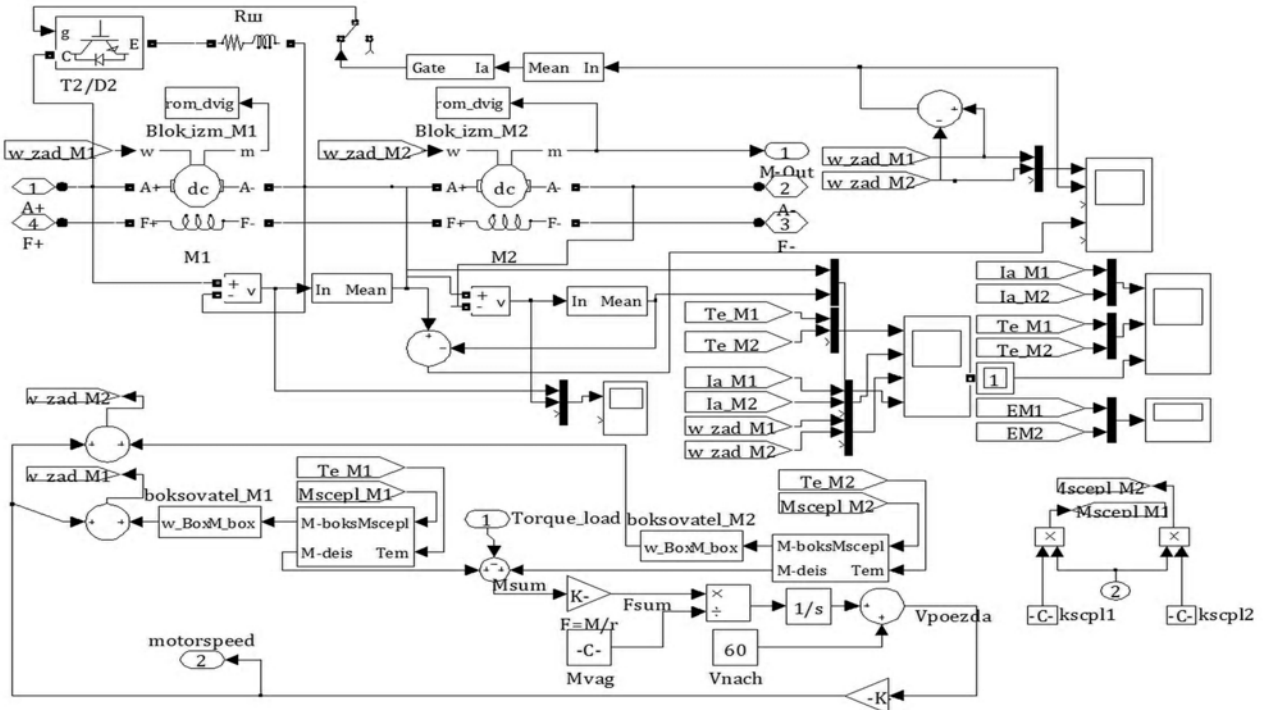


Рис. 2. Структурный состав блока M1-M2

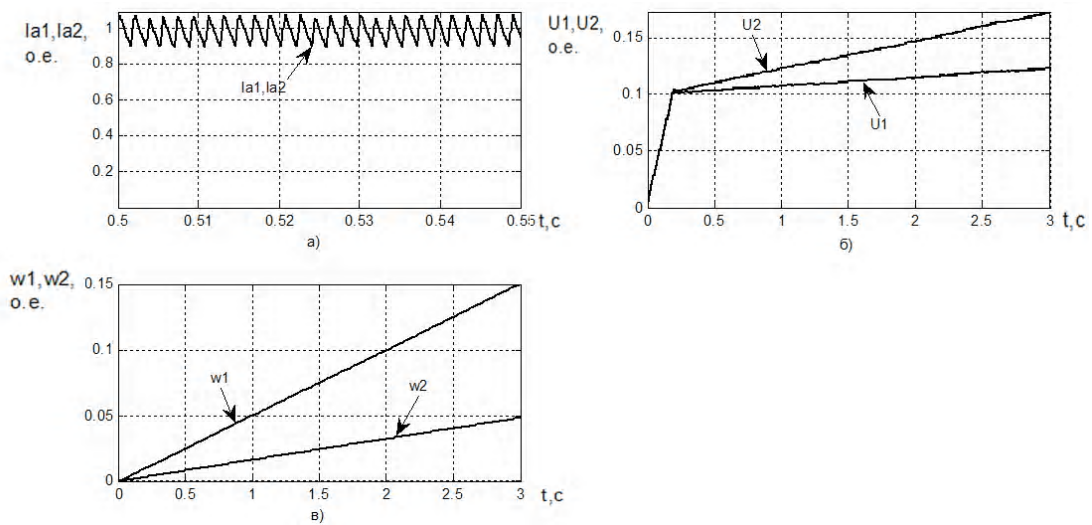


Рис. 3. Графические зависимости, иллюстрирующие результаты моделирования режима трогания электропоезда: а) токи якоря первого(I_{a1}) и второго(I_{a2}) тяговых двигателей (с увеличенным масштабом по времени); б) падение напряжений на якорях первого (U_1) и второго (U_2) тяговых двигателей; в) угловые скорости вращения якорей первого (U_1) и второго (U_2) тяговых двигателей

поддерживаемый импульсным регулятором, R_a – сопротивление обмотки якоря, R_v – сопротивление обмотки возбуждения, S – силовой ключ, осуществляющий подключение шунтирующего резистора.

Когда шунтирующий резистор отключен, ток в цепи якоря равен току I_{10} . При включенном шунтирующем резисторе ток якоря описывается соотношением:

$$I_a = \frac{R_{sh} \cdot I_{10} - E_1}{R_{sh} + R_a} \quad (1)$$

Покажем влияние значений противо-ЭДС E_1 и отношения $\frac{R_{sh}}{R_a}$ на ток якоря в виде поверхности, представленной на рис. 5. Данные представлены в относительных единицах. За базовые значения приняты номинальные значения тока, и сопротивления обмотки якоря тягового электродвигателя.

