

Имитационная модель электрической железной дороги,
учитывающая перемещение электровозов по участку
Simulation model of electric railway that consider motion of electric
locomotives on the line

Аннотация. Выполнено совершенствование имитационной модели реального времени для прогнозирования электромагнитных, электромеханических и механических процессов, возникающих в электрической железной дороге переменного тока при движении электровозов с грузовыми поездами по участку протяжённостью 150км. Модель позволяет выполнять сравнительную оценку схемных решений по повышению энергетической эффективности электровозов, а также выполнять уточнение целесообразного полигона применения рекуперативного торможения.

Ключевые слова. Электровоз, энергетические показатели, тяговый расчет, переменный ток, Matlab.

Abstract. The are was an upgrade of the real-time simulation model for forecasting of electro-magnetical, electro-mechanical and mechanical processes in alternating current electrical railway with freight trains carried by electric locomotives on main line with length 150 km. That model allow to compare technical solutions that aimed to increase energetic effectiveness of electric locomotives and clarify operating domain for using of regenerative braking.

Key words. Electric locomotive, energetic parameters, traction calculation, alternating current, Matlab.

В настоящее время для оценки возможности повышения массы грузовых

поездов при увеличенном числе секций электровозов, а также для оценки эффективности схемных решений по совершенствованию энергетических характеристик электровозов используют не достаточно совершенные математические модели, не учитывающие работу, совершаемую электровозами по перемещению грузового поезда при движении по типовому профилю.

В связи с этим рассматриваются результаты работы по совершенствованию программно-аппаратного комплекса реального времени созданного на кафедре «Электропоезда и локомотивы» МИИТа [2, 3], выполняющего моделирование электромагнитных процессов в электрической железной дороге переменного тока. С этой целью структура комплекса была дополнена блоками, позволяющими имитировать электромеханические, механические и электроэнергетические процессы, происходящие при движении электровозов по достаточно протяжённому участку. Выбор такого участка протяжённостью 150км с холмистым профилем типа III был выполнен в соответствие с «Методическими указаниями» [1].

Программно-аппаратный комплекс дополнен блоками позволяющими при имитации движения двух электровозов с грузовыми поездами определяются такие энергетические показатели, как мгновенные значения потребляемой активной, реактивной и полной энергии; коэффициент мощности, коэффициент реактивной мощности, коэффициенты искажений напряжения и тока на токоприемнике электровоза и удельный расход энергии на тягу поезда. Сравнивая эти показатели для электровозов с типовыми схемными решениями и электровозов, оборудованных новыми схемными решениями, можно дать исчерпывающее заключение об эффективности применения предлагаемого устройства по перечисленным показателям. Аналогичные сравнения можно выполнить и для грузовых поездов повышенной массы с увеличенным числом секций электровозов. Имитационная модель электрической железной дороги, разработанная на кафедре «Электропоезда и локомотивы» МИИТа [2, 3], была реализована в пакете Matlab/Simulink (рис. 1). Она включает в себя модули электростанции (1),

