

Ю. С. Кабалык

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА С УЧЁТОМ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ *

Аннотация. Рассматривается процесс создания и исследования модели тягового электродвигателя электровоза в среде компьютерного схемотехнического моделирования. Модель учитывает кривую намагничивания реального двигателя и нелинейную индуктивность обмотки возбуждения, что позволяет более адекватно отражать электромагнитные процессы. Индуктивность обмотки возбуждения определяется на основании наклона кривой намагничивания и параметров полюсов обмотки. Также модель позволяет использовать её при схемотехническом моделировании переходных процессов в силовой электрической цепи электровоза. Было проведено сравнение двух моделей тягового двигателя: в одной учитывалась кривая намагничивания, а в другой реализована линейная модель, в которой индуктивность обмотки возбуждения постоянна. Также было проведено сравнение параметров тягового двигателя из эксплуатации с результатами расчета разработанной модели. Результаты сравнения показали, что использование нелинейной модели позволяет более точно рассчитывать величину тока тягового двигателя.

Ключевые слова: электровоз, тяговый электродвигатель, динамическая индуктивность, кривая намагничивания, имитационное моделирование.

Для цитирования: Кабалык, Ю. С. Моделирование тягового двигателя электровоза с учётом кривой намагничивания / Ю. С. Кабалык // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3. – С. 90–98. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_90.

Введение

При моделировании силовой электрической схемы электровоза одной из важных составляющих является модель тягового двигателя (далее – ТЭД). На электровозах переменного тока применяются ТЭД пульсирующего тока, которые получают питание от диодных или тиристорных выпрямителей. В отличие от двигателей постоянного тока, в таких двигателях обмотка возбуждения имеет постоянное шунтирование, и величина тока в установившемся режиме определяется не только активным сопротивлением цепи и противоэлектродвижущей силой обмотки якоря, но и индуктивностью цепи. Это связано с тем, что пульсирующий характер напряжения приводит к появлению падения напряжения на индуктивном сопротивлении, что изменяет общее сопротивление цепи. Вместе с этим величина индуктивности цепи двигателя не является постоянной и зависит, в частности, от величины тока. Величина индуктивности обмотки возбуждения напрямую зависит от кривой намагничивания – чем больше значение $d\Phi/dI_B$ (отношение приращения магнитного потока Φ к соответствующему приращению тока возбуждения I_B), тем больше индуктивность обмотки возбуждения [1]. Такое изменение индуктивности называют динамической (дифференциальной) индуктивностью (рис. 1).

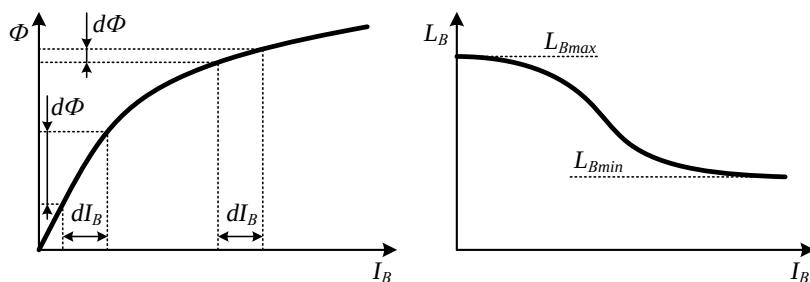


Рис. 1. Пример формы кривой намагничивания (слева) и образованной ею динамической индуктивности обмотки возбуждения (справа)

* Статья подготовлена при поддержке гранта ОАО «РЖД» на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

В работах [2, 3] представлена модель ТЭД, в которой учтена нелинейность кривой намагничивания. В этой модели предлагается учитывать падение магнитного напряжения в стержнях магнитопровода, а также использовать аналитическую зависимость между намагничивающей силой и магнитным потоком. Созданная модель адекватно отражает процесс затухания ЭДС тягового двигателя НБ-514. Вместе с тем в модели можно отметить следующие недостатки: индуктивность обмотки возбуждения линейна; сложность получения аналитической зависимости между намагничивающей силой и магнитным потоком конкретного двигателя; сложность встраивания модели в общую схему электровоза при моделировании в среде схемотехнического моделирования (в модели нет электрических выводов).

