

УДК 629.423

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.170.2017.111231>

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОВОЗА 2ЭЛ5 В РЕЖИМЕ ТЯГИ

Д-р техн. наук В. Г. Ягуп (ХНУГХ им. А. Н. Бекетова),
А. А. Краснов (филиал ПИИЖТ ПАО «Укрзалізниця»)

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРОВОЗА 2ЕЛ5 У РЕЖИМІ ТЯГИ

Д-р техн. наук В. Г. Ягуп (ХНУМГ ім. О. М. Бекетова),
О. О. Краснов (філія ПІІЗТ ПАТ «Укрзалізниця»)

MATHEMATICAL MODELING OF 2EL5 ELECTRIC LOCOMOTIVE ELECTRIC TRACTION SYSTEM

Doct. of Techn. Sciences V. G. Yagup, A. A. Krasnov

Математическая модель тягового электропривода грузового электровоза переменного тока 2ЭЛ5 (для режима тяги) разработана с целью проведения исследований, направленных на повышение энергетической эффективности этих электровозов. На основе логических функций формирования и распределения импульсов получено математическое описание алгоритма управления выпрямительно-инверторным преобразователем. Результаты виртуальных экспериментов подтвердили адекватность разработанной модели.

Ключевые слова: электровоз переменного тока, электропривод, выпрямительно-инверторный преобразователь, моделирование.

Математична модель тягового електропривода вантажного електровоза змінного струму 2ЕЛ5 (для режиму тяги) розроблена з метою проведення досліджень, спрямованих на підвищення енергетичної ефективності цих електровозів. На основі логічних функцій формування та розподілу імпульсів отримано математичний опис алгоритму управління випрямно-інверторним перетворювачем. Результати віртуальних експериментів підтвердили адекватність розробленої моделі.

Ключові слова: електровоз змінного струму, електропривод, вирямно-інверторний перетворювач, моделювання.

The efficiency of the AC electric traction system is decisively influenced by the electric locomotives power factor. The power factor of electric locomotives with thyristor AC/DC converters is 0.8...0.84, when a recommended value is at least 0.95. The mathematical model of AC cargo electric locomotive 2EL5 traction electric drive (for traction mode) is developed to study ways to increase the energy efficiency of these electric locomotives. Based on the logical functions of the formation and distribution of pulses, a mathematical description of the AC/DC converter algorithm is obtained. This model is implemented by MATLAB.

The mathematical model of 2EL5 traction electric drive allows investigating electromagnetic processes taking into account a voltage nonsinusoidality on the pantograph. The resulting graphs of voltages and currents correspond to the concept of electromagnetic processes in the traction electric drive of an electric locomotive, as described in previously publications.

Key words: AC electric locomotive, traction electric drive, AC/DC converter, modeling.

Введение. На коэффициент полезного действия системы электрической тяги переменного тока решающее влияние оказывает коэффициент мощности ($\cos \varphi$) электроподвижного состава. Однако для электровозов с диодными выпрямителями (ВЛ80К, ВЛ80Т) его величина составляет 0,82...0,85, а для электровозов с тиристорными преобразователями (2ЭС5К, 2ЭЛ5) — 0,8...0,84 при рекомендуемом значении не менее 0,95 [1, 3]. Поэтому необходим поиск путей повышения их энергетической эффективности. Наиболее эффективным методом исследований, который может заменить дорогостоящие испытания электровозов на линии, является математическое моделирование с реализацией моделей средствами компьютерных программных пакетов.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [2-7] представлены математические модели электровозов, имеющих тяговые преобразователи, аналогичные электровозу 2ЭЛ5. Эти модели были реализованы в программных пакетах DesignLab, MATLAB и средствами языков программирования. При этом, как правило, движение поезда моделировалось упрощенно: скорость поезда или ток тягового двигателя принимались постоянными величинами. Отсутствует математическое описание алгоритмов управления выпрямительно-инверторным преобразователем (ВИП), за исключением работы [5], в которой приведена лишь логическая блок-схема.

Определение цели и задачи исследований. Разработать математическую модель тягового электропривода применительно к электровозу 2ЭЛ5; разработать математическое описание алгоритма управления ВИП; с помощью модели исследовать электромагнитные процессы при работе электровоза в режиме тяги.