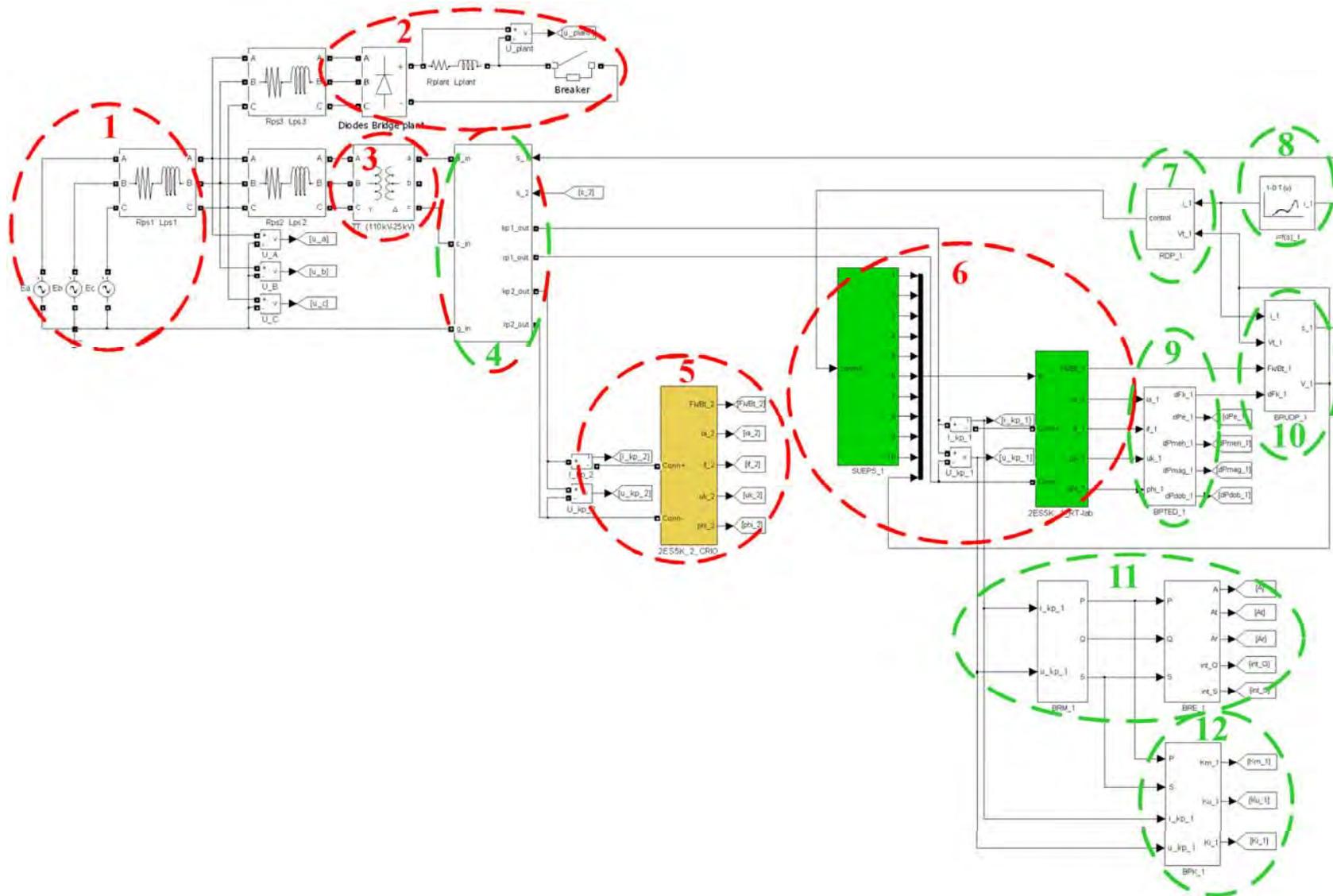


Рис. 1. Реализация имитационной модели СТЭС с движением электровозов в пакете Matlab/Simulink

нетягового потребителя (2), тягового трансформатора подстанции (3), тяговой сети (4) и тяговых приводов электровозов (5 и 6).

Эта модель была дополнена рядом блоков, к которым относятся следующие. Блоки решения уравнения движения поезда (10), профиля пути (8), задания режима работы электровоза (7), расчета потерь в тяговых электродвигателях (9), расчёта активной, реактивной и полной мощностей, а так же расхода электроэнергии на тягу поездов (11), а также определителя показателей качества электрической энергии (12). Так же для учета изменения параметров тяговой сети при движении электровозов, блоки тяговой сети (4) были дополнены блоками переменных сопротивлений (рис. 2). Протяженность участка обращения электровозов составляет 150км. На этом участке располагаются четыре тяговых подстанции, подключенные параллельно к ЛЭП через каждые 50км, соединенные нейтральными вставками длиной 0,2км. Для моделирования движения электровоза с составом по участку необходимо выполнить тяговые расчеты. Исходными данными являются вес состава и профиль пути, а так же ограничение по сцеплению колес с рельсами. Структурная схема моделирования движения электровоза по участку представлена на рис. 3. Рассмотрим вначале задачи, выполняемые блоками, ходящими в эту схему.

В блоке решения уравнения движения поезда (БУДП) (блок 10 на рис. 1), происходит расчет скорости $v_{п}$, пройденного поездом пути s и полезной мощности электровоза $P_{пол}$. С выхода блока величина скорости поезда передается в

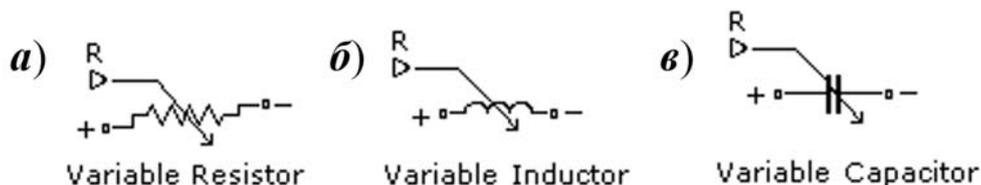


Рис.2. Блоки переменных величин в пакете Matlab – Simulink:

a – переменное сопротивление; *б* – переменная индуктивность; *в* – переменная емкость