В работе [4] представлена модель ТЭД, которая позволяет исследовать переходные и установившиеся процессы. Модель учитывает нелинейности магнитных характеристик главных и добавочных полюсов, влияние вихревых токов и др. В этой модели индуктивность обмотки возбуждения определяется на основании первой производной магнитного потока, который в свою очередь определяется сложной аналитической зависимостью от тока возбуждения. Недостатками модели можно считать её сложность, которая выражена в большом объеме аналитических зависимостей, а также отсутствие приёма её реализации в программах схемотехнического моделирования.

В работе [5] представлена модель ТЭД, которая учитывает нелинейность кривой намагничивания и индуктивности обмотки возбуждения и которая реализована в программе схемотехнического моделирования. В этой модели нелинейность задаётся в виде интерполяционного многочлена. Вместе с тем в работе не раскрывается процесс формирования нелинейностей в модели двигателя при её реализации в программе схемотехнического моделирования.

Существует ряд публикаций, где для моделирования ТЭД используются типовые блоки *DCMachine* программы схемотехнического моделирования *Matlab Simulink*. Эти блоки позволяют реализовать нелинейность параметров путем их задания в виде функции. В работах [6, 7] использованы такие блоки, но в режиме линейной модели – с постоянной индуктивностью обмотки возбуждения. Такая реализация модели ТЭД адекватно отражает электромагнитные процессы только в номинальном режиме его работы. В работе [8] типовый блок *DCMachine* был доработан путем внесения в модель двигателя подсистемы, выполняющей расчёт насыщения магнитопровода в зависимости от тока возбуждения, согласно магнитной характеристике двигателя.

Основная часть

В настоящей работе рассматривается процесс создания модели ТЭД электровоза, которая учитывает кривую намагничивания, имеет нелинейную индуктивность обмотки возбуждения, а также удобна для реализации в программе схемотехнического моделирования.

Математические уравнения напряжений обмоток ТЭД в упрощенном виде можно записать следующим образом:

– Обмотка якоря:

$$u_{оя} = \omega \cdot \Phi \cdot C + i_{оя} \cdot R_{оя} + \frac{di_{оя}}{dt} L_{оя}, \quad (1)$$

где $u_{оя}$ – мгновенное значение напряжения на выводах обмотки якоря, В;

ω – угловая частота вращения якоря, рад/с;

Φ – магнитный поток;

C – конструкционная постоянная, $C = p \cdot N / (2 \cdot \pi \cdot a)$;

$i_{оя}$ – мгновенное значение тока обмотки якоря, А;

$R_{оя}$ – активное сопротивление обмотки якоря, Ом;

$L_{оя}$ – индуктивность обмотки якоря, Гн.

– Обмотка возбуждения:

$$u_{ов} = i_{ов} \cdot R_{ов} + \frac{di_{ов}}{dt} L_{ов}, \quad (2)$$

где $u_{ов}$ – мгновенное значение напряжения на выводах обмотки якоря, В;

$i_{ов}$ – мгновенное значение тока обмотки возбуждения, А;

$R_{ов}$ – активное сопротивление обмотки возбуждения, Ом;

$L_{ов}$ – индуктивность обмотки возбуждения, Гн.

Характер кривой намагничивания влияет на расчет электромагнитных процессов в обоих обмот-

ках: в уравнении (1) из кривой намагничивания используется значение магнитного потока Φ , а в уравнении (2) используется значение индуктивности обмотки возбуждения $L_{ОВ}$, которое зависит от наклона этой кривой. Индуктивность обмотки возбуждения в соответствии с [1] определяется по формуле:

$$L_{ОВ} = 2 \cdot p \cdot w_B \cdot \sigma \cdot \frac{d\Phi}{di_{ОВ}}, \quad (3)$$

где p – число пар полюсов;
 w_B – число витков катушки одного полюса;
 σ – коэффициент рассеяния.

С использованием уравнений (1), (2) и (3) автором статьи была разработана математическая модель коллекторной машины и реализована на языке программирования *Java* в ядре программной среды *REPEAT* [9]. Разработанный блок имеет название «Машина постоянного тока с насыщением» и позволяет моделировать коллекторный двигатель постоянного тока с учетом нелинейности кривой намагничивания и её влиянием на индуктивность обмотки возбуждения. В блоке кривая намагничивания задается в виде массива точек с координатами [ток возбуждения, А; магнитный поток, Вб], а индуктивность обмотки возбуждения рассчитывается в соответствии с формулой (3). Рассмотрим процесс создания модели ТЭД электроваза НБ-514 с использованием упомянутого выше блока и среды математического моделирования.