Приведенная зависимость показывает, что для обеспечения эффективного снижения тока якоря тягового электродвигателя (а, следовательно, и сниже-

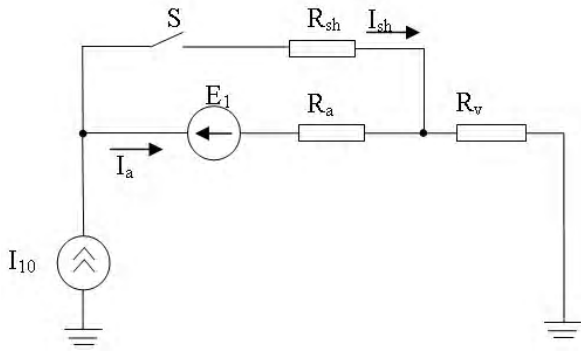


Рис. 4. Упрощенная схема замещения тягового электродвигателя при шунтировании резистором R_{sh} обмотки якоря

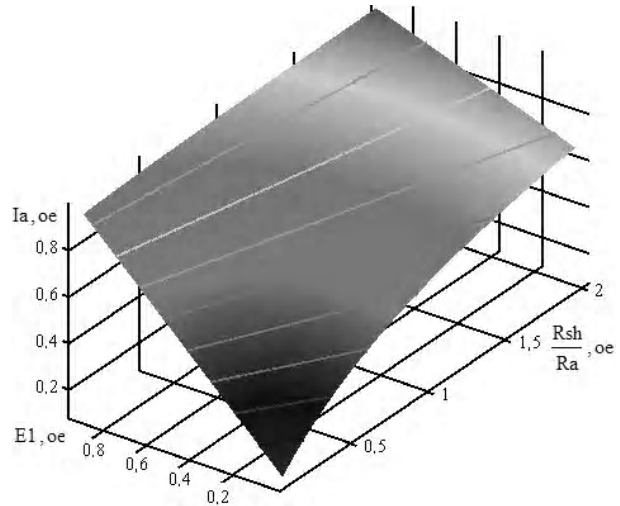


Рис. 5. Графическая зависимость, описывающая влияние противо-ЭДС двигателя E_1 и отношения сопротивления шунтирующего резистора R_{sh} к сопротивлению якорной обмотки, на ток якоря I_a тягового электродвигателя

ния его электромагнитного моментата) необходимо, чтобы отношение $\frac{R_{sh}}{R_a}$ находилось в пределах от 0,1 до 0,3.

Результаты моделирования режима трогания электропоезда при сниженном коэффициенте сцепления колеса с рельсом и включенной антибоксовочной системой приведены на рис. 4.

Также было проведено моделирование электромагнитных и электромеханических процессов для тяговых электродвигателей при значениях коэффициента сцепления колеса с рельсом, равных 0,7 и нулю. Результаты моделирования показаны соответственно на рис. 7 и рис. 8.

