

УДК 621.313.001.4

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИЛОВОЙ ЧАСТИ СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО ПРИНЦИПУ ВЗАИМНОЙ НАГРУЗКИ

**И. В. ДОРОЩЕНКО, М. Н. ПОГУЛЯЕВ,
В. С. ЗАХАРЕНКО, В. В. ТОДАРЕВ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Ключевые слова: испытательный стенд, тяговый электропривод, двигатель постоянного тока, имитационная модель.

Введение

Тяговые электродвигатели представляют один из наиболее ответственных видов тягового оборудования в конструкции любого электровоза или электропоезда. От их работоспособности в условиях эксплуатации и технических характеристик в определяющей степени зависит общий уровень надежности и использования тяговых возможностей локомотива в целом. Большую часть отказов электрического оборудования составляют отказы тяговых электрических двигателей, в результате они имеют небольшие показатели надежности. Для двигателей требуются точные методы проверки состояния, так как при отказе любого из тяговых двигателей наступает отказ тепловоза [1], [2], [5].

В последнее время наблюдается рост мировых цен на энергоресурсы, поэтому одним из приоритетных направлений технической политики во всех развитых странах мира является энергосбережение, в том числе и при проведении испытаний двигателей. В связи с этим современные испытательные стенды должны удовлетворять требованиям регламента испытаний, управляемости и энергосбережения. Эффективность энергосберегающих технологий в промышленности в значительной мере определяется эффективностью электропривода, входящего в состав стенда. Таким образом, разработка высокопроизводительных и экономичных систем привода является приоритетным направлением развития современных испытательных стендов. Испытательный стенд представляет собой конструктивное единство электромеханического преобразователя энергии, силового преобразователя и устройства управления [3], [4].

Техническая сложность проведения того или иного вида испытаний современных тяговых электродвигателей связана с их значительной мощностью. Поэтому для таких машин (средней и большой мощности) был разработан особый метод нагружения и экономичного питания, получивший название метода взаимного нагружения [2], [5]–[7]. В настоящее время этот метод является общепризнанным и наиболее распространенным на предприятиях железнодорожного транспорта, связанных с изготовлением или ремонтом тяговых электрических машин локомотивов.

Целью работы является создание имитационной модели силовой части станции испытания тяговых электродвигателей постоянного тока, применяемой для проведения лабораторных работ в УО «БелГУТ» (г. Гомель) и последующий анализ возможности применения статических преобразователей в составе станции.

Основная часть

Наибольшее распространение на станциях для испытания тяговых электромашин получил принцип взаимной нагрузки с использованием так называемых вольтдобавочной машины и линейного генератора. Особенность схемы с использованием вращающихся преобразователей заключается в том, что в качестве вольтдобавочной машины и линейного генератора, как правило, применяются однотипные (или близкие по параметрам с испытуемыми) электромашины, номинальные мощности которых значительно превышают необходимые для испытания. С одной стороны, это снижает энергетическую эффективность испытаний, а с другой – дает очень большой запас по перегрузочной способности источников питания [2], [5].

Особый интерес представляет характер распределения потоков мощности, отбираемой стандом из сети, между двумя источниками. Раздельная компенсация электрических, магнитных и механических потерь вольтдобавочной машиной и линейным генератором обеспечивается лишь при условии совпадения магнитных характеристик испытуемых электромашин. При испытании тяговых двигателей с допустимым по ГОСТ максимальным расхождением магнитных характеристик до $\pm 3\%$ распределение потоков мощности между источниками питания может быть весьма существенным. А это требует такого же существенного запаса типовой мощности каждого из преобразователей и, как следствие, ведет к удорожанию испытательного стенда [1], [2].

Испытания, проводимые при выполнении лабораторных работ в УО «БелГУТ», проводят с использованием тяговых электродвигателей ЭД-107. Стенд позволяет имитировать режимы работы, соответствующие режимам его использования на тепловозах ТЭМ2.

Принципиальная электрическая схема испытательного стенда представлена на рис. 1.