Модель системы электроснабжения. В описываемой модели система электрической тяги переменного тока представлена в виде двух укрупненных подсистем — подсистемы электроснабжения, в которую входят тяговая подстанция и тяговая сеть, и подсистемы электроподвижного состава (ЭПС), которая включает в себя основное электрическое и электронное оборудование электровоза. Поскольку длительность исследуемых электромагнитных процессов достаточно мала (единицы секунд), влияние механической части локомотива можно не учитывать [4].

Целью исследования является анализ электромагнитных процессов лишь в подсистеме ЭПС, поэтому схема замещения тяговой подстанции (рис. 1, а) может быть представлена эквивалентными параметрами трансформатора (э. д. с. $e_{тп}$, индуктивность $L_{тп}$, активное сопротивление $r_{тп}$), приведенными к его вторичной обмотке [2, 5]. Схема замещения тяговой сети (один путь) представлена в виде каскадного соединения четырехполюсников [3], которые являются элементарными участками длиной 0,4 км (рис. 1, б).

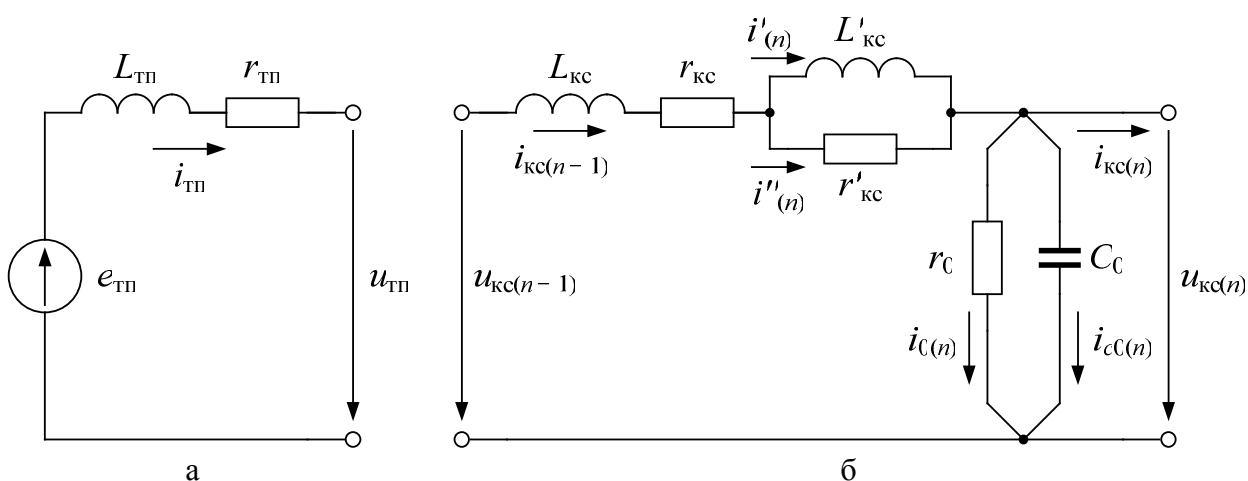


Рис. 1. Схема замещения тяговой подстанции (а) и участка контактной сети длиной 0,4 км (б)

Система дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные

процессы в цепях тяговой подстанции и тяговой сети, имеет вид:

$$\frac{di_{\text{тп}}}{dt} = -\frac{1}{L_{\text{тп}} + L_{\text{кк}}} \left[(r_{\text{тп}} + r_{\text{кк}}) i_{\text{тп}} + r'_{\text{кк}} i''_{(1)} + r_0 i_{0(1)} - e_{\text{тп}} \right]; \quad (1)$$

$$\frac{di_{\text{кк}(n-1)}}{dt} = -\frac{1}{L_{\text{кк}}} \left(r_{\text{кк}} i_{\text{кк}(n-1)} + r'_{\text{кк}} i''_{(n)} + r_0 i_{0(n)} - u_{c0(n-1)} \right); \quad (2)$$

$$\frac{di'_{(n)}}{dt} = \frac{r'_{\text{кк}}}{L'_{\text{кк}}} i''_{(n)}; \quad (3)$$

