

УДК 629.423

В. В. Королев, А. Е. Захаров

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Моделирование электроснабжения подвижного состава метрополитена

Рассматривается моделирование электроснабжения подвижного состава метрополитена. В статье представлена схема электроснабжения участка метрополитена, на основе которой разработана модель в пакете Simulink программы Matlab. В качестве нагрузки для преобразовательных устройств тягового тока используется подмодель вагона подвижного состава, которая учитывает не только параметры вагона, но и позволяет имитировать систему управления им и режимы работы. Для исследования переходных процессов в модели вагона запрограммированы различные состояния цепей управления тяговыми двигателями. Параметры тяговых электродвигателей в модели рассчитаны исходя из нагрузочной способности вагона. Представлены полученные в результате моделирования зависимости частоты вращения, токов и момента тягового электродвигателя, а также скоростные и нагрузочные характеристики вагона. Проанализированы результаты моделирования и даны рекомендации по улучшению электроснабжения подвижного состава метрополитена.

Метрополитен, трансформатор, подстанция, вагон, тяговый электродвигатель

В настоящее время в Петербургском метрополитене функционирует 69 станций, и на каждой из них имеется своя подстанция. Актуальность рассматриваемой темы обусловлена важностью обеспечения надежного и бесперебойного электроснабжения подвижного состава и прочих устройств метрополитена. Целью статьи является разработка модели подвижного состава (вагона) метрополитена и анализ происходящих электрических процессов в ее устройствах.

Упрощенная функциональная схема электроподстанции метрополитена приведена на рис. 1 [1],

где обозначены ТСК – трансформатор силовой для кремниевого выпрямителя; КВ – кремниевый выпрямитель; МТЗ – устройство максимальной токовой защиты; ТЭД – тяговый электродвигатель; ТС – трансформатор силовой; ТО – трансформатор освещения; ТСЦБ – трансформатор сигнализации, централизации и блокировки; АТДП – автоматика и телемеханика движения поездов; СН – силовая нагрузка; ЩСН – щит силовой нагрузки; ЩОН – щит осветительных нагрузок; ОН – осветительная нагрузка; АКБ – аккумуляторная батарея.