Как следует из представленных выше зависимостей, при снижении коэффициента сцепления увеличивается время работы силового ключа, шунтирующего обмотку якоря боксующего тягового электродвигателя. Скорость спада тока в данной цепи будет определяться значениями активного сопротивления шунтирующего резистора и постоянной времени якоря тягового электродвигателя.

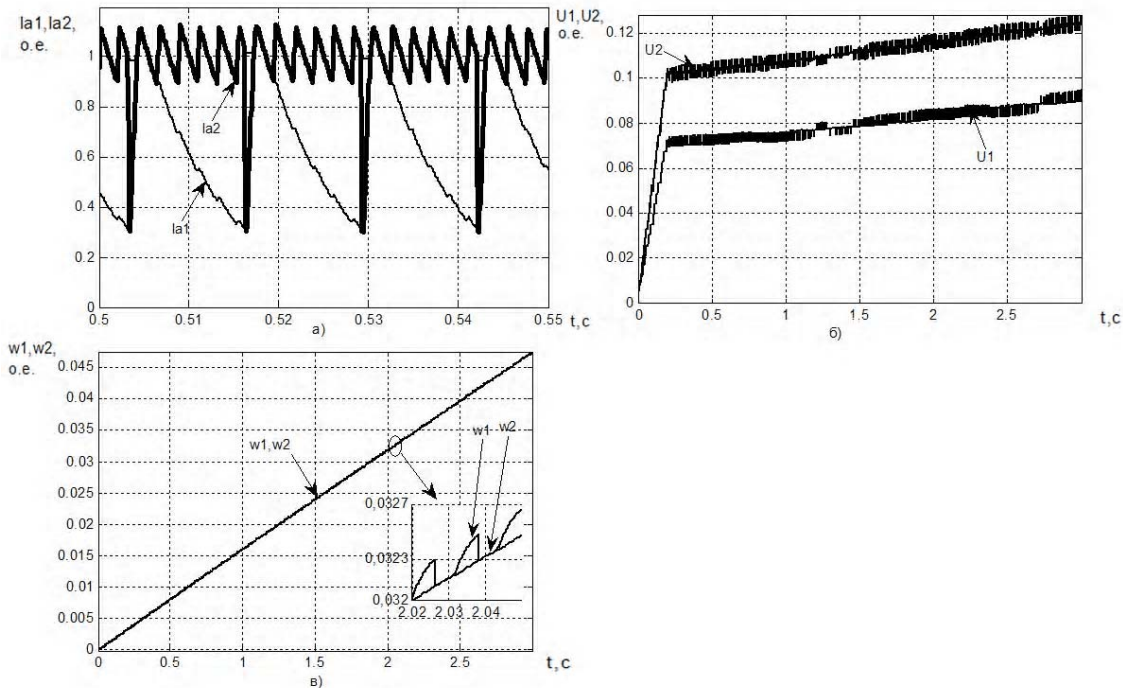


Рис. 6. Графические зависимости, иллюстрирующие результаты моделирования режима трогания электропоезда при включенной антибоксовочной системе ($k_{scpl1} = 0,5$): а) токи якоря первого (I_{a1}) и второго (I_{a2}) тяговых двигателей; б) падение напряжений на якорях первого (U_1) и второго (U_2) тяговых двигателей; в) угловые скорости вращения якорей первого (w_1) и второго (w_2) тяговых двигателей