$$\frac{du_{c0(n)}}{dt} = \frac{1}{C_0} \left(i_{\text{кк}(n-1)} - i_{\text{кк}(n)} - \frac{1}{r_0} u_{c0(n)} \right); \quad (4)$$

$$i_{\text{кк}(n)} = i_{\text{кк}(n-1)} - i_{0(n)} - i_{c0(n)}; \quad (5)$$

$$i_{c0(n)} = C_0 \frac{du_{c0(n)}}{dt}; \quad (6)$$

$$i''_{(n)} = i_{\text{кк}(n-1)} - i'_{(n)}; \quad (7)$$

$$i_{0(n)} = \frac{u_{c0(n)}}{r_0}. \quad (8)$$

В уравнениях (1) - (8): $u_{\text{тп}}$ — напряжение на выходе тяговой подстанции; $u_{\text{кк}(n-1)}$, $u_{\text{кк}(n)}$, $u_{c0(n)}$ — напряжения на участках тяговой сети; $L_{\text{кк}}$, $r_{\text{кк}}$ — индуктивность и активное сопротивление тяговой сети; r_0 , C_0 — активное сопротивление и емкость цепи «тяговая

сеть — земля»; $i_{\text{тп}}$ — ток на выходе тяговой подстанции; $i_{\text{кк}(n-1)}$, $i_{\text{кк}(n)}$, $i_{\text{кк}(n)}$, $i'_{(n)}$, $i''_{(n)}$, $i_{0(n)}$, $i_{c0(n)}$ — токи участков тяговой сети; n — номер элементарного участка.

Напряжения на участках тяговой сети можно найти по формулам:

$$u_{\text{тп}} = e_{\text{тп}} - L_{\text{тп}} \frac{di_{\text{тп}}}{dt} - r_{\text{тп}} i_{\text{тп}}; \quad (9)$$

$$u_{\text{кк}(n)} = u_{c0(n)} = L_{\text{кк}} \frac{di_{\text{кк}(n+1)}}{dt} + r_{\text{кк}} i_{\text{кк}(n+1)} + r'_{\text{кк}} i''_{(n+1)} + r_0 i_{0(n+1)}. \quad (10)$$

Параметры тяговой подстанции с питающей ЛЭП 110 кВ длиной 13,5 км (провода АС-150) и трансформатором мощностью 40 МВ·А рассчитаны согласно

[2]: $E_{\text{тп}} = 27,5$ кВ; $L_{\text{тп}} = 9,6735$ мГн; $r_{\text{тп}} = 0,2497$ Ом.

Параметры элементарного участка тяговой сети: контактная подвеска

ПБСМ1-95+2МФ-100, рельсы Р-75, один путь; $r_{\text{кк}} = 5,307 \cdot 10^{-2}$ Ом; $L_{\text{кк}} = 2,48 \cdot 10^{-4}$ Гн; $r'_{\text{кк}} = 0,4669$ Ом; $L'_{\text{кк}} = 4,4 \cdot 10^{-5}$ Гн; $r_0 = 2,4 \cdot 10^6$ Ом; $C_0 = 8$ нФ [5]. Длина участка 10 км (25 элементарных участков).

Модель электровоза и тягового двигателя. Рассмотрим схему замещения силовых цепей одного ВИП (рис. 2). Одна секция электровоза 2ЭЛ5 имеет два таких преобразователя [11].