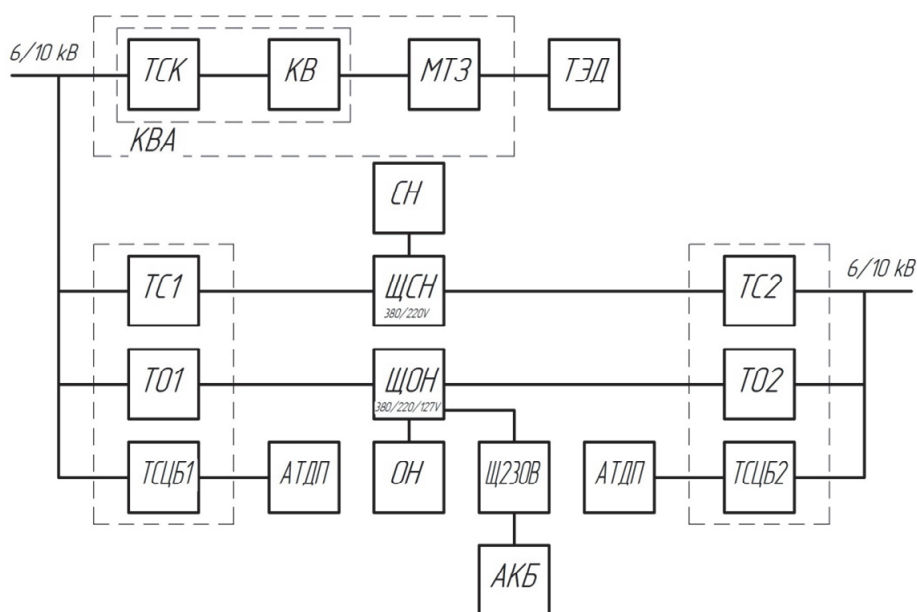


Рис. 1

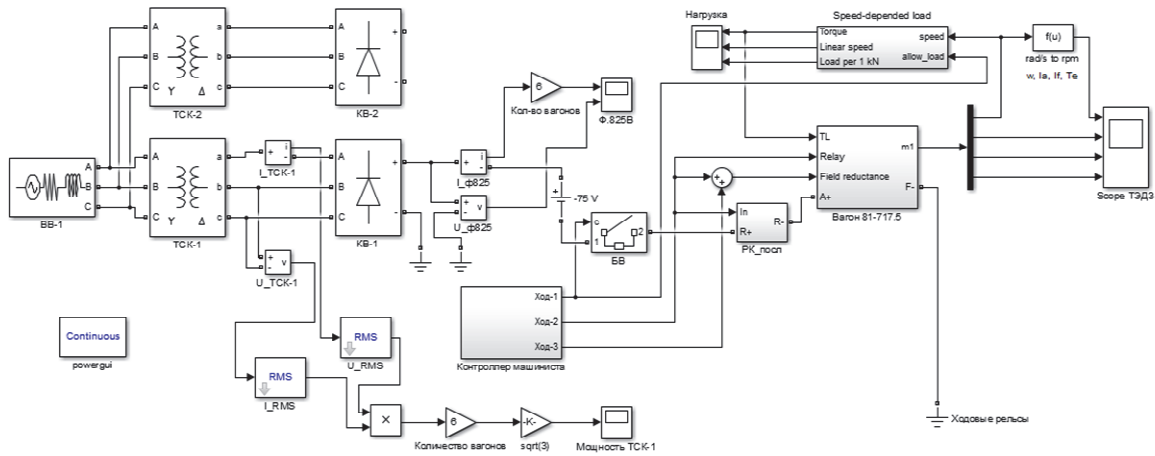


Рис. 2

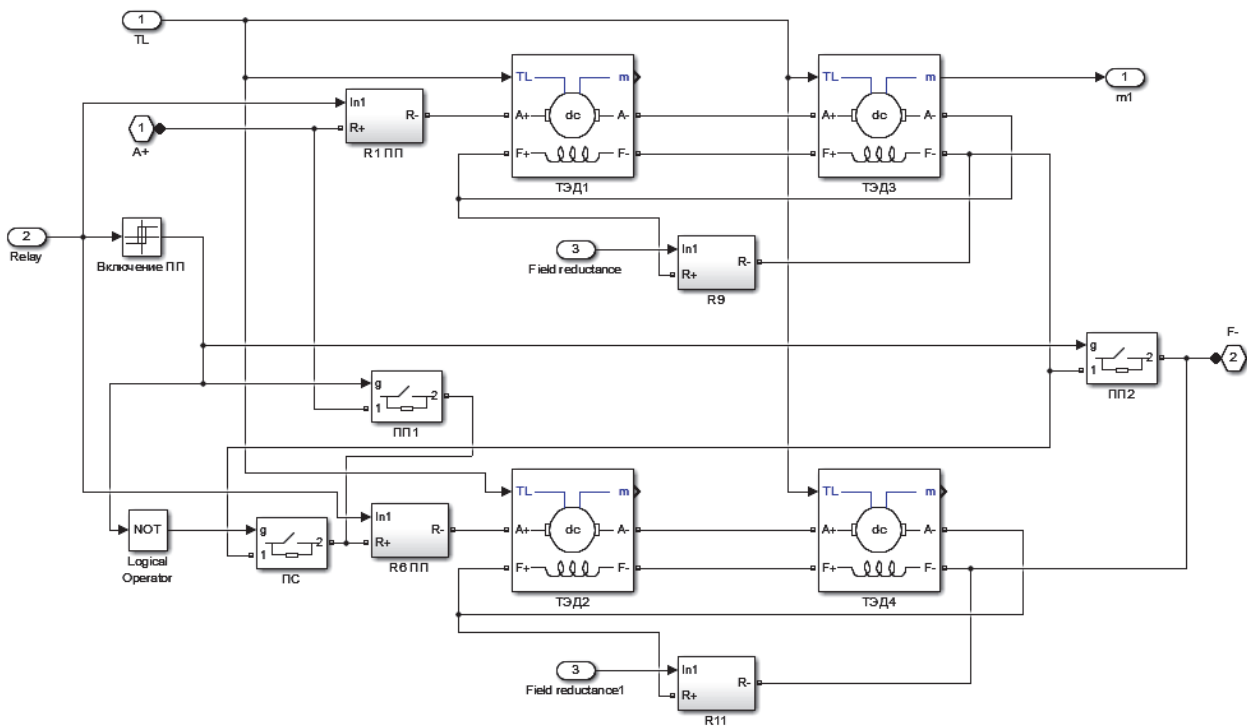


Рис. 3

Нагрузкой кремниевого выпрямительного агрегата (КВА) служат тяговые электродвигатели подвижного состава (ТЭД).

Устройства АТДП предназначены для контроля движения поездов, для обеспечения работы системы АЛС-АРС (автоматической локомотивной сигнализации с автоматическим регулированием скорости), сигнализации и блокировки.

Модель цепи тягового тока тяговой подстанции представлена на рис. 2 [1].

На двигатели вагона подается напряжение 750 В. Общий вид подсистемы вагона представлен на рис. 3.

Выключатели ПС, ПП1 и ПП2 предназначены для переключения двигателей с последовательно-параллельного на последовательно-параллельное соединение. Изначально выключатели ПП1 и ПП2 разомкнуты, а выключатель ПС замкнут. Блок Relay, названный на схеме «Переключение на ПП», представляет собой реле, подающее на выход значение «1», если значение на входе больше или равно 18, и значение 0 в противном случае. После подачи значения «18» на вход Relay подсистемы выключатели ПП1 и ПП2 замкнутся, а блок Logical Operator инвертирует значение «1» в значение «0», и выключатель ПС разомкнется. Таким образом, группы двигателей ТЭД1, ТЭД3 и ТЭД2,

ТЭД4 соединяются параллельно, а двигатели внутри каждой группы – последовательно. Сигнал «18» подается на вход Relay от выхода «Ход-2» блока контроллера машиниста в тот момент времени, когда значение функции на выходе блока Ramp достигнет значения «1».