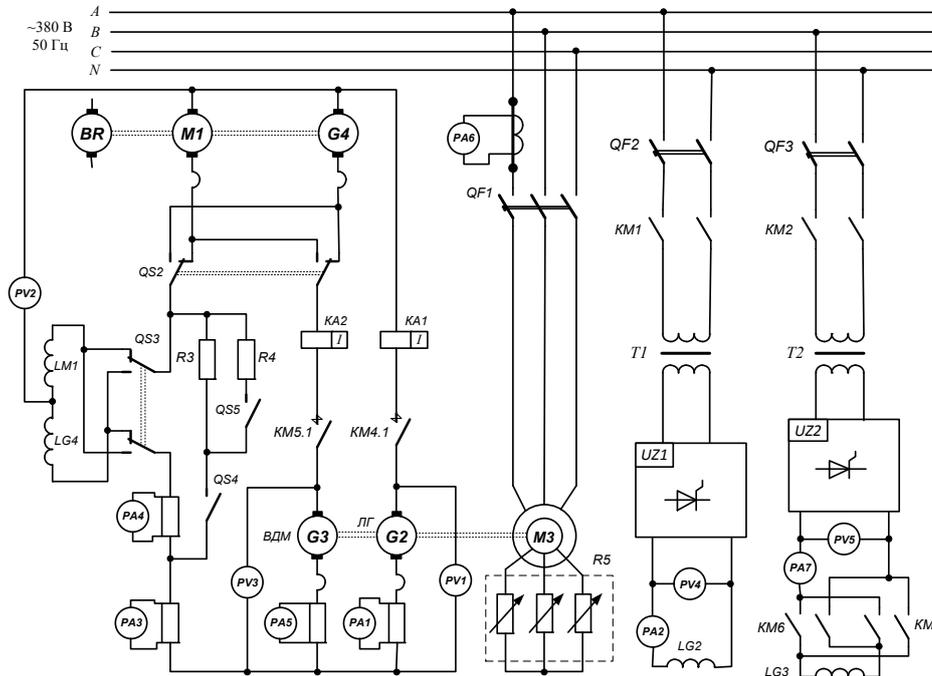


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема силовой части стенда испытания тяговых двигателей по принципу взаимной нагрузки:
M1 – тяговый двигатель постоянного тока; *G2* – линейный генератор;
G3 – вольтдобавочная машина; *G4* – тяговый двигатель постоянного тока, работающий в генераторном режиме; *M3* – асинхронный двигатель с фазным ротором; *BR* – тахогенератор; *UZ1* – ведомый сетью однофазный тиристорный преобразователь; *UZ2* – ведомый сетью однофазный тиристорный преобразователь

Стенд выполнен по принципу взаимной нагрузки. Данный принцип основан на свойстве обратимости электрических машин. При испытании электрических машин их валы соединены муфтой. Одна машина постоянного тока последовательного возбуждения – $G4$ работает в режиме генератора, а вторая – $M1$ – в режиме двигателя. При работе они взаимно нагружают друг друга, т. е. генератор $G4$ питает двигатель $M1$, а последний вращает якорь генератора $G4$. Следует отметить, что для того чтобы одна машина работала в режиме генератора $G4$, сумма ЭДС в цепи его якоря должна быть больше напряжения питающей цепи. Для этих целей в якорную цепь машины $G4$ включена вольтодобавочная машина $G3$. Якоря линейного генератора и вольтодобавочной машины приводятся во вращения при помощи асинхронного электродвигателя. Параллельно двум вышеперечисленным машинам также подключается еще $G2$ – линейный генератор. Данная машина призвана выровнять баланс моментов машин $G4$ и $M1$, а также компенсировать механические, магнитные и добавочные потери этих машин. Регулирование возбуждения линейного генератора и вольтодобавочной машины производят при помощи возбудителей $UZ1$ и $UZ2$ соответственно. Возбудители представляют собой управляемые преобразователи постоянного тока.

Способность вольтодобавочной машины и линейного генератора переходить в двигательный режим оказывает благоприятное демпфирующее действие на работу всей схемы при переходных процессах. Линейный генератор, приводимый во вращение асинхронным двигателем, по сути, является стабилизатором напряжения питания. При использовании статических преобразователей электромеханические переходные процессы будут протекать несколько иначе, возможны значительные перегрузки по току и обратному напряжению. Это все должно быть учтено при выборе типовых параметров полупроводниковых источников питания.

Имитационная модель силовой части стенда была разработана в графической среде имитационного моделирования Matlab Simulink и имеет вид, представленный на рис. 2.

Тяговые машины постоянного тока последовательного возбуждения (ЭД-107) $M1$ и $G4$ в имитационной модели представлены в виде блоков DC motor и DC generator соответственно. Выводы якорных обмоток тяговых машин обозначены в модели Я1 и Я2, выводы обмоток возбуждения данных машин – в модели С1 и С2. Вольтодобавочная машина $G3$ и линейный генератор $G4$ представлены в имитационной модели в виде блоков DC_ВДМ и DC_Lin_Generator. Выводы якорных обмоток вольтодобавочной машины и линейного генератора обозначены в модели Я1 и Я2, выводы обмоток возбуждения этих машин – в модели Н_1 и Н_2.