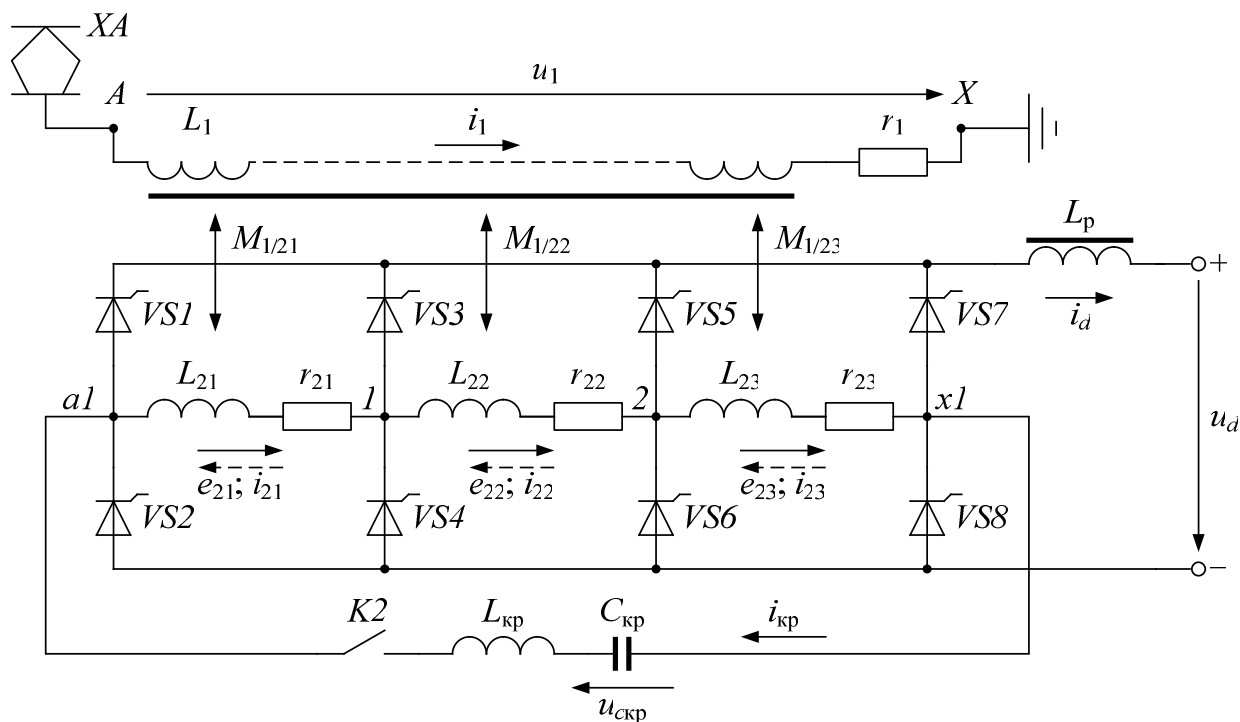


Рис. 2. Схема замещения силовых цепей одного ВИП электровоза 2ЭЛ5

От токоприемника ХА напряжение контактной сети поступает на первичную обмотку А—Х тягового трансформатора. Вторичная обмотка имеет две секционированные тяговые обмотки (на рис. 2 показана одна обмотка а1—х1), к каждой из которых подключается ВИП, имеющий восемь тиристорных плеч VS1—VS8. Номинальное напряжение секций вторичных обмоток а1—1, 1—2 составляет $u_{21} = u_{22} = 315$ В, секции 2—х1 $u_{23} = 630$ В. К выводам вторичной обмотки а1—х1 подключен компенсатор реактивной мощности, состоящий из реактора $L_{\text{кр}}$ и батареи конденсаторов $C_{\text{кр}}$. К зажимам постоянного тока «+», «-» подключаются параллельно два тяговых двигателя. На

электровозах 2ЭЛ5 каждый двигатель имеет свой сглаживающий реактор L_p .

На схеме замещения обозначены: u_1 , L_1 , r_1 — напряжение, индуктивность и активное сопротивление первичной обмотки тягового трансформатора; e_{21} , e_{22} , e_{23} , u_{21} , u_{22} , u_{23} — э. д. с. и напряжения секций вторичной обмотки; i_{21} , i_{22} , i_{23} — токи секций вторичных обмоток; $i_{\text{кр}}$ — ток компенсатора; $M_{1/21}$, $M_{1/22}$, $M_{1/23}$ — взаимоиנדуктивности между первичной обмоткой и секциями вторичной обмотки; u_d , i_d — выпрямленное напряжение и ток.