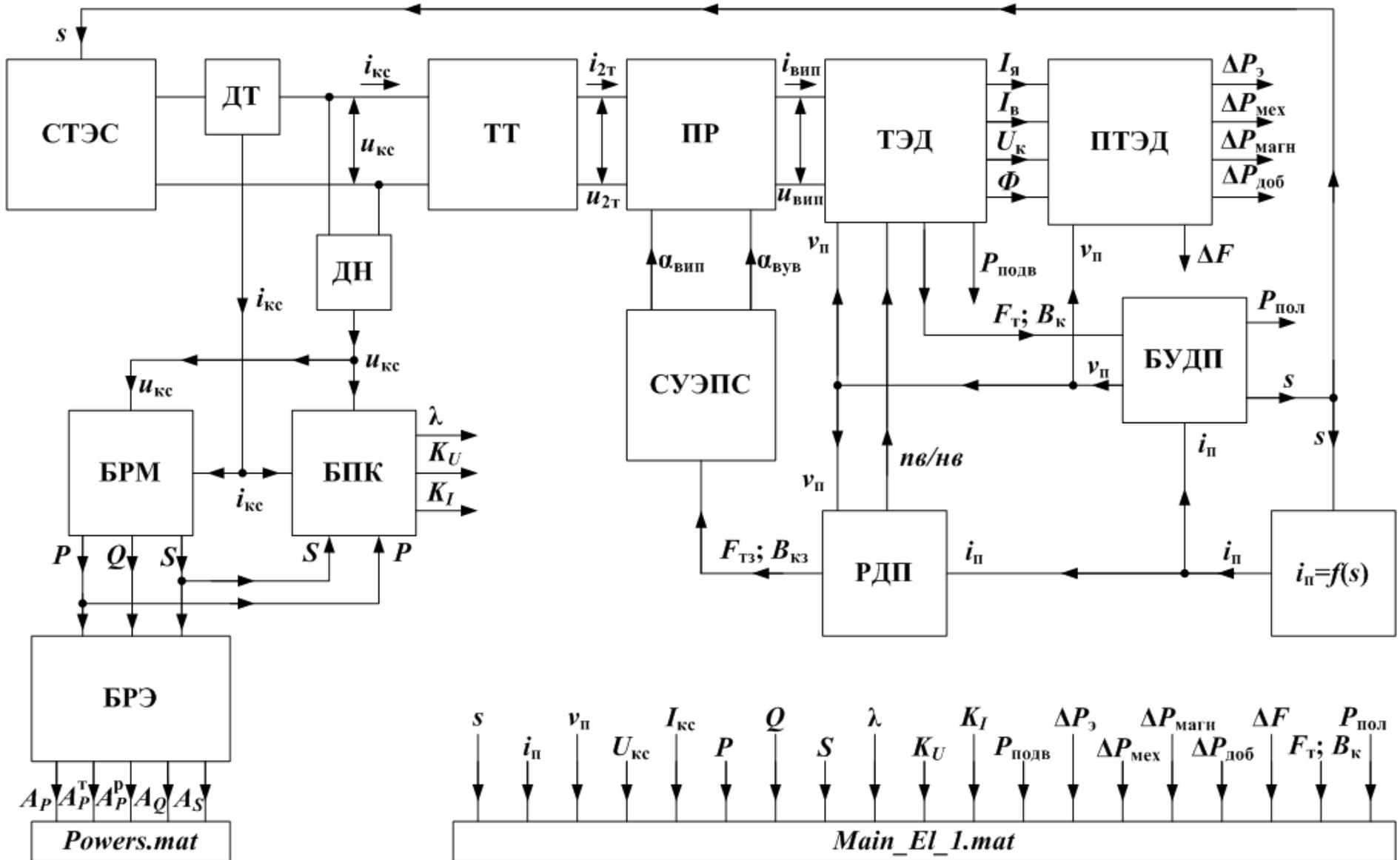


Рис. 3. Структурная схема моделирования движения поезда по фидерной зоне

блоки тяговых электродвигателей (ТЭД) для вычисления величины э. д. с. двигателя e_d , определения потерь мощности в тяговом двигателе (ПТЭД), а так же в блок выбора режима движения поезда (РДП). Информация о величине пройденного поездом пути s передается в блок профиля пути $i_{\text{п}}=f(s)$ для определения профиля пути под поездом, а так же в блок системы тягового электроснабжения (СТЭС) для изменения величин сопротивлений тяговой сети.