Для управления подсистемой вагона в модели реализованы функции контроллера машиниста и реостатного контроллера вагонов. Контроллер машиниста представляет собой устройство для управления силовыми цепями вагона. Он состоит из кулачковых контакторов, замыкающих и размыкающих участки силовой цепи вагона. Блоки Step, Ramp и Ramp1 предназначены для задания моментов времени установки контроллера в определенное положение [2]. Блок Saturation ограничивает выходной сигнал блока Ramp до значения 24.

Контроллер машиниста вагонов имеет три положения на ход: Ход-1, Ход-2 и Ход-3, и три на тормоз: Тормоз-1, Тормоз-1А, Тормоз-2, а также нулевое (нейтральное) положение.

Исходя из данных шестивагонного поезда, максимально заполненного пассажирами, была рассчитана нагрузка на тяговый электродвигатель.

Нагрузка на двигатель, зависящая от скорости, моделируется подсистемой speed-depended load. Ее устройство показано на рис. 4.

Эта подсистема имеет два входа: speed, подключенный к выходу m подсистемы вагона, и allow_load, разрешающий или запрещающий подачу нагрузки на двигатель. Далее блок Fsp, названный «рад/с в км/ч», преобразует угловую

скорость вращения вала двигателя в скорость поступательного движения вагона. Затем блок «Удельное сопротивление» рассчитывает удельное сопротивление движению поезда. В конце блок «Момент» рассчитывает момент сопротивления, приходящийся на один двигатель, в зависимости от скорости.

Рассчитанный момент подается на переключатель Switch [2]. В случае, если значение на входе allow_load больше 0, на выход «Torque» подается рассчитанный момент, иначе – значение 0 с блока No_load. Вход allow_load подключен к выходу «Ход-1» подсистемы контроллера машиниста. Таким образом, нагрузка на двигатель подается только после его запуска. В реальности, когда вагон неподвижен, его колеса автоматически затормаживаются пневматическими тормозами, не создавая никакой нагрузки на вал двигателя.

Выходы Torque, Load per 1 kN, linear speed подключены к осциллографу «Нагрузка» и позволяют наблюдать изменение момента (в ньютон-метрах), удельного сопротивления (в ньютонах на килоньютоны) и скорости вагона (в километрах в час) соответственно с течением времени.

Смоделированный контроллер машиниста устанавливается в положение «Ход-1» в момент времени 0.05 с. Одновременно с этим на двигатели набрасывается нагрузка, смоделированная с помощью подсистемы speed-depended load. В положении «Ход-1» замыкается выключатель БВ, подающий силовой ток на подсистему вагона. Пусковые реостаты при этом полностью введены, а двигатели соединены последовательно. Общее сопротивление пусковых реостатов составляет 4.263 Ом.