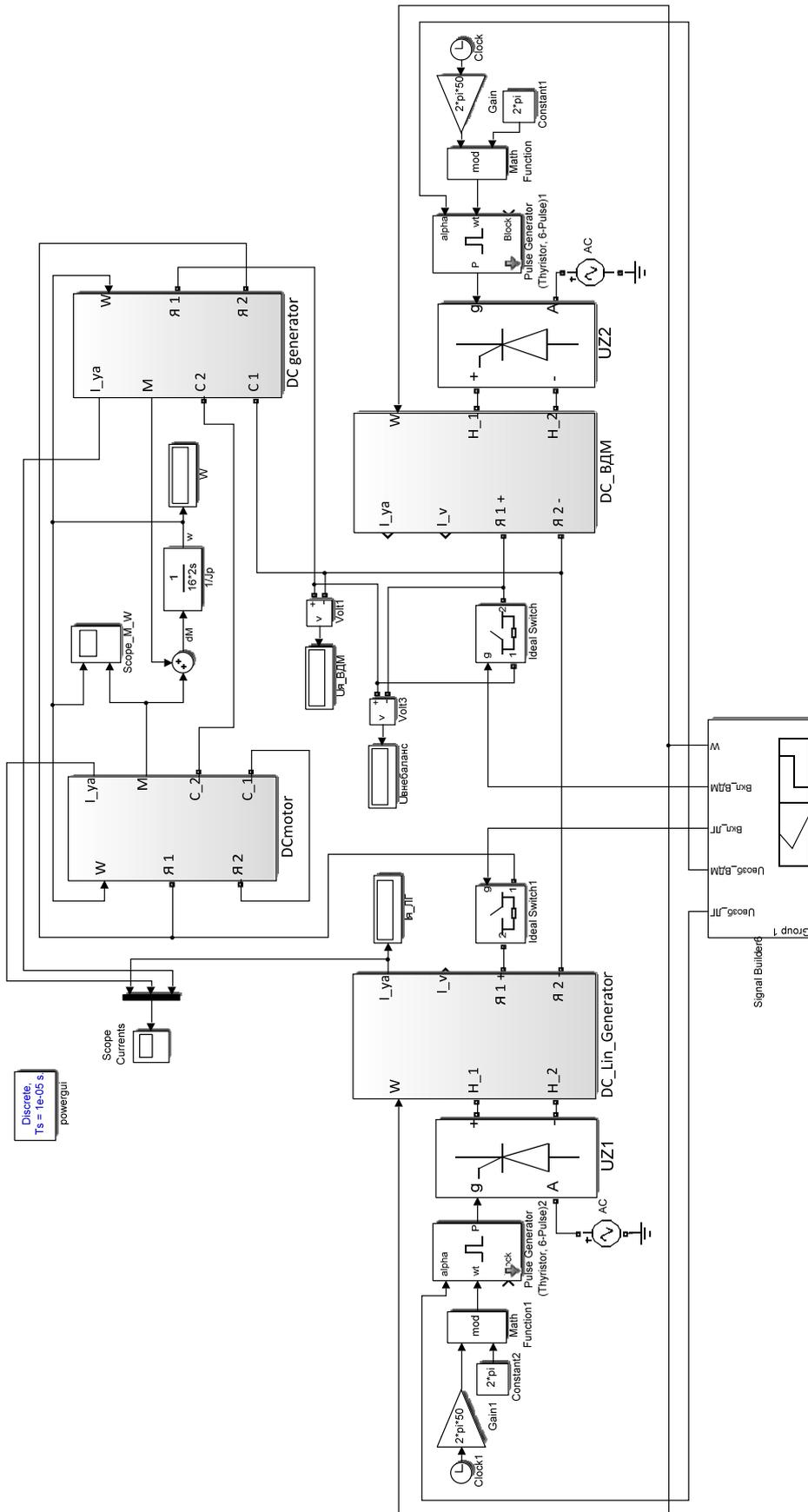


Рис. 2. Имитационная модель силовой части стенда в Matlab Simulink

Имитационная модель была составлена с учетом следующих особенностей:

- обмотки возбуждения и обмотки якоря используемых электродвигателей представлены RL-ветвями с соответствующими параметрами (рис. 3);
- модель машины постоянного тока последовательного возбуждения составлена с учетом кривой намагничивания двигателя (рис. 3, а);
- модели машин постоянного тока независимого возбуждения, используемые в качестве линейного генератора и вольтодобавочной машины, составлены без учета кривой намагничивания (рис. 3, б).

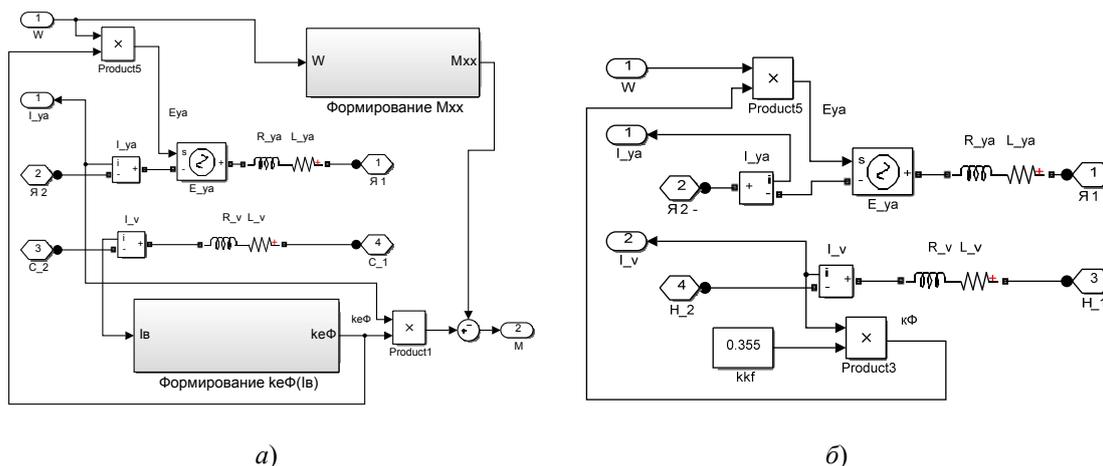


Рис. 3. Модели электрических машин в Matlab Simulink:
 а – двигатель постоянного тока последовательного возбуждения;
 б – генератор постоянного тока независимого возбуждения

При создании имитационной модели, которая наиболее точно описывала электромагнитные процессы двигателя постоянного тока последовательного возбуждения, был разработан блок, содержание которого представлено на рис. 4, а, обеспечивающий формирование магнитного потока двигателя ЭД-107 (рис. 4, б) при изменении тока.