Для задания сопротивления движению поезда от профиля, из [1] были взяты характеристики продольных профилей путей типа III (холмистого) в прямом (А1) и обратном (А2) направлении. Они заложены в программный блок $i_{\text{п}}=f(s)$ (блок 8 на рис. 1). На выходе блока получается величина уклона $i_{\text{п}}$, которая передается в БУДП (рис. 3) для определения удельной равнодействующей силы f_d , а так же в блок РДП (блок 7 на рис.1). В последнем, в зависимости от величины уклона $i_{\text{п}}$ и скорости движения поезда $v_{\text{п}}$, осуществляется выбор режима движения электровоза «тяга» или «рекуперация», что сопровождается изменением схемы возбуждения тяговых двигателей «последовательное» или «независимое» (сигнал пв/нв), а так же задание величин силы тяги $F_{\text{кз}}$ или торможения $B_{\text{тз}}$.

Силовые схемы электровозов (блоки (5) и (6) на рис. 1), как и в [2] и [3] представлены блоками тяговых трансформаторов (ТТ), силовых преобразователей (ПР), тяговых электродвигателей (ТЭД), а также новым блоком системы управления электроподвижным составом (СУЭПС) (рис. 3). На вход блока СУЭПС поступают заданные силы тяги $F_{\text{кз}}$ или торможения $B_{\text{тз}}$. На выходе блока получают импульсы управления $\alpha_{\text{вип}}$ и $\alpha_{\text{вув}}$, которые передаются в блок ПР (рис. 3), где распределяются по соответствующим тиристорным плечам выпрямительно-инверторного преобразователя и выпрямительной установки возбуждения.

Блок ТЭД выполняет расчеты напряжения на коллекторах $U_{\text{к}}$, а так же токов якорей $I_{\text{я}}$, возбуждения $I_{\text{в}}$ и магнитных потоков Φ и передает информацию об этих переменных в блок ПТЭД (рис. 3). Так же в этом блоке рассчитываются

силы тяги F_T и торможения B_k , которые передаются в блок БУДП.

Тяговый двигатель электровоза осуществляет превращение подводимой электрической энергии P_k в механическую при работе в режиме тяги и, наоборот, механической энергии движения поезда в электрическую при работе в режиме рекуперативного торможения. В процессе превращения энергии из одного вида в другой часть её рассеивается в окружающее пространство в виде тепла, т. е. теряется. В блоке ПТЭД (блок 9 на рис. 1) вычисляются электрические $\Delta P_э$, механические $\Delta P_{мех}$, магнитные $\Delta P_{магн}$ и добавочные $\Delta P_{доб}$ потери энергии, а так же потери силы тяги ΔF .

Блок СТЭС, включает в себя блоки (1–4) (см. рис. 1). Блоки (1–3), как и в [2] и [3] представляют собой систему первичного электроснабжения, в состав которой входят модели электростанции, линии электропередач, нетягового потребителя и тяговой подстанции. Блок 4 моделирует изменение сопротивлений тяговой сети между тяговыми подстанциями и электровозами, движущимися по межподстанционной зоне. На вход блока поступает пройденный поездом путь s , в зависимости от которого меняются величины сопротивлений конечных элементов тяговой сети.

Процесс движения электровоза по фидерной зоне моделируется следующим образом. В момент времени t_1 (рис. 4, а) электровоз подключен к точке k_n . Перед электровозом находится блок тяговой сети $Z_{тс_n}$ с сопротивлением $Z_{тс}$, соответствующим принятой длине конечного элемента 200 м. Позади электровоза находится переходной блок $Z_{тс_n-1}$. Его продольные сопротивления и индуктивности, а так же поперечные емкости и проводимости равны нулю. В период времени t_1-t_2 , параметры блока $Z_{тс_n-1}$ увеличиваются от нуля до $Z_{тс}$ в соответствии с указанными выше зависимостями от пройденного поездом пути s . Одновременно с этим параметры блока $Z_{тс_n}$, находящегося перед электровозом, уменьшаются от $Z_{тс}$ до нуля. Расчет параметров сопротивлений осуществляется в отдельном программном блоке на основании заложенных в него зависимостей $r_{тс} = f(s)$, $L_{тс} = f(s)$ и $C_{тс} = f(s)$. На блоки тяговой сети не рядом с точкой под-