Для получения численных значений кривой намагничивания можно использовать нагрузочную характеристику – $C_V \Phi = f(I_{ОВ})$, которая часто представлена в документации по тяговому двигателю вместе с электромеханическими характеристиками. В этой характеристике величина $C_V \Phi$ может записываться в виде E/n и измеряться в В/об/мин. Для получения значений магнитного потока необходимо значения E/n разделить на значение конструкционной постоянной $C_V = p \cdot N / (60 \cdot a)$, которая для тягового двигателя НБ-514 равняется $C_V = 11,6$. В табл. 1 приведены значения нагрузочной характеристики (строки 1 и 2) и полученные на её основе значения магнитного потока (строка 3).

Таблица 1

Нагрузочная характеристика и полученные на её основе параметры ТЭД

$I_{ОВ}, А$	0	100	200	300	400	500	600	700
E/n , В/км/ч	0	0,23	0,445	0,64	0,78	0,87	0,93	0,978
Φ , Вб	0	0,0198	0,0384	0,0552	0,0672	0,0750	0,0802	0,0843
$L_{ОВ}$, мГн	17,8	16,7	15,1	10,9	7,0	4,7	3,7	2,9
$I_{ОВ}, А$	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
E/n , В/км/ч	0,978	1,015	1,05	1,08	1,106	1,133	1,155	1,17
Φ , Вб	0,0843	0,0875	0,0905	0,0931	0,0953	0,0977	0,0996	0,1009
$L_{ОВ}$, мГн	2,9	2,7	2,3	2,0	1,9	1,7	1,2	1,2

Для расчета значений индуктивности обмотки возбуждения $L_{ОВ}$ по формуле (3) необходимо принять значение шага по току возбуждения $di_{ОВ}$. В настоящем исследовании это значение было принято равным $di_{ОВ} = 10 А$, а рассчитанные значения индуктивности обмотки возбуждения $L_{ОВ}$ в зависимости от величины тока возбуждения $I_{ОВ}$ представлены в таблице 1, строка 4. Используя значения из таблицы 1 и параметры из [10], была создана модель ТЭД НБ-514Б в среде проектирования и математического моделирования *REPEAT* [9].

На первоначальном этапе исследования требовалось проверить соответствие характеристик, полученных на модели, реальным характеристикам ТЭД. Для этого была собрана схема, содержащая электрическую часть для питания модели тягового двигателя и механическую часть для поддержания постоянства частоты вращения. Схема представлена на рис. 2.

Схема расчета характеристик ТЭД (см. рис. 2) состоит из следующих основных элементов: 1 – блок «Машина постоянного тока с насыщением», в которую записаны параметры ТЭД и точки его кривой намагничивания из табл. 1; 2 – источник сигнала, создающий численное значение напряжения на ТЭД; 3 – управляемый источник напряжения, который подает напряжение на ТЭД; 15 – блок «Источник крутящего момента», который задает механическую нагрузку на валу. Остальные элементы схемы выполняют либо измерительную функцию, либо рассчитывают необходимые параметры.