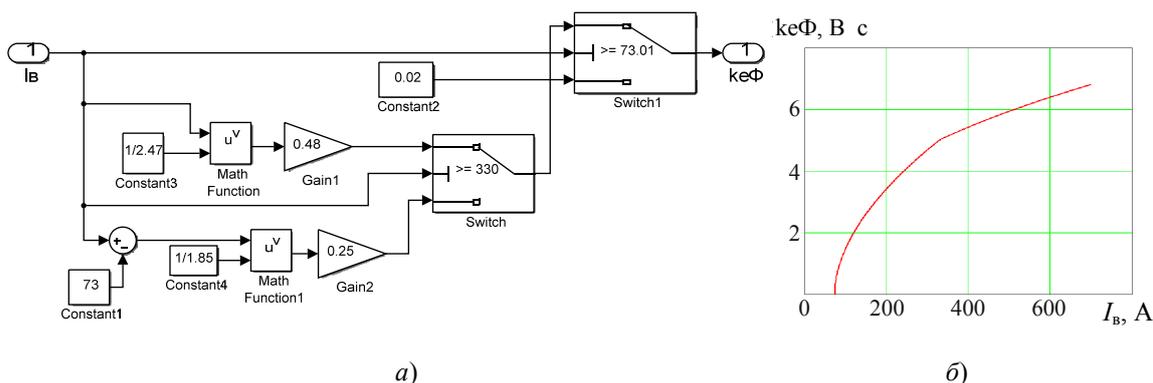
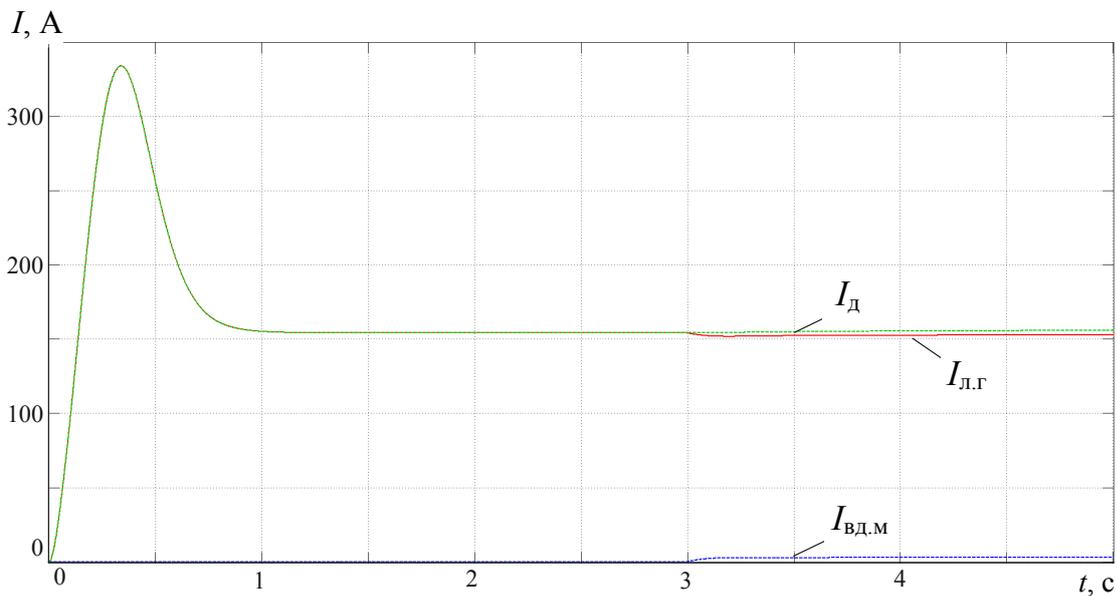


Рис. 4. Модель формирования магнитного потока двигателя ЭД-107 в Matlab Simulink:
 а – модель формирования магнитного потока; б – кривая намагничивания