Не учитывая взаимоиנדуктивность между секциями вторичной обмотки, можно записать следующие уравнения связи между параметрами тягового трансформатора:

$$u_1 = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{1/21} \frac{di_{21}}{dt} + M_{1/22} \frac{di_{22}}{dt} + M_{1/23} \frac{di_{23}}{dt}; \quad (11)$$

$$u_{21} = i_{21} r_{21} + L_{21} \frac{di_{21}}{dt} + M_{1/21} \frac{di_1}{dt}; \quad (12)$$

$$u_{22} = i_{22} r_{22} + L_{22} \frac{di_{22}}{dt} + M_{1/22} \frac{di_1}{dt}; \quad (13)$$

$$u_{23} = i_{23} r_{23} + L_{23} \frac{di_{23}}{dt} + M_{1/23} \frac{di_1}{dt}. \quad (14)$$

На электровозе 2ЭЛ5 применяется выпрямительно-инверторный преобразователь серии ВИП-4000, который комплектуется тиристорами Т353-800. Параметры тягового трансформатора

ОНДЦЭ-4350/25 [13] указаны в табл. 1, параметры тиристора Т353-800 [5] — в табл. 2. К каждому тиристорному последовательно подключен индуктивный делитель тока величиной 14 мкГн.

Таблица 1

Параметры тягового трансформатора ОНДЦЭ-4350/25

Параметр	Секция обмоток	Ед. изм.	Обозначение	Значение
Активное сопротивление	<i>A-X</i>	Ом	r_1	0,314
	<i>al-xl</i>	Ом	r_2	0,00351
	<i>al-l, l-2</i>	Ом	r_{21}, r_{22}	0,0008775
	<i>2-xl</i>	Ом	r_{23}	0,001755
Индуктивность	<i>A-X</i>	Гн	L_1	57,262539
	<i>al-l, l-2</i>	Гн	L_{21}, L_{22}	0,009091
	<i>2-xl</i>	Гн	L_{23}	0,036364
Коэффициент связи	—	—	$K_{1/21}, K_{1/22}$	0,99845
	—	—	$K_{1/23}$	0,99898

Таблица 2

Параметры тиристора Т353-800

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Величина
Дифференциальное сопротивление во включенном состоянии	r_T	Ом	$4,6 \cdot 10^{-4}$
Индуктивность во включенном состоянии	L_T	Гн	0
Падение напряжения в прямом направлении	U_T	В	2,2
Ток удержания	I_L	А	$20 \cdot 10^{-3}$
Время выключения	T_q	с	$20 \cdot 10^{-6}$
Начальный ток	I_c	А	0
Активное сопротивление демпфирующей цепи	R_s	Ом	30
Емкостное сопротивление демпфирующей цепи	C_s	Ф	$2 \cdot 10^{-6}$

Параметры сглаживающего реактора и компенсатора реактивной мощности: $L_p = 8,2$ мГн; $r_p = 0,014$ Ом; $L_{кр} = 3,249$ мГн, $C_{кр} = 433$ мкФ [4].

Математическая модель тягового двигателя (ТЭД) ДТК-820 разработана на

основе его схемы замещения (рис. 3). Продольную составляющую реакции якоря и влияние магнитного потока дополнительных полюсов можно не учитывать ввиду малых величин.