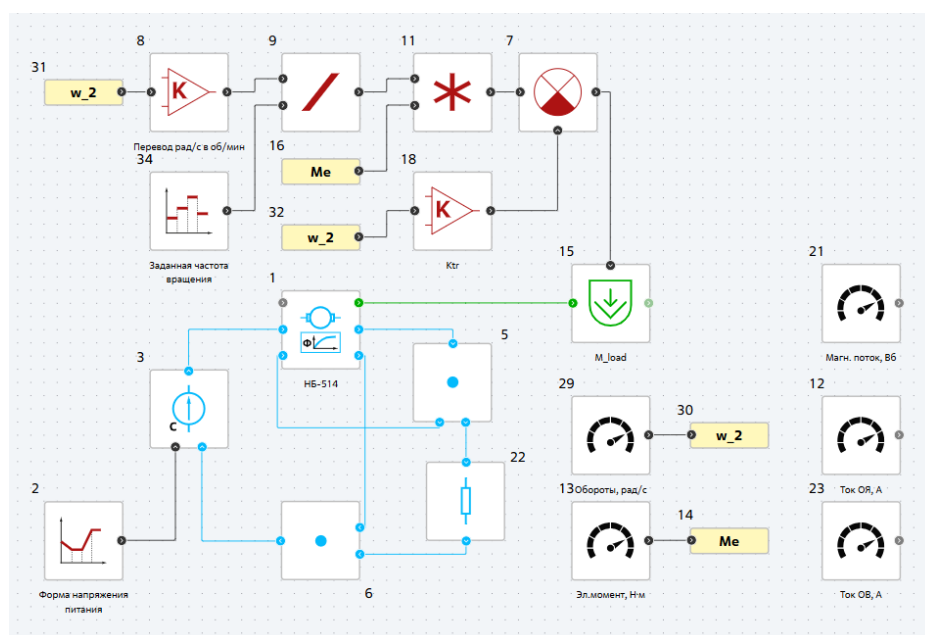


Рис. 2. Схема расчета характеристик модели ТЭД в среде REPEAT

Построение электромеханических характеристик проводилось по точкам, на каждой из которых частота вращения якоря ТЭД была постоянна, а с датчиков снимались значения тока якоря и вращающего момента. Для поддержания постоянства заданной частоты вращения якоря на его валу создавался момент нагрузки, равный

$$M_H = M_{эл} \frac{n_{я}}{n_{я.з}} - K_{тр}, \quad (4)$$

где $M_{эл}$ – электромагнитный момент на валу ТЭД, Н;
 $n_{я}$ – текущая частота вращения якоря, об/мин;
 $n_{я.з}$ – заданная частота вращения якоря, об/мин;
 $\omega_{я}$ – угловая частота вращения якоря, рад/с;
 $K_{тр}$ – коэффициент трения якоря ТЭД, Н/рад/с.

Для понимания целесообразности учета кривой намагничивания при моделировании ТЭД, дополнительно было проведено исследование линейной модели. В такой модели кривая намагничивания представляет собой прямую линию, которая пересекает реальную характеристику в точке номинального тока. В результате, такая модель будет обладать постоянной величиной индуктивности обмотки возбуждения.

В табл. 2 приведены результаты расчета электромеханических характеристик ТЭД на нелинейной (учитывается кривая намагничивания) и линейной (кривая намагничивания линейна) моделях.

Таблица 2

Снятие электромеханических характеристик с моделей ТЭД

Реальный ТЭД			Нелинейная модель ТЭД				Линейная модель ТЭД			
$n_{я}$, об/мин	I_d , А	$M_{вр}$, Н·м	I_d , А	δ , %	$M_{вр}$, Н·м	δ , %	I_d , А	δ , %	$M_{вр}$, Н·м	δ , %
1630	300	1620	287,7	4,10	1657	2,28	478,9	59,63	2727,6	68,37
1155	500	3920	479,3	4,14	3852	1,73	668,3	33,66	5309,5	35,45
1020	650	5750	642,9	1,09	5793	0,75	752,8	15,82	6738,1	17,18
940	810	7772	813,8	0,47	7874	1,31	813,8	0,47	7874,7	1,32
880	1000	10100	991,2	0,88	10132	0,32	866,5	13,35	8927,2	11,61
835	1200	12700	1164,2	2,98	12408,1	2,30	910,7	24,11	9861,4	22,35

Примечание: величина относительной погрешности δ рассчитывалась относительно соответствующих значений реального ТЭД на той же частоте вращения.

Как видно из табл. 2, полученные на нелинейной модели ТЭД значения приближены к реальным. Максимальная погрешность составила не более $\delta = 4,14\%$. Использование же линейной модели наиболее близко совпадает с реальными значениями только в точке 940 об/мин, что соответствует номинальному режиму работы ТЭД. Отклонение от номинального режима приводит к большой погрешности расчета значений – до $\delta = 68,37\%$. Таким образом, можно говорить, что использование нелинейной модели ТЭД, учитывающей реальную кривую намагничивания, позволяет рассчитывать параметры ТЭД с высокой точностью.

После проверки электромеханических характеристик была проведена проверка работы модели ТЭД при питании от выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП). Для этого линейная и нелинейная модели подключались к одному ВИП, который работал на четвертой зоне регулирования с одинаковыми углами открытия тиристорov. Изменение тока якоря осуществлялось изменением частоты вращения якоря. Для идентичности условий моделирования частоты вращения якорей двух моделей ТЭД были одинаковыми на каждом этапе сравнения. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