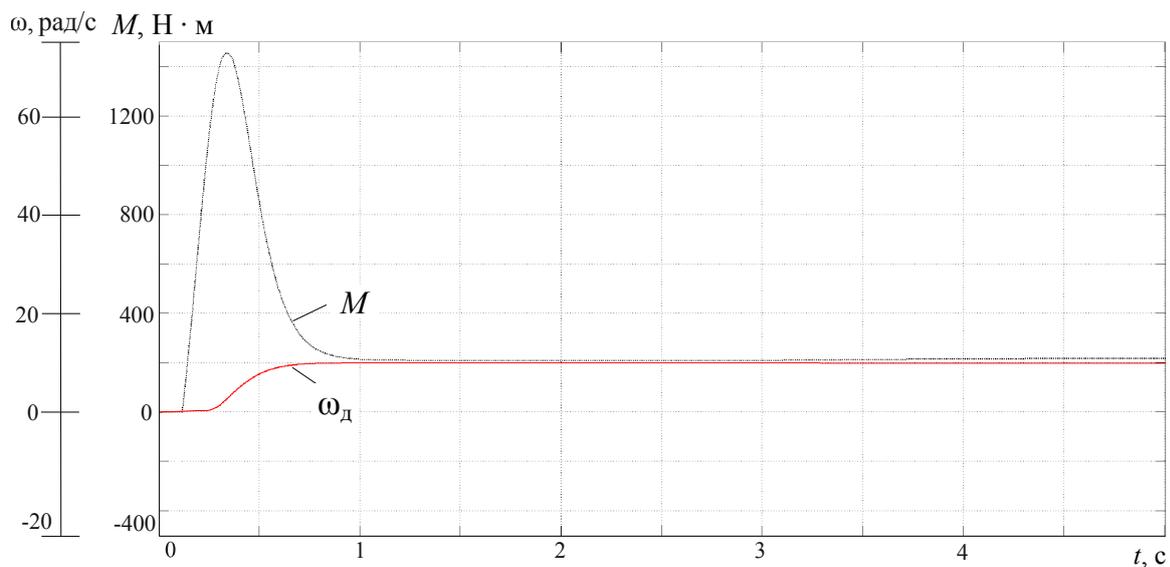
При моделировании проведен расчет следующих переходных процессов:

- пуск испытуемого тягового двигателя при пониженном напряжении якоря (рис. 5);
- разгон тягового двигателя при увеличении напряжения якоря до номинального значения ($U_{д.г} = 360$ В) (рис. 6);

- задание нагрузки ($0,5 \cdot M_{\text{ном}}$) тягового двигателя (рис. 7);
- обрыв цепи вольтодобавочной машины (рис. 8).



а)

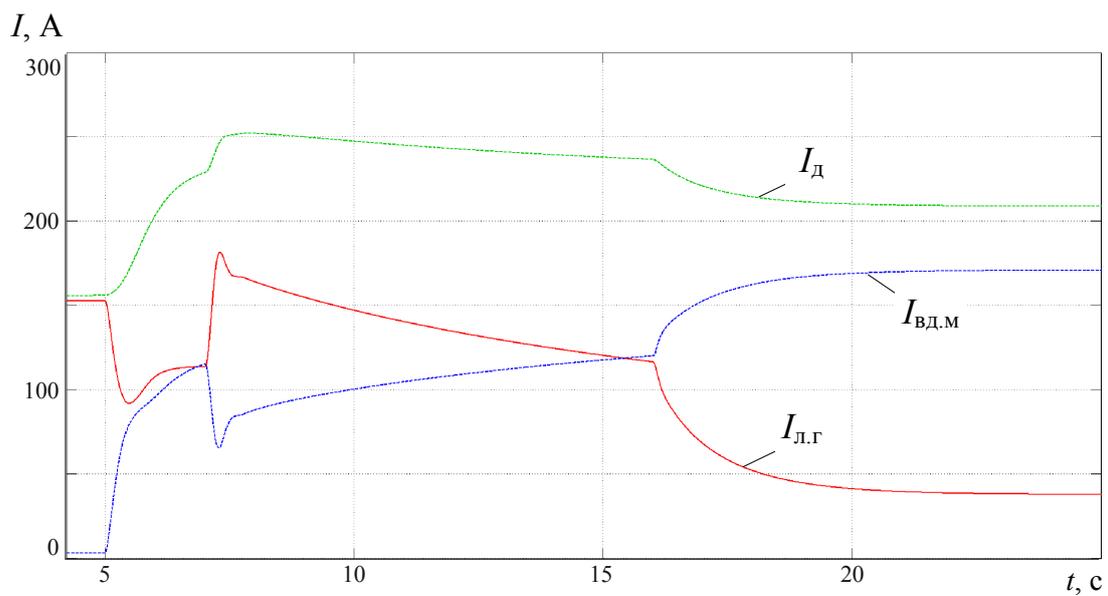


б)