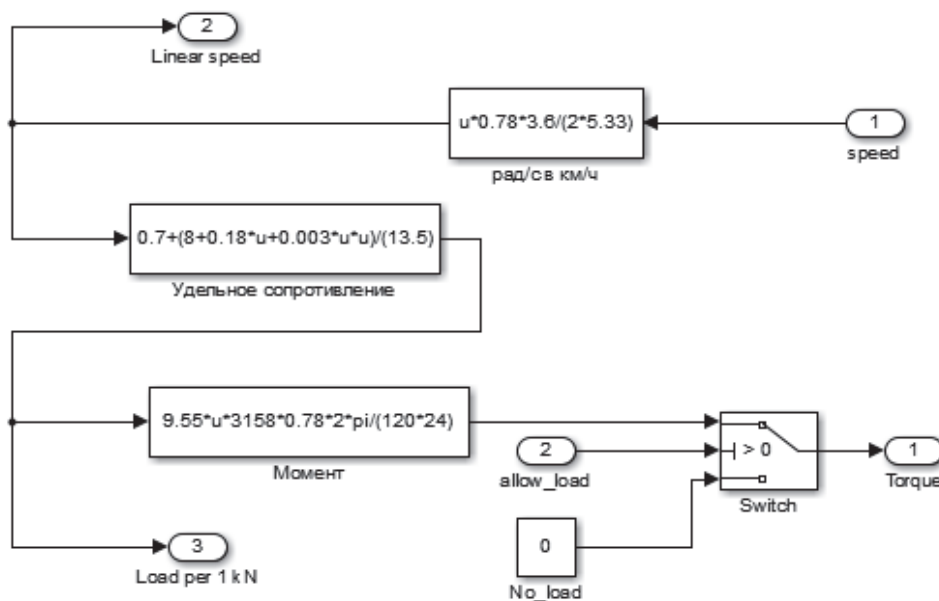


Рис. 4

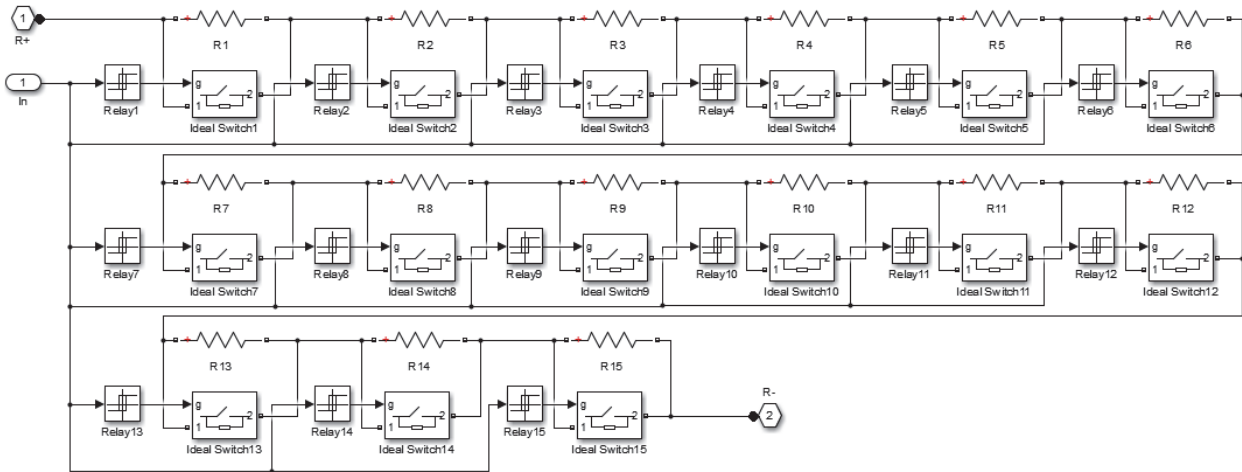


Рис. 5

На рис. 5 представлена модель подсистемы пусковых реостатов с релейными контакторами «РК_посл», которые используются при последовательном соединении двигателей. Блоки Relay1–Relay15 настроены на срабатывание при достижении входным сигналом (в данном случае – сигналом от входа In) уровня 1–16 соответственно. На вход In подсистемы подается сигнал от блока Ramp подсистемы контроллера машиниста. Выходная функция этого сигнала начинает возрастать со скоростью 9 ед./с в момент времени $t_2 = 2$ с, моделируя перестановку контроллера в положение «Ход-2». В тот момент времени, когда функция достигнет значения 1, в подсистеме резисторов R9 и R11 в подсистеме вагона сработают реле «28 %», отключив выключатель «28 %». Ослабление возбуждения изменится с 28 до 100 %. Когда функция Ramp достигнет значения 2, в подсистеме пускового реостата «РК_посл» выключатель Ideal Switch1 замкнется, зашунтировав и выведя первую ступень R1. В момент времени, когда выходная функция блока Ramp достигнет значения 3, выключатель Ideal Switch 2 зашунтирует вторую ступень R2. Таким образом, в течение приблизительно 2 с все ступени этого реостата будут выведены полностью.

В момент времени $t_3 = 9$ с моделируется установка контроллера в положение «Ход-3». К этому времени двигатели уже будут соединены последовательно-параллельно и реостатный контроллер будет выведен полностью. Сигнал от выхода «Ход-3» блока контроллера машиниста подается на вход Field reductance подсистемы вагона.

Основу модели вагона составляют тяговые двигатели ТЭД1–ТЭД4, моделируемые блоками

DC Machine [2]. Каждый из этих блоков моделирует тяговый двигатель ДК-117ДМ. Подсистема вагона имеет 4 входа: TL (момент нагрузки), A+ (положительная клемма обмотки якоря), Relay (сигнал переключения двигателей с последовательного соединения на последовательно-параллельное) и Field reductance (для улучшения внешнего вида модели этот вход разделен на 4 одинаковых входа Field reductance1 – Field reductance4) и 2 выхода – m (параметры двигателя DC Machine2) и F- (отрицательная клемма обмотки возбуждения). Реальным аналогом входа A+ является токоприемник, а выхода F- – ходовой рельс. Были рассчитаны параметры двигателя.

Подсистемы «R1 ПП» и «R6 ПП» предназначены для регулирования силового тока при последовательно-параллельном соединении групп двигателей. Устройство подсистемы «R1 ПП» представлено на рис. 6.

Изначально выключатель Ideal Switch замкнут, и ток течет через него. Когда значение на входе реле «Вкл. R1 ПП» станет равно 18 (в этот же момент реализуется переключение соединения двигателей с последовательного на последовательно-параллельное), реле сработает и отключит выключатель Ideal Switch. Ток начнет течь через резисторы R1–R4. Затем, когда значение на входе In1 подсистемы станет равно 20, сработает реле «Выкл. R1», выключатель Ideal Switch1 замкнется и зашунтирует резистор R1. Далее поочередно срабатывают реле «Выкл. R2» – «Выкл. R4», выводя все ступени R2–R4.