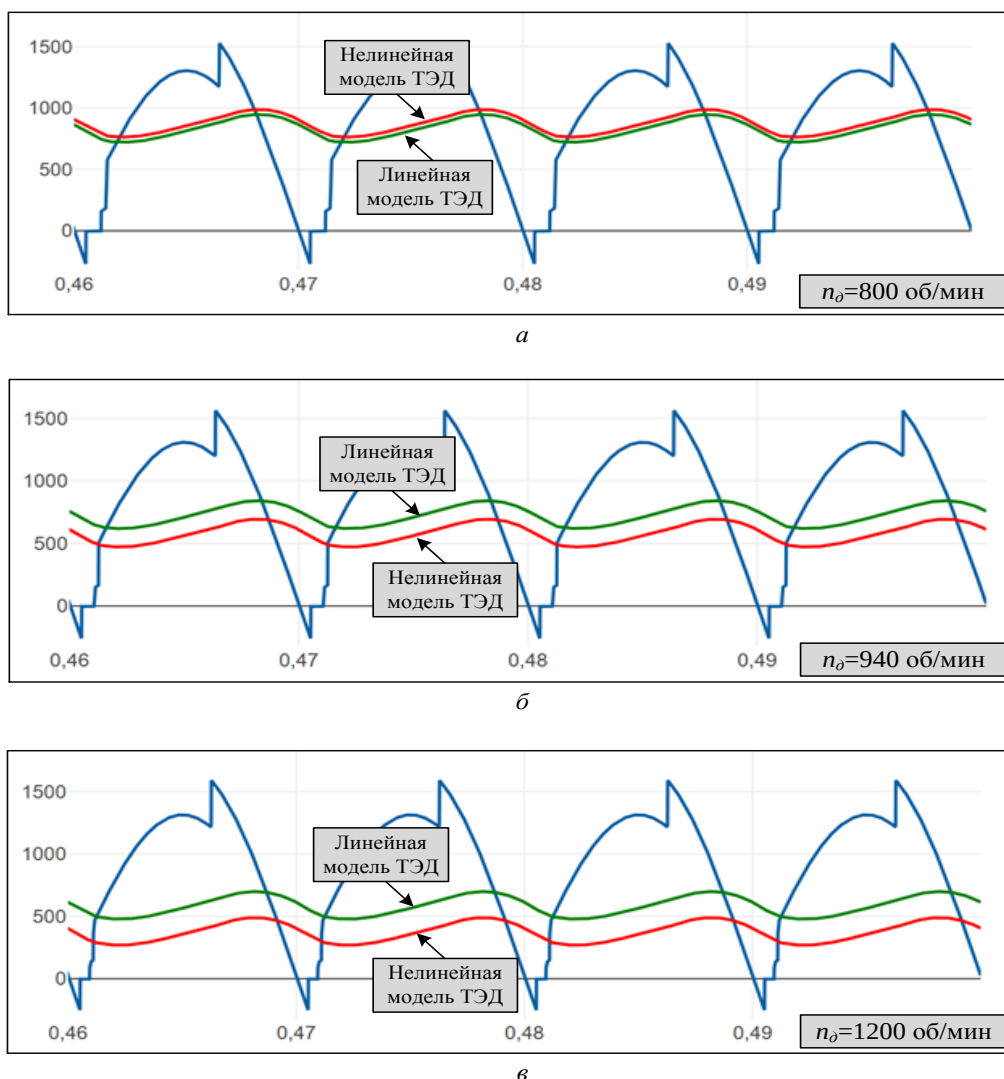


Рис. 3. Моделирование работы ТЭД при питании от ВИП на 4-й зоне регулирования с напряжением $U_d = 1000$ В:

а – $I_{\text{днм}} = 875$ А, $I_{\text{олм}} = 835$ А, $n_{\text{днм}} = n_{\text{олм}} = 800$ об/мин;

б – $I_{\text{днм}} = 584$ А, $I_{\text{олм}} = 730$ А, $n_{\text{днм}} = n_{\text{олм}} = 940$ об/мин;

в – $I_{\text{днм}} = 382$ А, $I_{\text{олм}} = 587$ А, $n_{\text{днм}} = n_{\text{олм}} = 1200$ об/мин