ключения электровоза, передаются постоянные значения сопротивлений для принятой длины конечного элемента 200 м. Таким образом, суммарное сопротивление всей тяговой сети останется неизменным. В момент времени t_2 (рис. 4, б), когда величины сопротивлений блока $Z_{тс_n}$ достигают нуля, электровоз отключается от точки k_n и подключается к следующей точке k_{n+1} . Поскольку параметры блока $Z_{тс_n}$ стали нулевыми, такое переключение не приводит к возникновению коммутационных процессов и нарушений в работе тяговой сети. В момент времени t_3 электровоз подключен к точке k_{n+1} (рис. 4, в). Снова начинается процесс «перетекания» параметров – уже из блока $Z_{тс_n+1}$ в блок $Z_{тс_n}$. Так электровоз будет перемещаться, пока не достигнет конца фидерной зоны.

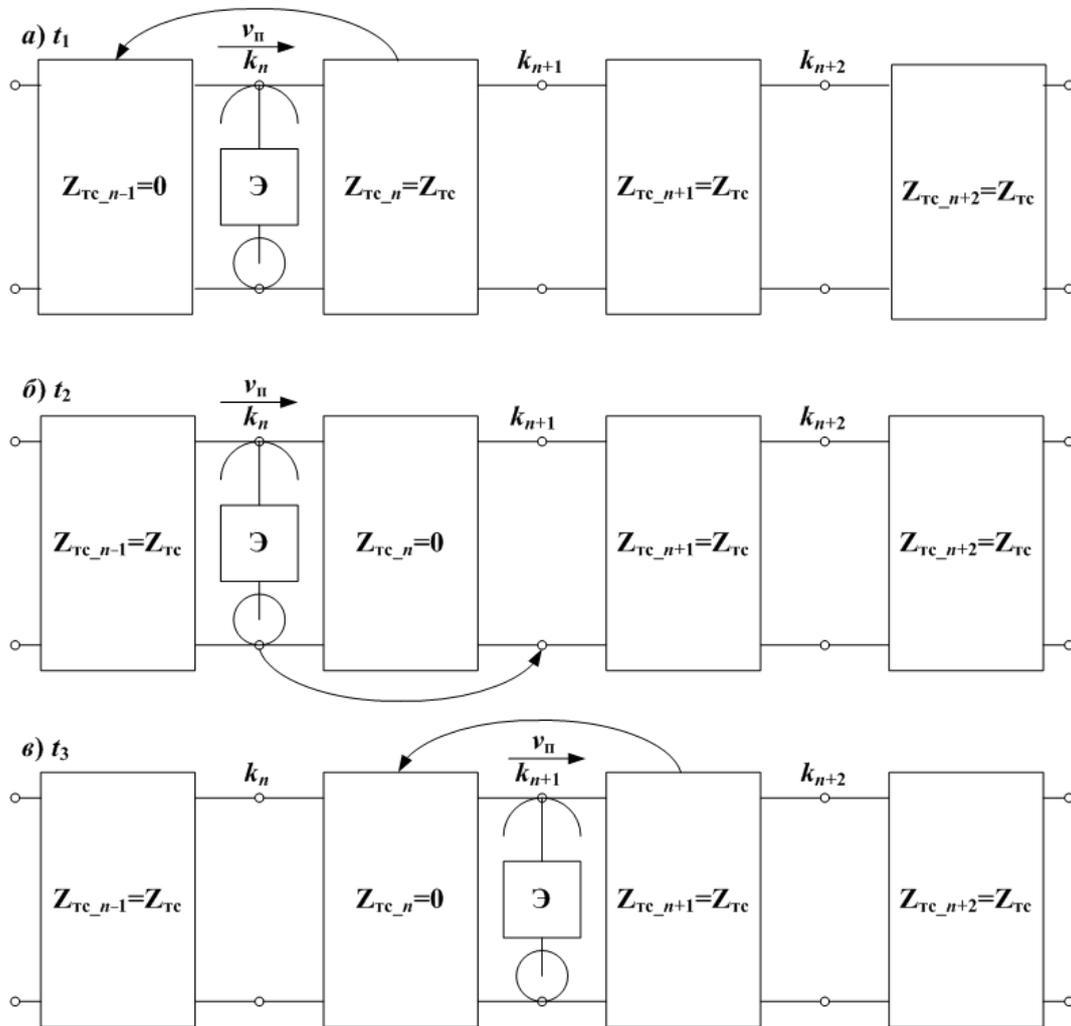


Рис. 4. Моделирование движения электровоза по фидерной зоне

с применением блоков переменных сопротивлений тяговой сети: а – в момент времени t_1 ; б – в момент времени t_2 ; в – в момент времени t_3