Подсистемы R9 и R11 предназначены для регулирования ослабления возбуждения тяговых двигателей. Устройство подсистемы R9 показано на рис. 7. Резисторы «28 % пуск» сопротивлением

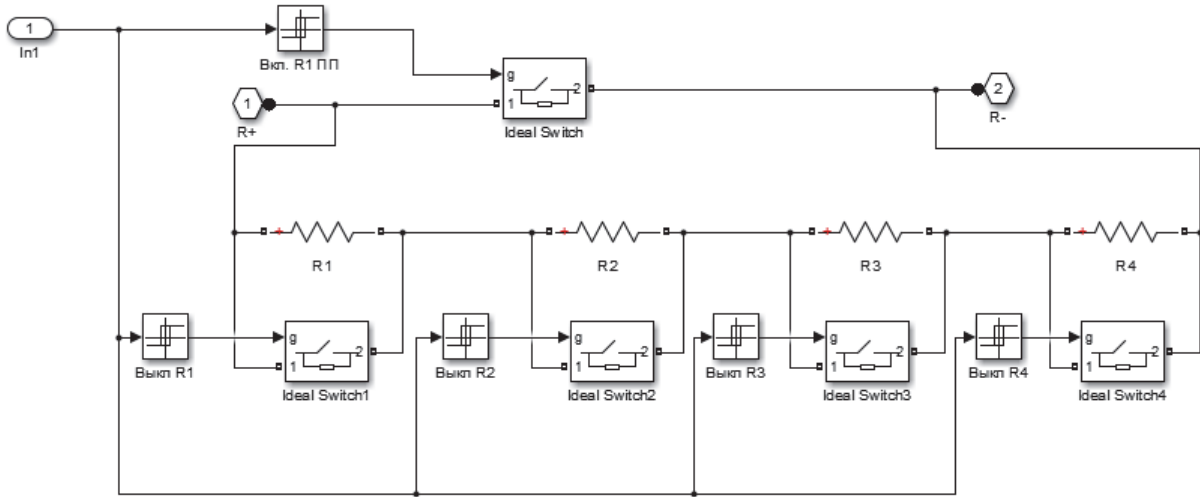


Рис. 6

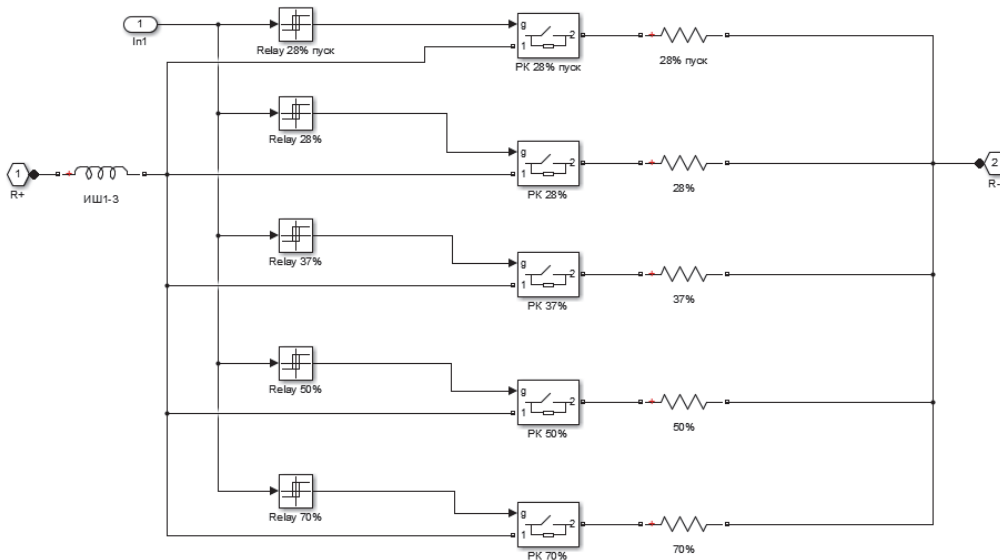


Рис. 7

0.023 Ом каждый предназначены для включения ослабления возбуждения в момент пуска до уровня 28 %. Каждый из этих резисторов управляется реле и выключателем. Резисторов ослабления поля до 28 % в модели два, так как такое ослабление поля используется дважды: в момент пуска двигателей на положении контроллера машиниста «Ход-1» и при последовательно-параллельном соединении двигателей с полностью выведенными пусковыми реостатами в положении «Ход-3».

Изначально реле «Relay 28 % пуск» включено. Когда входной сигнал на In1 достигнет значения 1, оно отключится, подав сигнал на выключатель «ПК 28 % пуск». Ток через резистор «28 % пуск» течь перестанет, отключив таким образом ослабление возбуждения. В момент достижения сигналом со входа In1 значения 27 включится реле «Relay 70 %», и часть тока пойдет через резистор «70 %» в обход обмотки возбуждения, созда-

вая ослабление возбуждения на уровне 70 %. При достижении сигналом на входе In1 значения 28 включится реле «Relay 50 %», подключив резистор «50 %». Сопротивление резистора «50 %» подобрано так, чтобы при параллельном включении с резистором «70 %» через оба этих резистора проходило 50 % тока якоря, а оставшиеся 50 % продолжали идти через обмотку возбуждения.