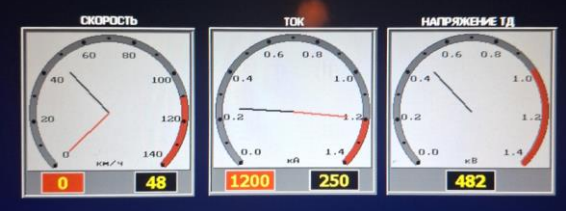
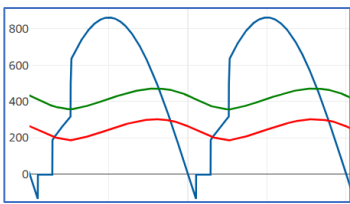
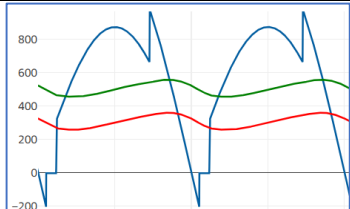
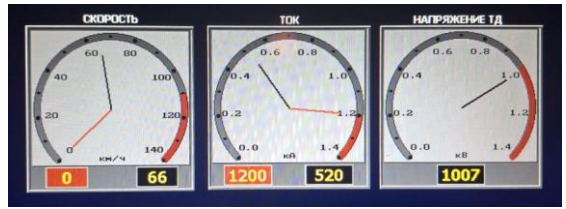
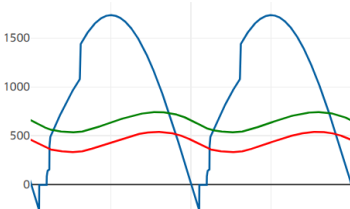
Как видно из осциллограмм на рис. 3, при равенстве величины напряжения на двигателе линейная и нелинейная модели формируют разное значение тока. Причем при относительно низкой частоте вращения двигателя – ток больше в нелинейной модели ТЭД, а при высокой частоте вращения – ток

больше в линейной модели. Разницу в величине тока можно объяснить тем, что в нелинейной модели при больших значениях тока снижается индуктивность обмотки возбуждения. При пульсирующем характере напряжения снижение величины индуктивности приводит к снижению общего сопротивления всех обмоток двигателя и, как следствие, к увеличению величины тока ТЭД. При низких же значениях тока (из-за большой частоты вращения и высокой противоэлектродвижущей силы якоря) индуктивность обмотки возбуждения нелинейной модели увеличивается, что приводит к обратному: увеличению общего сопротивления всех обмоток двигателя и как следствие – снижению величины тока ТЭД. Кроме того, на величину тока влияет противоэлектродвижущая сила якоря, которая также зависит от кривой намагничивания.

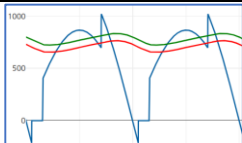
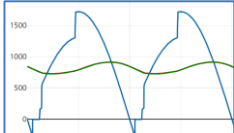
Для проверки адекватности реализованной нелинейной модели ТЭД было проведено сравнение результатов моделирования с результатами натурной поездки электровоза 3ЭС5К. В качестве источника натуральных были выбраны результаты отображения информации о состоянии электрооборудования, полученные от МСУД электровоза 3ЭС5К при вождении грузового состава. Сравнение происходило следующим образом. Во время поездки были сделаны фотографии показания на Блоке индикации МСУД. Затем для нелинейной и линейной моделей задается частота вращения якоря и напряжение ТЭД, соответствующие экспериментальным данным. Сравнение производилось по величине действующего тока якоря ТЭД. Результаты сравнения представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение реальных параметров ТЭД в эксплуатации и результатов моделирования ТЭД

№ п/п	Экспериментальные данные	Данные, полученные путем моделирования	Ошибка δ^* , %
1	 Скорость электровоза $V = 48$ км/ч Напряжение ТЭД $U = 482$ В Ток ТЭД $I = 250$ А	 Напряжение ТЭД $U = 483$ В Ток ТЭД (нелин. модель) $I = 253$ А Ток ТЭД (лин. модель) $I = 421$ А	$\delta_{\text{нм}} = 1,2$ $\delta_{\text{лм}} = 68,4$
2	 Скорость электровоза $V = 47$ км/ч Напряжение ТЭД $U = 570$ В Ток ТЭД $I = 340$ А	 Напряжение ТЭД $U = 571$ В Ток ТЭД (нелин. модель) $I = 307$ А Ток ТЭД (лин. модель) $I = 507$ А	$\delta_{\text{нм}} = 9,7$ $\delta_{\text{лм}} = 49,1$
3	 Скорость электровоза $V = 66$ км/ч Напряжение ТЭД $U = 1007$ В Ток ТЭД $I = 520$ А	 Напряжение ТЭД $U = 1007$ В Ток ТЭД (нелин.модель) $I = 444$ А Ток ТЭД (лин.модель) $I = 645$ А	$\delta_{\text{нм}} = 14,6$ $\delta_{\text{лм}} = 24,0$