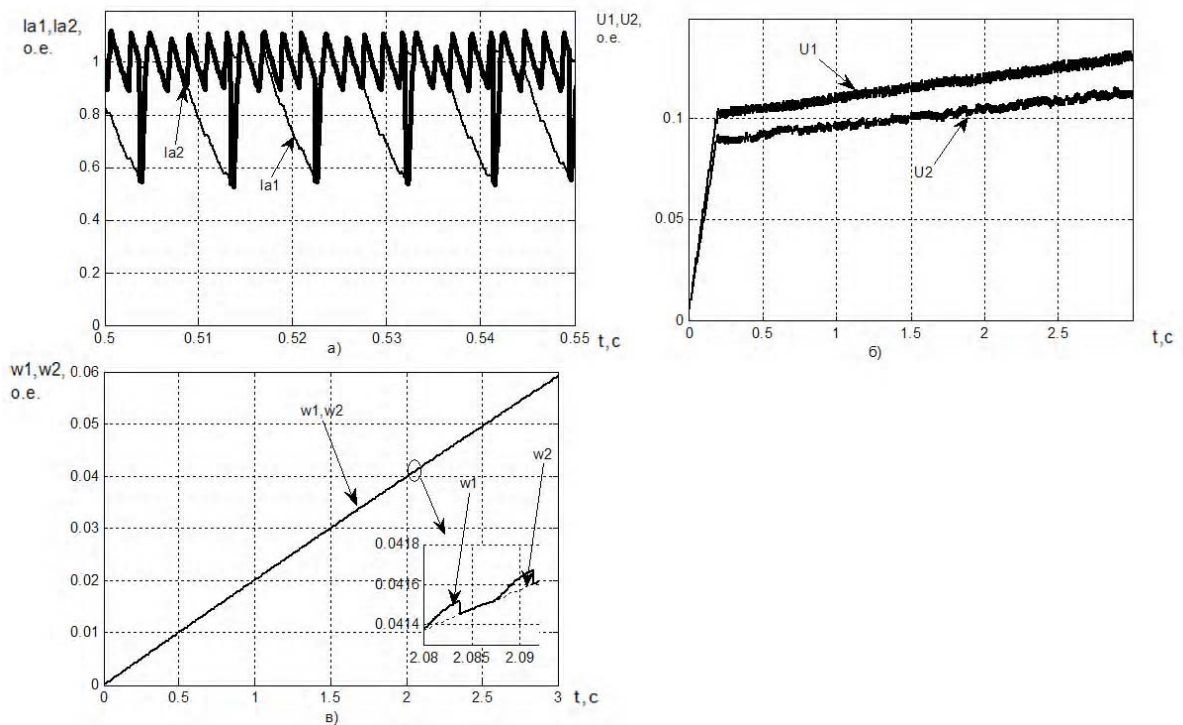


Рис. 7. Графические зависимости, иллюстрирующие результаты моделирования режима трогания электропоезда при включенной антибоксовочной системе ($k_{scrp1} = 0,7$): а) токи якоря первого (I_{a1}) и второго (I_{a2}) тяговых двигателей; б) падение напряжений на якорях первого (U_1) и второго (U_2) тяговых двигателей; в) угловые скорости вращения якорей первого (w_1) и второго (w_2) тяговых двигателей

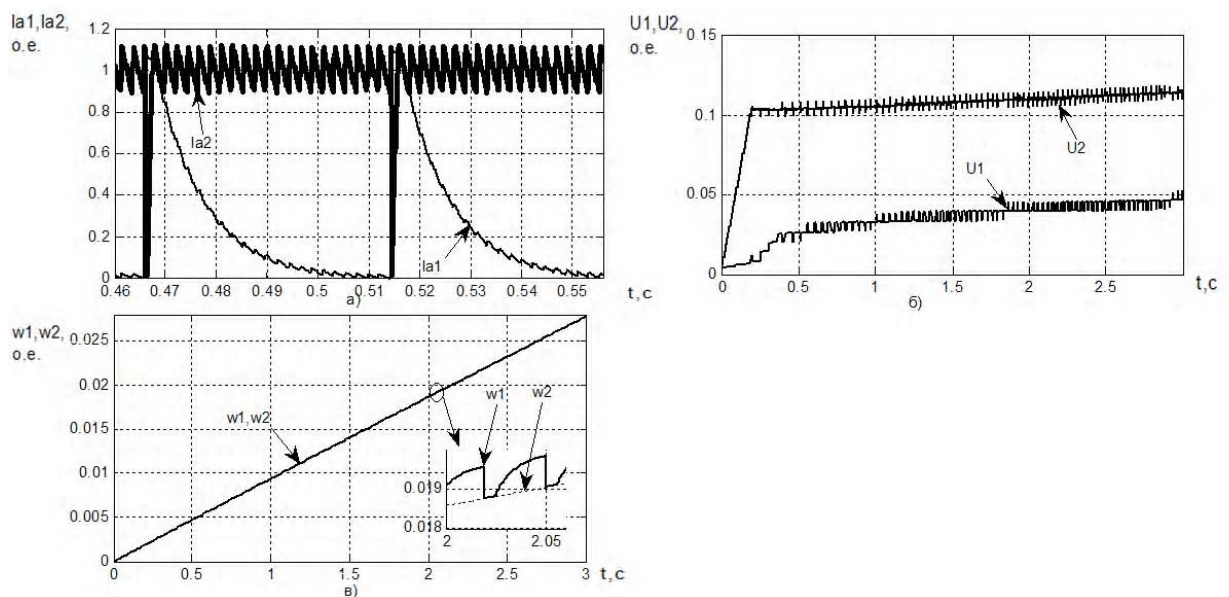


Рис. 8. Графические зависимости, иллюстрирующие результаты моделирования режима трогания электропоезда при включенной антибоксовочной системе ($k_{scrp1} = 0$): а) токи якоря первого (I_{a1}) и второго (I_{a2}) тяговых двигателей; б) падение напряжений на якорях первого (U_1) и второго (U_2) тяговых двигателей; в) угловые скорости вращения якорей первого (w_1) и второго (w_2) тяговых двигателей