На выход *m* подсистемы вагона подаются следующие параметры с вывода *m* блока ТЭДЗ: скорость вращения вала двигателя (в радианах в секунду), ток обмотки якоря и возбуждения (в амперах), электромагнитный момент (в ньютон-метрах). Для перевода скорости вращения из радиан в секунду в обороты в минуту используется блок Fcp (в модели он назван «rad/s to rpm»). Он реализует перевод скорости вращения, выраженной в радианах в секунду, в обороты в минуту. Графики изменения параметров, полученных на выходе *m* подсистемы, наблюдаются с помощью осциллографа (блок Scope ТЭДЗ).

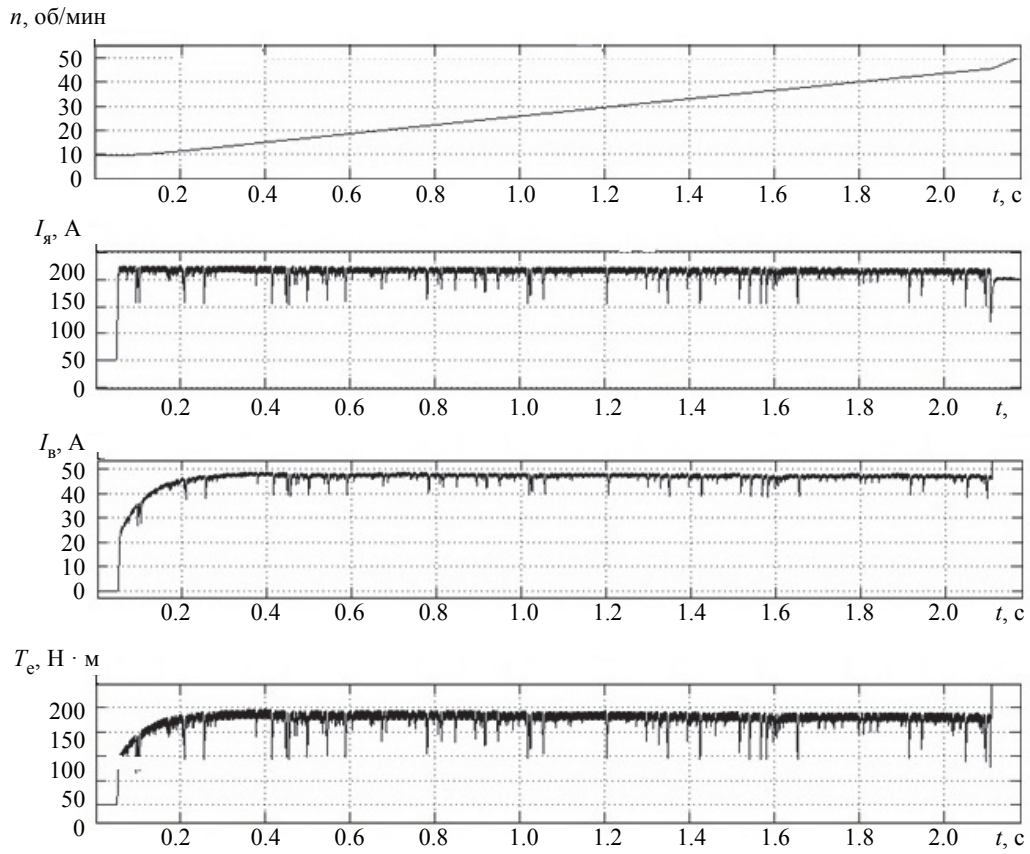


Рис. 8

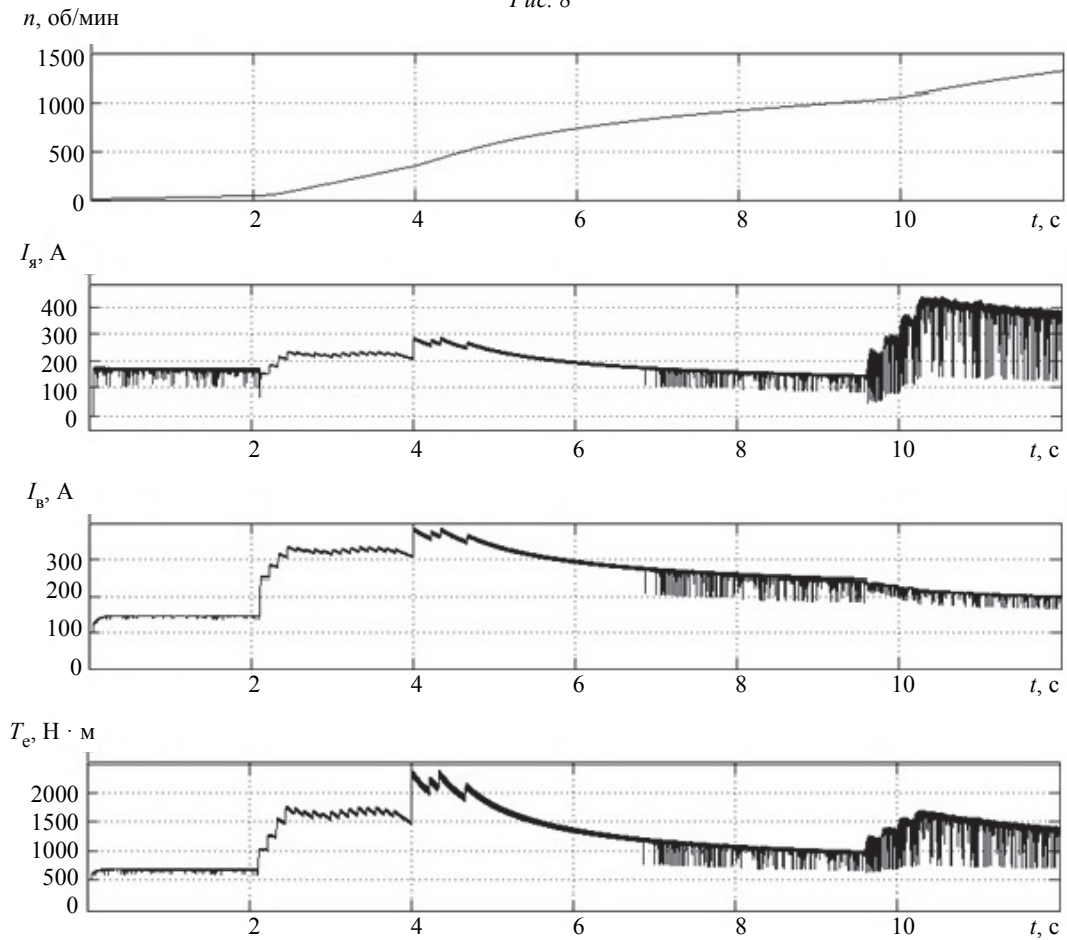


Рис. 9

В результате моделирования получены графики мощности на обмотке НН трансформатора ТСК-1; тока и напряжения фидера 825 В; скорости вращения, тока якоря, тока возбуждения и электромагнитного момента двигателя ТЭДЗ; момента сопротивления, скорости вагона и удельного сопротивления.

На рис. 8 представлены графики изменения скорости вращения n тягового двигателя (рис. 8, а), тока якоря $I_{\text{я}}$ (рис. 8, б), тока возбуждения $I_{\text{в}}$ (рис. 8, в) и электромагнитного момента $T_{\text{е}}$ (рис. 8, г) в промежутке времени 0...2.2 с), а на рис. 9 (а-г) – те же графики в промежутке времени 0...12 с.

По графикам видно, что пусковой ток через обмотку якоря достигает 170 А, причем нарастает он практически моментально. Это связано с тем, что постоянная времени якоря равна $T_{\text{я}} = L_{\text{я}}/R_{\text{я}} = 0.03$ с ($L_{\text{я}}$ и $R_{\text{я}}$ – индуктивная и активная составляющие обмотки якоря электродвигателя). Так как в обмотку возбуждения включен индуктивный шунт, то ее постоянная времени гораздо больше, и поэтому ток обмотки возбуждения возрастает в течение 0.2 с до значения 48 А. Скорость вращения якоря при этом растет медленно, за 2 с достигнув значения 50 об/мин.