Окончание табл. 3

№ п/п	Экспериментальные данные	Данные, полученные путем моделирования	Ошибка δ^* , %
4	 Скорость электровоза $V = 29$ км/ч Напряжение ТЭД $U = 546$ В Ток ТЭД $I = 680$ А	 Напряжение ТЭД $U = 546$ В Ток ТЭД (нелин. модель) $I = 710$ А Ток ТЭД (лин. модель) $I = 779$ А	$\delta_{\text{нм}} = 4,4$ $\delta_{\text{лм}} = 14,6$
5	 Скорость электровоза $V = 47$ км/ч Напряжение ТЭД $U = 910$ В Ток ТЭД $I = 830$ А	 Напряжение ТЭД $U = 913$ В Ток ТЭД (нелин. модель) $I = 820$ А Ток ТЭД (лин. модель) $I = 817$ А	$\delta_{\text{нм}} = 1,2$ $\delta_{\text{лм}} = 1,6$

* $\delta_{\text{нм}}$ – ошибка при использовании нелинейной модели ТЭД; $\delta_{\text{лм}}$ – ошибка при использовании линейной модели ТЭД.

Как видно из табл. 3, при всех случаях экспериментальных данных, нелинейная модель ТЭД более адекватно отражает величину тока чем линейная модель. Ошибка по току двигателя при использовании нелинейной модели составила 1,2–14,6 %, а при использовании линейной модели – 1,6–68,4 %. При этом можно заметить, что ошибка по току двигателя зависит не только от действующего значения тока, но и от других параметров: частота вращения и зона регулирования. Само наличие ошибки для нелинейной модели можно объяснить следующими причинами: в модели не учитывается нелинейность других обмоток ТЭД; сравнение производилось по действующим значениям без учета кривой напряжения (осциллограммы); параметры сглаживающего реактора приняты линейными; в модели не учитываются магнитные и дополнительные потери, а также другими особенностями модели.

Выводы

Разработана модель ТЭД электровоза, которая учитывает кривую намагничивания. Модель используется в среде схемотехнического моделирования и позволяет исследовать электромагнитные переходные процессы в силовой цепи электровоза в различных режимах. Разработанная модель с достаточной точностью воспроизводит характеристики ТЭД серии НБ-514. Проведенное сравнение с экспериментальными данными свидетельствует о достаточной точности расчета действующего значения тока с использованием модели ТЭД, учитывающей нелинейность кривой намагничивания. При этом также было проведено сравнение нелинейной и линейной моделей ТЭД, которое показало, что использование нелинейной модели более адекватно отражает процессы, происходящие в реальном ТЭД.

Список литературы

- 1 Проектирование тяговых электрических машин : учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / М. Д. Находкин, Г. В. Василенко, В. И. Бочаров, М. А. Козорезов ; под редакцией М. Д. Находкина. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1976. – 624 с.
- 2 Кулинич, Ю. М. Моделирование работы тягового двигателя пульсирующего тока / Ю. М. Кулинич, С. А. Шухарев, Д. Ю. Дроголов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2019. – Т. 78, № 5. – С. 313–319. – DOI 10.21780/2223-9731-2019-78-5-313-319.

References

- 1 Design of electric traction machines : textbook for Universities of railway transport / M. D. Nakhodkin, G. V. Vasilenko, V. I. Bocharov, M. A. Kozorezov ; edited by M. D. Nakhodkin. – 2nd ed., revised. and add. – Moscow : Transport, 1976. – 624 p.
- 2 Kulinich, Yu. M. Modeling the operation of a pulsating current traction motor / Yu. M. Kulinich, S. A. Shukharev, D. Yu. Drogolov // Russian Railway Science Journal. – 2019. – Vol. 78, No. 5. – P. 313–319. – DOI 10.21780/2223-9731-2019-78-5-313-319.

3 **Шухарев, С. А.** Моделирование работы двигателя постоянного тока / С. А. Шухарев // Вестник Института тяги и подвижного состава. – 2018. – № 14. – С. 7–12.

4 **Литовченко, В. В.** Математическая модель коллекторного тягового электродвигателя / В. В. Литовченко, Д. В. Кокорин, Д. В. Назаров // Электротехника. – 2014. – № 8. – С. 22–28. – ISSN 0013-5860.

5 **Зарифьян, А. А.** Изучение электромеханических процессов в коллекторном тяговом двигателе с учетом потерь / А. А. Зарифьян, А. Ш. Мустафин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3 (83). – С. 81–89. – DOI 10.46973/0201727X_2021_3_81.

6 **Устинов, Р. И.** Повышение работоспособности выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Устинов Роман Иванович. – Иркутск, 2020. – 180 с.