Датчики тока (ДТ) и напряжения (ДН), расположенные на выходе блока СТЭС (рис. 3), передают данные в блок расчета мощностей (БРМ), в котором рассчитываются действующие значения тока $I_{\text{кс}}$ и напряжения $U_{\text{кс}}$ на токоприемнике электровоза, а так же величины активной P , реактивной Q и полной S мощностей. После этого полученные величины мощностей на токоприемнике электровоза передаются в блок учета расхода электроэнергии (БРЭ) (рис. 3).

Активная и полная мощности так же передаются в блок расчета показателей качества (БПК) (блок 12 на рис. 1), где рассчитывается коэффициент мощности λ . Так же в этот блок поступают показания с датчиков ДТ и ДН для расчета коэффициентов искажения тока K_I и напряжения K_U при установившемся режиме работы (рис. 3).

В БРЭ (блок 11 на рис. 1) рассчитывается расход активной A_P , реактивной A_Q и полной A_S энергий. При этом активная энергия подразделяется на энергию, затраченную на тягу поезда A_P^T и энергию, отданную в сеть при рекуперативном торможении A_P^P (рис. 3).

В результате совместной работы указанных выше блоков происходит моделирование движения электровозов по участку с учетом всех особенностей этого процесса. В процессе расчета учитываются изменения активного, индуктивного и ёмкостного сопротивлений тяговой сети между электровозами и тяговыми подстанциями; изменения величин напряжения на токоприемниках электровозов; потери энергии в двигателях электровозов; изменение профилей пути под электровозами, а так же режимов ведения грузового поезда по этим профилям.

Это позволяет провести тяговые расчеты и оценивать расходы электрической энергии на тягу поездов, потери энергии при передаче через тяговую сеть, а так же эффективность предлагаемых для внедрения устройств и их влияние на энергетические показатели качества э. п. с.

Разработанная модель позволила выполнить ряд исследований, посвящен-

ных оценке эффективности применения рекуперативного торможения на грузовых электровозах переменного тока серии ЭС5К, возможность устранения его негативных эффектов и повышения энергетических показателей электровозов путём установки на них управляемых бортовых компенсаторов реактивной мощности [4], а также эффективность повышения весов поездов при увеличенном с двух до трёх и даже четырёх числе секций этих электровозов.

Литература

1. Методические указания по определению технико-экономической эффективности новых и усовершенствованных электровозов. – М.: Транспорт, 1986 – 115 с.
2. Савоськин, А.Н. Исследование электромагнитных процессов в электрической железной дороге переменного тока на базе вычислительного комплекса реального времени. / А.Н. Савоськин, А.А. Чучин, Д.И. Болдин, М.В. Телегин // Вестник ВЭЛНИИ. – 2011. – № 1(61). – С. 23 – 38.
3. Савоськин, А.Н. Программно-аппаратный комплекс реального времени для имитационного моделирования электромагнитных процессов в электрических ж. д. переменного тока / А. Н. Савоськин, М. В. Телегин, Д. И. Болдин, И. И. Гарбузов // Университетский научный журнал. – 2013. – №5. – С. 113–119.
4. Савоськин, А.Н. Имитационное моделирование энергетических показателей при движении электровозов переменного тока с бортовыми компенсаторами реактивной мощности по типовому участку электрической железной дороги / А.Н. Савоськин, Ю.М. Кулинич, И.И. Гарбузов // Электротехника. – 2015. – №9. – С. 42 – 49.

Сведения об авторах

Савоськин Анатолий Николаевич

Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II

Рабочий адрес: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9

Ученая степень, звание: д.т.н., профессор

Должность: профессор

Электронная почта: elmechtrans@mail.ru

SPIN-код:

Гарбузов Илья Игоревич

Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II

Рабочий адрес: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9

Ученая степень, звание: к.т.н.

Должность: ассистент

Электронная почта: ilya_garbuzov@smx.ru

SPIN-код: 4649-7040

Savoskin Anatoly Nikolaevich

Moscow State University of Railway Engineering (МИИТ)

Postal address: 127994, Moscow, Obraztsova st., h. 9, b. 9

Garbuzov Ilya Igorevich

Moscow State University of Railway Engineering (МИИТ)

Postal address: 127994, Moscow, Obraztsova st., h. 9, b. 9.