В момент времени 2.1 с происходит отключение ослабления поля возбуждения. Это сопровождается резкими скачками на графиках момента и тока. С момента времени 2.1 с происходит выведение ступеней пусковых реостатов, что сопровождается ступенчатым ростом токов и момента на валу. При этом токи возрастают до максимального значения 230 А, а скорость начинает расти существенно быстрее.

В момент времени 4 с происходит переключение двигателей с последовательного на последовательно-параллельное соединение, что приводит к просадке тока и момента. График скорости вращения при этом замедляет свой рост, однако после начала вывода пусковых реостатов он снова начинает расти.

В момент времени 9.5 с происходит включение ослабления возбуждения. В этот момент ток возбуждения падает, а ток якоря существенно возрастает. При максимальном действии ослабления возбуждения ток якоря достигает 450 А.

После вывода пусковых реостатов момент и токи начинают снижаться, а скорость вращения стремится к установившемуся значению.

На рис. 10 представлены графики момента нагрузки на 1 двигатель $M_{\text{н}}$ (рис. 10, а), скорости вагона $v_{\text{в}}$ (рис.10, б) и удельной нагрузки на одну ось $W_{\text{о}}$ (рис. 10, в).

По этим графикам можно оценить динамику вагона. Так, момент нагрузки на один двигатель в начальный момент равен примерно 67 Н·м и затем возрастает с ростом скорости: при увеличении скорости до 27 км/ч момент нагрузки возрастает на 30 %. Скорость вагона в первые 2 с растет медленно, и лишь в момент времени 2.1 с начинает возрастать достаточно быстро. За 12 с скорость достигает 37 км/ч. Среднее ускорение вагона, таким образом составляет 0.85 м/с², что не выходит за пределы эргономических норм. Наибольшее ускорение было достигнуто на промежутке 2.1...4 с – там скорость возросла с 2 до 10 км/ч, т. е. на 2.22 м/с. Среднее ускорение на этом про-