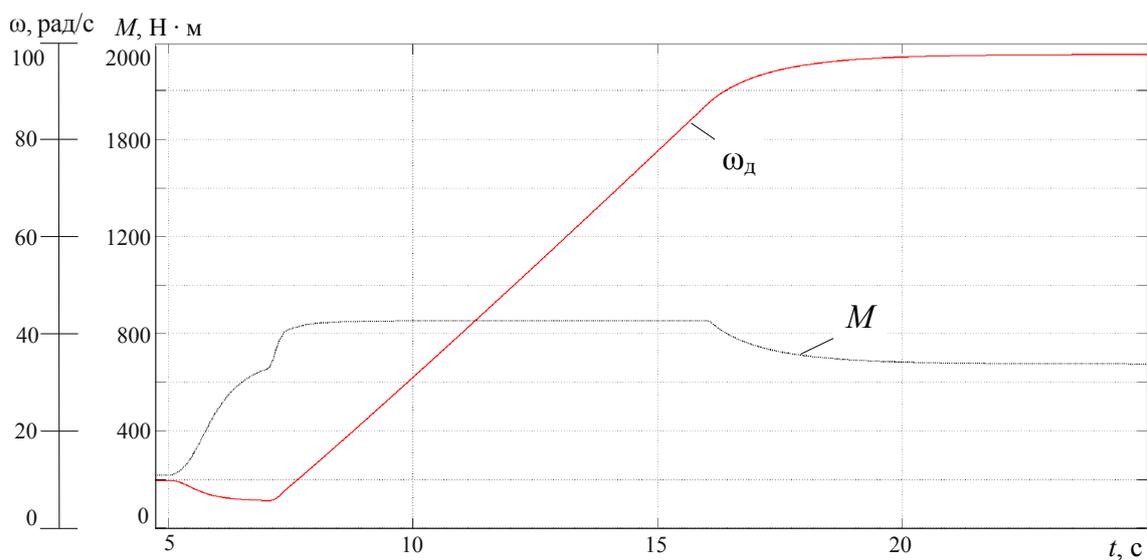
Рис. 5. Диаграммы тягового двигателя при пуске:

а – токов: $I_{\text{д}}$ – ток якоря испытуемого тягового двигателя; $I_{\text{л.г}}$ – ток якоря линейного генератора; $I_{\text{в.д.м}}$ – ток якоря вольтодобавочной машины;

б – момента и скорости: M – электромагнитный момент испытуемого тягового двигателя; ω – угловая скорость вращения испытуемого тягового двигателя



а)



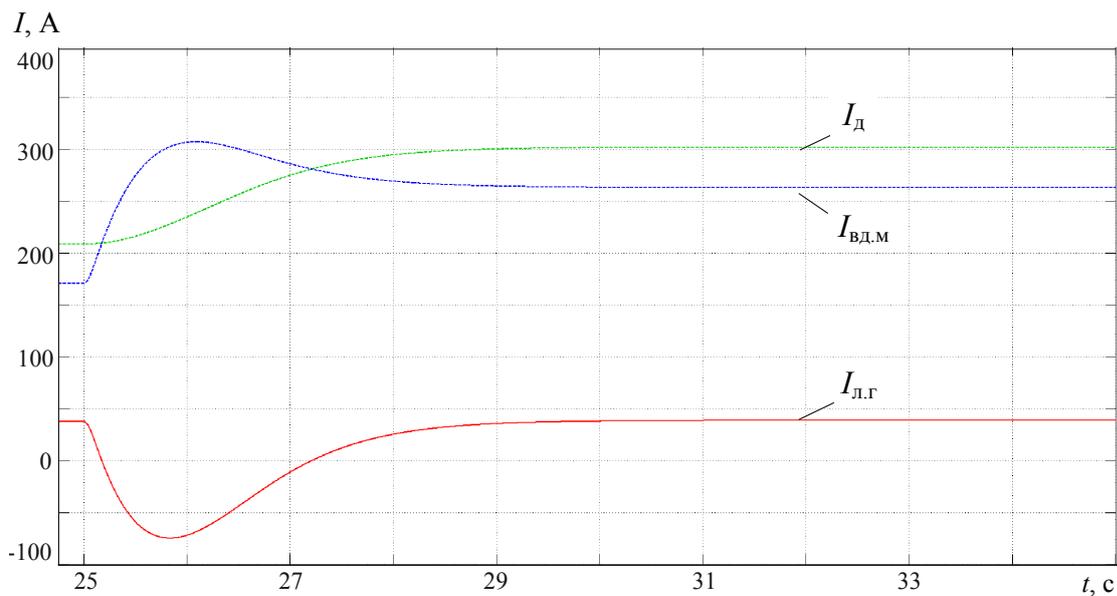
б)

Рис. 6. Диаграммы тягового двигателя при разгоне тягового двигателя с увеличением напряжения якоря до номинального значения:

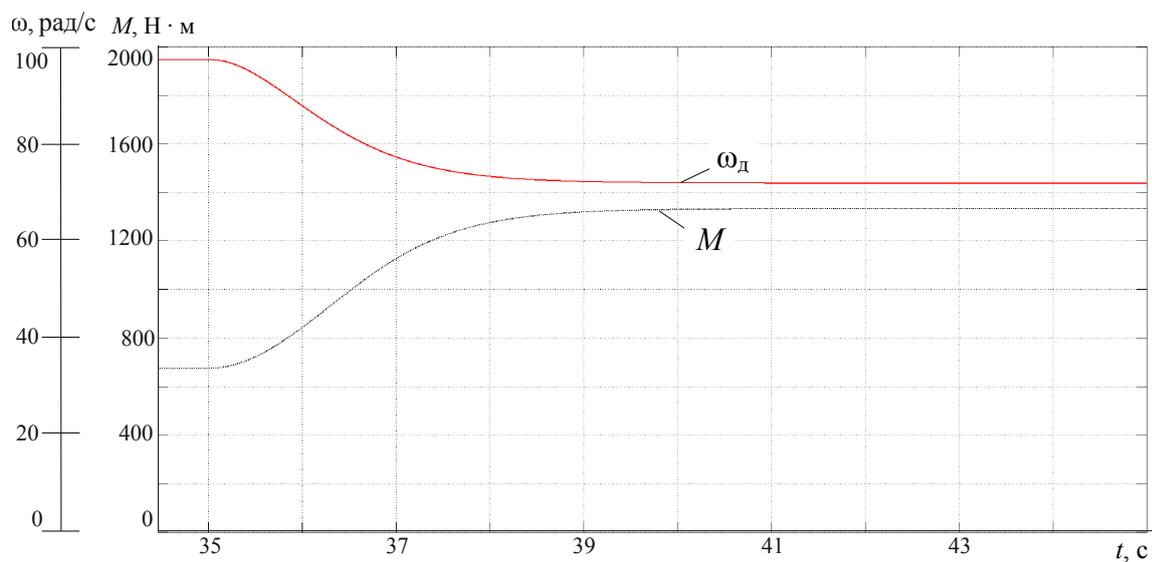
а – токов: I_d – ток якоря испытуемого тягового двигателя;

$I_{д.г}$ – ток якоря линейного генератора; $I_{д.м}$ – ток якоря вольтодобавочной машины;

б – момента и скорости: M – электромагнитный момент испытуемого тягового двигателя; ω – угловая скорость вращения испытуемого тягового двигателя

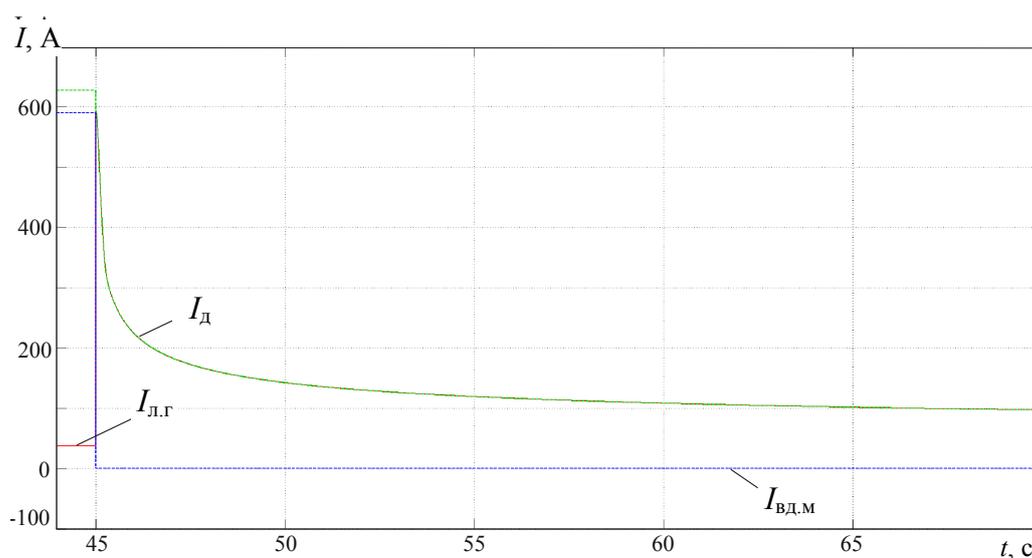


а)

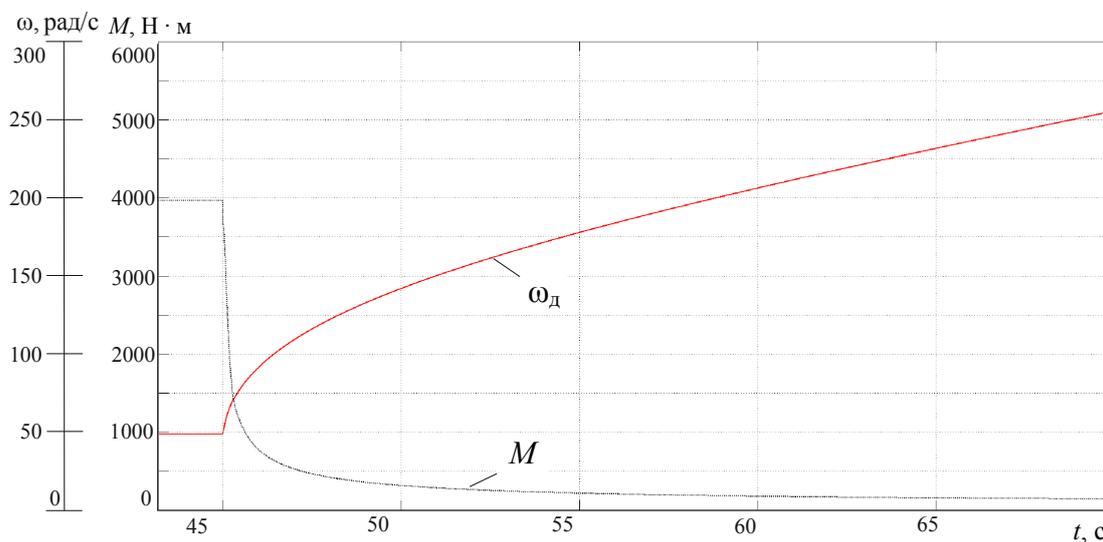


б)