7 **Супрун, Д. А.** Система альтернативного управления выпрямительно-инверторным преобразователем электровоза переменного тока в режиме тяги: специальность 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Супрун Демьян Андреевич. – Хабаровск, 2024. – 191 с.

8 **Мельниченко, О. В.** Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Мельниченко Олег Валерьевич. – Хабаровск, 2015. – 392 с.

9 REPEAT : платформа модельно-ориентированной среды проектирования и математического моделирования : сайт. – Москва : АО «ИТЦ "ДЖЭТ"», 2025. – URL: <https://repeatlab.ru> (дата обращения: 04.07.2025).

10 Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Книга 3 : Описание и работа. Электрические машины. ИМБ.661142.009РЭ3 (ЗТС.001.012РЭ3). – Новочеркасск, 2004.

3 **Shukharev, S. A.** Modeling the operation of a DC motor / S. A. Shukharev // Bulletin of the Institute of Traction and Rolling Stock. – 2018. – No. 14. – P. 7–12.

4 **Litovchenko, V. V.** Mathematical model of a collector traction electric motor / V. V. Litovchenko, D. V. Kokorin, D. V. Nazarov // Electrical engineering. – 2014. – No. 8. – P. 22–28. – ISSN 0013-5860.

5 **Zarifyan, A. A.** Study of electromechanical processes in a collector traction motor taking into account losses / A. A. Zarifyan, A. Sh. Mustafin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2021. – No. 3 (83). – P. 81–89. – DOI 10.46973/0201727X_2021_3_81.

6 **Ustinov, R. I.** Improving the performance of rectifier-inverter converters of an AC electric locomotive in the regenerative braking mode : specialty 05.22.07 "Rolling stock of railways, train traction and electrification" : dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Ustinov Roman Ivanovich. – Irkutsk, 2020. – 180 p.

7 **Suprun, D. A.** Alternative control system for a rectifier-inverter converter of an AC electric locomotive in traction mode : specialty 2.9.3 "Rolling stock of railways, train traction and electrification" : dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Suprun Demyan Andreevich. – Khabarovsk, 2024. – 191 p.

8 **Melnichenko, O. V.** Improving the energy efficiency of traction electric drives of AC electric locomotives : specialty 05.09.03 "Electrotechnical complexes and systems" : dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Melnichenko Oleg Valerievich. – Khabarovsk, 2015. – 392 p.

9 REPEAT : a platform for model-oriented design and mathematical modeling environment : website. – Moscow : JSC "ITC" JET ", 2025. – URL: <https://repeatlab.ru> (date of access: 07/04/2025).

10 Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K). Operation manual. Book 3 : Description and Operation. Electric Machines. ИМБ.661142.009РЕ3 (ZTS.001.012РЕ3). – Novocherkassk, 2004.

Yu. S. Kabalyk

SIMULATING OF AN ELECTRIC LOCOMOTIVE TRACTION MOTOR TAKING INTO ACCOUNT THE MAGNETIZATION CURVE

Abstract. The process of creating and researching a model of a traction electric motor of an electric locomotive in the environment of computer circuit modeling is considered. The model takes into account the magnetization curve of a real motor and the nonlinear inductance

of the excitation winding, which makes it possible to more adequately reflect electromagnetic processes. The inductance of the excitation winding is determined based on the slope of the magnetization curve and the parameters of the winding poles. The model also allows it to be used in circuit modeling of transients in the electric power circuit of an electric locomotive. Two traction motor models were compared: one took into account the magnetization curve, and the other implemented a linear model in which the inductance of the excitation winding is constant. The parameters of the traction engine from operation were also compared with the calculation results of the developed model. The results of the comparison showed that the use of a nonlinear model makes it possible to calculate the traction motor current more accurately.

Keywords: electric locomotive, traction electric motor, dynamic inductance, magnetization curve, simulation modeling.

For citation: Kabalyk, I. S. Simulating of an electric locomotive traction motor taking into account the magnetization curve / Yu. S. Kabalyk // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 3. – P. 90–98. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_90.

Сведения об авторах

Кабалык Юрий Сергеевич

Дальневосточный государственный
университет путей сообщения (ДВГУПС),
кафедра «Транспорт железных дорог»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: kabalyk@festu.khv.ru

Information about the authors

Kabalyk Yuriy Sergeevich

Far Eastern State Transport University (FESTU),
Chair “Railway Transport”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: kabalyk@festu.khv.ru