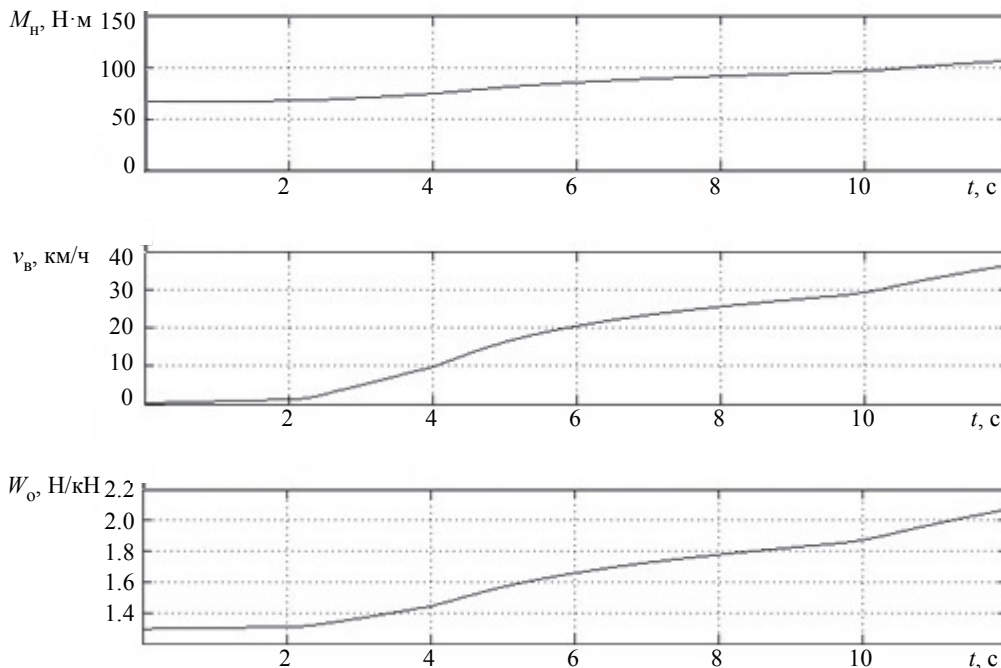


Рис. 10

межутке составило 1.16 м/с^2 , что также укладывается в нормативные пределы.

Таким образом, несмотря на сильные пульсации момента двигателей скорость движения вагона изменяется плавно, а ускорение находится в допустимых пределах. Если же наполненность вагона далека от максимальной, то темп разгона увеличится, так как уменьшится нагрузка на тяговые двигатели.

Для анализа режимов работы электроснабжения метрополитена разработана компьютерная модель как самой подстанции электроснабжения метрополитена, так и подсистемы вагона. Это позволяет наглядно познакомиться с режимами работы подвижного состава метрополитена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королев В. В., Захаров А. Е. Моделирование совмещенной тягово-понижительной подстанции метрополитена // Качество. Инновации. Образование. 2018. № 6. С. 114–119.

2. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2007. 288 с.

V. V. Korolev, A. E. Zaharov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

SIMULATION OF POWER SUPPLY FOR THE MOBILE COMPOSITION OF THE SUBWAY

The article is devoted to the simulation of power supply of the mobile composition of the subway. The paper presents the power supply scheme of the metro area, on the basis of which the model was developed in the SIMULINK package of the MATLAB program. As a load for converting devices of traction current, a submodel of the rolling stock car is used, which takes into account not only the parameters of the car, but also allows to simulate its control system and modes of operation. To study the transients in the model of the railway carriage, different states of control circuits of traction motors are simulated. The parameters of the traction motors in the model are calculated based on the load capacity of the car. Presented obtained as a result of modeling the dependence of the frequency of rotation, current and moment of the traction motor, as well as the speed and load characteristics of the car. Analyzed the simulation results and made recommendations for improving the power supply of rolling stock of the metro.

Subway, transformer, substation, railway carriage, traction electric motor

УДК 621.313

А. Г. Лавров, Е. Н. Попов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Анализ технико-экономических показателей трансформатора при регулировании его напряжения с переменным по величине магнитным потоком

Проводится анализ технико-экономических показателей двухобмоточного понижающего трансформатора, характеризующих его работу после окончания процесса регулирования вторичного напряжения с переменным по величине магнитным потоком в диапазоне 5–15 %. Рассмотрены режимы регулирования вторичного напряжения трансформатора при размещении регулировочной обмотки на стороне высшего напряжения. Проведена количественная оценка влияния режима регулирования при переменном магнитном потоке на основные показатели трансформатора. Выявлены параметры трансформатора, на которые переменный магнитный поток оказывает наибольшее и наименьшее действие. Описаны возможные негативные последствия длительной работы трансформатора в режиме регулирования вторичного напряжения при переменном магнитном потоке. Показана необходимость учета влияния переменного по значению магнитного потока на параметры трансформатора на стадии проектирования и изготовления.

Двухобмоточный трансформатор, регулирование напряжения, переменный магнитный поток, режимы регулирования, технико-экономические показатели, параметры трансформатора

В настоящее время одной из важнейших проблем в электроэнергетике, обеспечивающей электроэнергией промышленные предприятия, установ-

ки и комплексы, является обеспечение стабильности напряжения в системе электроснабжения.