Рис. 7. Диаграммы тягового двигателя при задании номинальной нагрузки тягового двигателя:
 а – токов: I_d – ток якоря испытуемого тягового двигателя; $I_{л.г}$ – ток якоря линейного генератора; $I_{вд.м}$ – ток якоря вольтодобавочной машины;
 б – момента и скорости: M – электромагнитный момент испытуемого тягового двигателя; ω – угловая скорость вращения испытуемого тягового двигателя



а)



б)

Рис. 8. Диаграммы тягового двигателя при обрыве цепи вольтдобавочной машины:
 а – токов: I_d – ток якоря испытуемого тягового двигателя; $I_{л.г}$ – ток якоря линейного генератора; $I_{вд.м}$ – ток якоря вольтдобавочной машины;
 б – момента и скорости: M – электромагнитный момент испытуемого тягового двигателя; ω – угловая скорость вращения испытуемого тягового двигателя

Разработанная имитационная модель нагрузочной части испытательного стенда позволяет производить анализ рабочих и аварийных режимов стенда для испытания тяговых электрических двигателей, что позволит определить параметры узлов защиты стенда (величины уставок и интервалы задержки срабатывания). Верификация модели была проведена на стенде для испытания тяговых машин постоянного тока ЭД-107 в УО «БелГУТ», в результате моделирования и экспериментальных испытаний построена скоростная характеристика машины ЭД-107, представленная на рис. 9.

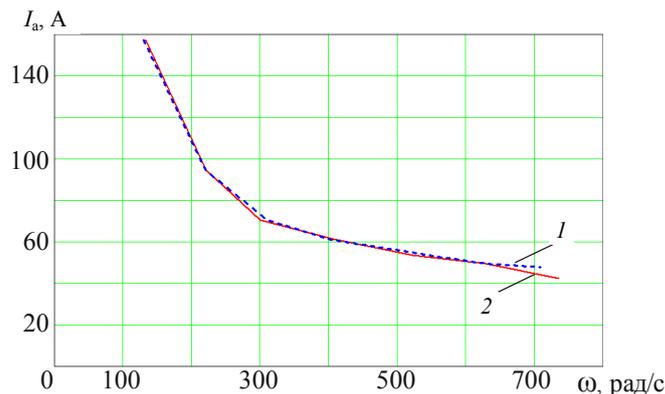


Рис. 9. Скоростная характеристика электродвигателя ЭД-107:
1 – эксперимент; 2 – расчет при моделировании

Заключение

Созданная и отлаженная имитационная модель силовой части стенда позволяет производить анализ процессов, происходящих в стенде с учетом кривой намагничивания тягового двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

Созданная модель использовалась при модернизации станции испытания ТЭД в УО «БелГУТ» при выполнении договора № 785-15 между УО «ГГТУ им. П. О. Сухого» и УО «БелГУТ» по разработке и поставке системы управления станцией испытания тяговых электродвигателей.

В будущем планируется замена в модели стенда линейного генератора и вольтодобавочной машины на статические преобразователи с целью исследования возможности их применения в этом качестве и особенностей управления ими.

Литература

1. Афанасов, А. М. Моделирование электромеханических процессов в стенде взаимной нагрузки тяговых электромашин / А. М. Афанасов // Наук.-техн. збір. «Гірнична електромеханіка та автоматика». – 2010. – Вип. 84. – С. 210–217.
2. Афанасов, А. М. Теоретический анализ энергетических процессов при взаимной нагрузке тяговых электрических машин постоянного тока / А. М. Афанасов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 25. – Д. : Вид-во ДНУЗТ, 2009. – С. 258–262.
3. Захаренко, В. С. Современное состояние и перспективы развития инвариантных электромеханических стендов с рекуперацией энергии / В. С. Захаренко, И. В. Дорошенко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2007. – № 4. – С. 80–84.
4. Михайлов, И. Ю. Разработка компьютерной модели расчета количественной оценки эксплуатационной надежности тяговых электрических двигателей троллейбуса / И. Ю. Михайлов, О. П. Муравлев, А. Л. Федянин // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2014. – Т. 324, № 4. – С. 110–116.
5. Кузнецов, Н. Л. Надежность электрических машин / Н. Л. Кузнецов. – М. : Издат. дом МЭИ, 2006. – 432 с.
6. Курбасов, А. С. Проектирование тяговых электродвигателей : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / А. С. Курбасов, В. И. Седов, Л. Н. Сорин ; под ред. А. С. Курбасова. – М. : Транспорт, 1987. – 536 с.
7. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам / под ред. А. И. Тищенко. – М. : Транспорт, 1976. – 432 с.

Получено 21.11.2018 г.