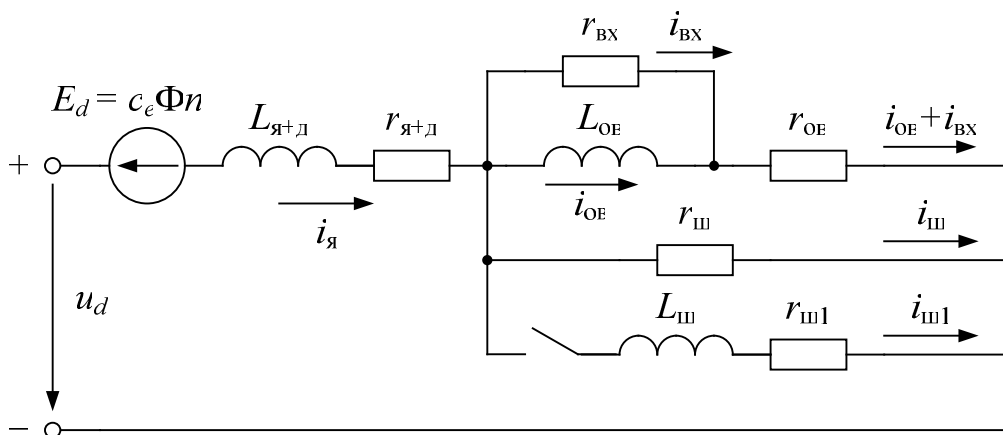


Рис. 3. Схема замещения цепи тягового двигателя

На рис. 3 обозначены: $c_e = 11,6$ — конструктивная постоянная двигателя; $\Phi = f(i_я)$ — магнитный поток, Вб; n — частота вращения якоря, об/мин; $i_я$, $i_{ов}$, $i_{ш}$, $i_{ш1}$, $i_{вх}$ — соответственно токи якоря, обмотки возбуждения, шунтирующего резистора, индуктивного шунта и цепи вихревых токов. Включение цепи ослабления поля ($L_{ш}$, $r_{ш1}$) учитывается

логической переменной $f_{ш}^*$, которая равна 1 или 0 соответственно для включенного и отключенного состояния.

Эффект вихревых токов учитывается в виде активного сопротивления $r_{вх}$, шунтирующего индуктивность обмотки возбуждения. Величина этого сопротивления принята равной $r_{вх} = 7r_{ов}$ [4].

Для схемы (рис. 3) справедлива система уравнений:

$$\frac{di_я}{dt} = \frac{1}{L_{я+д}} [u_d - c_e \Phi n - r_{я+д} i_я - r_{ш} i_{ш}]; \quad (15)$$

$$\frac{di_{ов}}{dt} = \frac{1}{L_{ов}} [r_{ш} i_{ш} - r_{ов} (i_{ов} + i_{вх})]; \quad (16)$$

$$\frac{di_{ш1}}{dt} = f_{ш}^* \frac{1}{L_{ш}} (r_{ш} i_{ш} - r_{ш1} i_{ш1}); \quad (17)$$

$$i_{ш} = i_я - i_{ов} - i_{вх} - f_{ш}^* i_{ш1}; \quad (18)$$

$$i_{вх} = -\frac{1}{r_{вх}} L_{ов} \frac{di_{ов}}{dt}. \quad (19)$$

Параметры тягового двигателя ДТК-820 (табл. 3) взяты из [10, 12]. Магнитная характеристика ТЭД приведена в [10]. Сопротивление цепи вихревых токов $r_{\text{вх}} = 7r_{\text{ов}} = 0,0483$ Ом.

В разработанной модели скорость движения поезда определяется путем интегрирования уравнения движения,

которое в режиме тяги при отсутствии торможения имеет вид [8]:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{30}(f_k - w). \quad (20)$$

где v — скорость движения поезда, км/ч;

f_k — удельная сила тяги, Н/кН;

w — удельная сила сопротивления движению поезда, Н/кН.

Таблица 3

Параметры тягового двигателя ДТК-820

Параметр	Обозн.	Ед. изм.	Величина
Активное сопротивление обмотки якоря и дополнительных полюсов	$r_{\text{я+д}}$	Ом	0,0237
Индуктивность обмотки якоря и дополнительных полюсов	$L_{\text{я+д}}$	Гн	$0,52 \cdot 10^{-3}$
Активное сопротивление обмотки возбуждения	$r_{\text{ов}}$	Ом	0,0069
Индуктивность обмотки возбуждения	$L_{\text{ов}}$	Гн	$0,85 \cdot 10^{-3}$
Активное сопротивление резистора постоянного шунтирования	$r_{\text{ш}}$	Ом	0,294
Индуктивность индуктивного шунта	$L_{\text{ш}}$	Гн	$2,2 \cdot 10^{-3}$
Активное сопротивление резисторов ослабления возбуждения	$r_{\text{ш1}}$ $r_{\text{ш2}}$ $r_{\text{ш3}}$	Ом	0,0039 0,017 0,058

Основное удельное сопротивление движению электровоза и вагонов, Н/кН, определяется по формулам [9]:

— для электровоза 2ЭС5К (2ЭЛ5) на бесстыковом пути

$$w'_0 = 0,65 + 0,00906v + 0,000227v^2; \quad (21)$$

— для 4-осных вагонов на роликовых подшипниках

$$w''_0 = 0,7 + (3 + 0,09v + 0,002v^2)/q_0, \quad (22)$$

где $q_0 = 17,5$ т — средняя распределенная масса на ось вагона.