Преимущество предложенной антибоксовочной системы в сравнении с существующими подобными системами заключается в том, что в ней не осуществляется снижение токов всех тяговых двигателей при возникновении режима боксования. Для устранения боксования снижается ток только одного тягового дви-

гателя – для боксующей колесной пары, что не приводит к уменьшению тягового момента в небоксующих колесных парах (и, как следствие, позволяет повысить динамические характеристики электровоза в целом).

Выводы

1. Предложена эффективная система управления для режима боксования колесных пар подвижного состава, базирующаяся на усовершенствованной схеме широтно-импульсного регулирования тока тяговых электродвигателей постоянного тока.

2. Разработана имитационная модель, позволяющая исследовать электромагнитные и электромеханические процессы при различных режимах работы электропоезда, в том числе и в режиме боксования.

3. Проведенное моделирование подтвердило возможность создания и реализации эффективной антибоксовочной системы для подвижного состава железных дорог постоянного тока, а также основные полученные аналитические соотношения для данной системы.

Перечень ссылок

1. Басов Г. Г. Развитие электричного моторвагонного рухомого складу / Г. Г. Басов, С. І. Яцько. –

Запропонована та досліджена ефективна протибоксовочна система для рухомого складу залізних доріг з тяговими електродвигунами постійного струму. В статті розроблено модель для дослідження перехідних режимів роботи електродвигунів постійного струму послідовного збудження при їх послідовному з'єднанні. Наведено результати моделювання електромеханічних процесів, які виникають в режимі боксування колесних пар рухомого складу залізних доріг.

The effective anti-skidding system for rolling stock of railways with the traction direct-current motors is offered and investigated. In the article the model for the investigation of the transient state of the direct current motor of series excitation for the series connected motors is presented. The results of electromechanical processes modeling happened at skidding of wheel pairs of railway rolling stock are given.

УДК 621.316.93:519.876.5

А. Р. Лучко, Т. В. Попова

Имитационное моделирование электромагнитных процессов в магнитосвязанных электрических цепях

Рассмотрены известные подходы к имитационному моделированию электромагнитных процессов в устройствах, содержащих электрические и магнитные цепи. Разработаны структурные схемы, пользовательские блоки и имитационные модели для расчета магнитосвязанных электрических цепей, с помощью которых рассчитаны электромагнитные процессы в однофазном двухобмоточном трансформаторе и управляемом подмагничиванием реакторе.

Введение

В последние годы значительно возрос научный интерес к моделированию магнитосвязанных электрических систем (силовых трансформаторов, управляемых реакторов и др.) на основе электрических схем их замещения [1–3]. Создание таких моделей предназначено для анализа в магнитосвязанных электрических цепях электромагнитных процессов, возникающих в рабочих и аварийных режимах.

Для достоверного представления магнитосвязанных электрических цепей исследователь стремится

- Харьків : Алекст+, 2005. – 248 с.
2. Преобразовательные полупроводниковые устройства подвижного состава / Ю. М. Иньков, Н. А. Ротанов, В. П. Феоктистов, О. Г. Чаусов – М. : Транспорт, 1982. – 263 с.
 3. Андриенко П. Д. Исследование динамики серийного электродвигателя с различными импульсными схемами регулирования / П. Д. Андриенко, А. О. Каплиенко, С. И. Шило, И. Ю. Немудрый // Электротехника та електроенергетика. – 2007. – № 1. – С. 4–8.
 4. Акимов Л. В., Долбня В. Т., Клепиков В. Б., Пирожок А. В. Синтез упрощенных структур двухмассовых электроприводов с нелинейной нагрузкой // Под общей редакцией В. Б. Клепикова. – Харьков : НТУ «ХПИ» ; Запорожье : ЗНТУ, 2002. – 160 с.

Поступила в редакцию 24.11.08 г.

После доработки 18.12.08 г.

в создаваемой модели наиболее полно учесть особенности объекта, что вызывает на практике усложнение модели. Однако, при этом исследователь сталкивается с ограничениями в существующих методах анализа и возможностях вычислительной техники, что, в свою очередь, требует по возможности упростить модель [1].

Удачным компромиссным выходом при выполнении этих требований представляется использование теории цепей, методы расчета которой достаточно хорошо разработаны [4]. Совместное решение урав-