При моделировании примем силу тяги постоянной величиной ($F_k = \text{const}$). Тогда, согласно [8], уравнение (20) может быть записано в виде

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_k - g(m_{\text{эл}} w'_0(v) + m_{\text{в}} w''_0(v))}{30(m_{\text{эл}} + m_{\text{в}})g}. \quad (23)$$

В результате интегрирования уравнения (23) получаем скорость движения поезда в километрах в час. Тогда частота вращения ТЭД, об/мин:

$$n = \frac{\mu}{0,188D_k} v. \quad (24)$$

В формуле (24) $\mu = 4,19$ — передаточное число редуктора; $D_k = 1205$ мм — диаметр бандажа колесной пары. Уравнения (15) - (19), (23), (24) составляют полную систему уравнений цепи тягового двигателя.

Алгоритм управління ВИП.

Алгоритм управління тиристорами ВИП в режиме тяги [11] приведен в табл. 4. Положительное направление э. д. с. e_2 вторичной обмотки трансформатора (см. рис. 2) показано сплошной стрелкой, а отрицательное — штриховой.

Формирование импульсов ВИП (рис. 4) осуществляется путем сравнения опорного пилообразного сигнала $u_{оп}(t)$

амплитудой 180 В (это соответствует 180 эл. град.) с двумя уровнями срабатывания. Первый уровень численно равен углу α , а второй — величине $\alpha + \tau_{и}$, где $\tau_{и}$ — длительность импульса, выраженная в градусах. Для моделируемого ВИП $\tau_{и} = 15,3^\circ$ (850 мкс) для углов α_0, α_p ; $\tau_{и} = 45^\circ$ (2500 мкс [3]) для углов α_{03} .

Таблица 4

Алгоритм управления тиристорами ВИП в режиме тяги

Зона регулирования	Направление э. д. с. e_2	Номера тиристорov ВИП							
		VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8
I	+				α_p	$\alpha_0; \alpha_p$			
	—			α_0			α_p		
II	+		α_p		α_{03}	α_0			
	—	α_p		α_{03}			α_0		
III	+				α_p		α_{03}	α_0	
	—			α_p		α_{03}			α_0
IV	+		α_p		α_{03}			α_0	
	—	α_p		α_{03}					α_0

В табл. 4: α_0 — нерегулируемый по фазе импульс; α_{03} — нерегулируемый задержанный по фазе импульс; α_p — регулируемый по фазе импульс.

Опорный пилообразный сигнал можно вычислить по формуле

$$u_{оп}(t) = \frac{180}{\pi} \arctg \left(\tg \omega t + \frac{\pi}{2} \right) + 90, \quad (25)$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота сети ($f = 50$ Гц), рад/с.

Для описания алгоритма работы ВИП составлены уравнения, в которых применены символы « \wedge » (логическое И), « \vee » (логическое ИЛИ), « \rightarrow » (логическое ЕСЛИ... ТО). С целью формализации

описания алгоритма введем следующие логические величины:

— переменные выбора зоны регулирования z_j , где $j = 1 \dots 4$ — номер зоны. Если соответствующая переменная z_j равна единице, электровоз работает на j -й зоне регулирования;

— функции формирования импульсов f_α^* , где α — угол управления ВИП. При $f_\alpha^* = 1$ формируется прямоугольный импульс длительностью $t_{и}$ с задержкой от начала полупериода, равной углу α ;

— функции распределения импульсов f_k^* , где $k = 1 \dots 8$ — номер тиристора ВИП. При $f_k^* = 1$ на тиристор с номером k подается импульс.

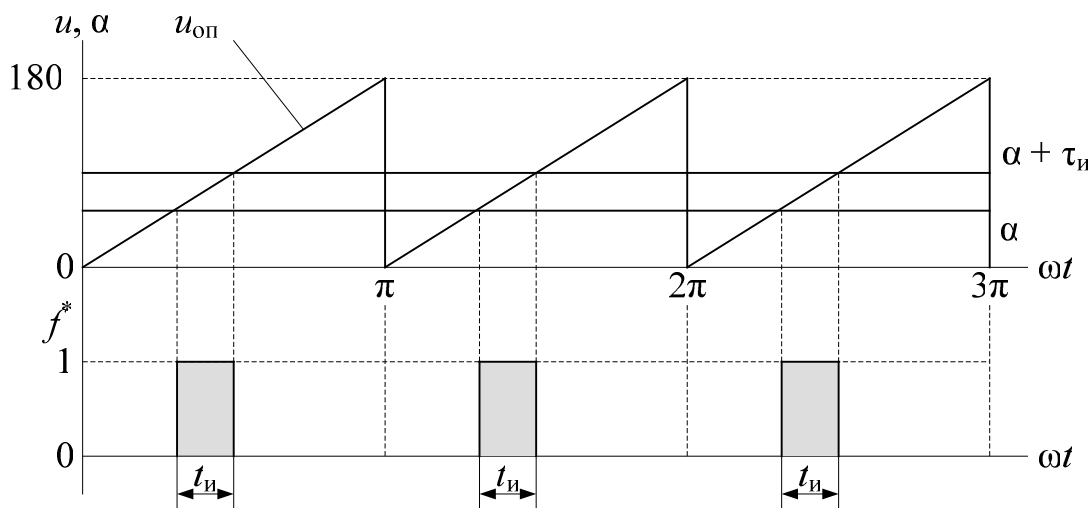


Рис. 4. Диаграммы формирования импульсов управления ВИП

Логические функции формирования импульсов ВИП f_{α}^* :

$$\begin{aligned}
 f_{\alpha 0}^* &= (u_{ax} > 0) \wedge (u_{оп} - \alpha_0 \geq 0) \wedge (\alpha_0 + \tau_{и} - u_{оп} \geq 0) \rightarrow 1; \\
 f_{\pi+\alpha 0}^* &= (u_{ax} < 0) \wedge (u_{оп} - \alpha_0 \geq 0) \wedge (\alpha_0 + \tau_{и} - u_{оп} \geq 0) \rightarrow 1; \\
 f_{\alpha 03}^* &= (u_{ax} > 0) \wedge (u_{оп} - \alpha_{03} \geq 0) \wedge (\alpha_{03} + \tau_{и} - u_{оп} \geq 0) \rightarrow 1; \\
 f_{\pi+\alpha 03}^* &= (u_{ax} < 0) \wedge (u_{оп} - \alpha_{03} \geq 0) \wedge (\alpha_{03} + \tau_{и} - u_{оп} \geq 0) \rightarrow 1; \\
 f_{ap}^* &= (u_{ax} > 0) \wedge (u_{оп} - \alpha_p \geq 0) \wedge (\alpha_p + \tau_{и} - u_{оп} \geq 0) \rightarrow 1; \\
 f_{\pi+ap}^* &= (u_{ax} < 0) \wedge (u_{оп} - \alpha_p \geq 0) \wedge (\alpha_p + \tau_{и} - u_{оп} \geq 0) \rightarrow 1.
 \end{aligned} \tag{26}$$

Логические функции распределения импульсов f_k^* :

$$\begin{aligned}
 f_1^* &= (z_2 = 1) \vee (z_4 = 1) \wedge (f_{\pi+ap}^* = 1) \rightarrow 1; \\
 f_2^* &= (z_2 = 1) \vee (z_4 = 1) \wedge (f_{ap}^* = 1) \rightarrow 1; \\
 f_3^* &= ((z_1 = 1) \wedge (f_{\pi+\alpha 0}^* = 1)) \vee ((z_2 = 1) \vee (z_4 = 1) \wedge (f_{\pi+\alpha 03}^* = 1)) \vee \\
 &\quad \vee ((z_3 = 1) \wedge (f_{\pi+ap}^* = 1)) \rightarrow 1; \\
 f_4^* &= ((z_1 = 1) \vee (z_3 = 1) \wedge (f_{ap}^* = 1)) \vee ((z_2 = 1) \vee (z_4 = 1) \wedge (f_{\alpha 03}^* = 1)) \rightarrow 1; \\
 f_5^* &= ((z_1 = 1) \wedge (f_{\alpha 0}^* = 1) \wedge (f_{ap}^* = 1)) \vee ((z_2 = 1) \wedge (f_{\alpha 0}^* = 1)) \vee \\
 &\quad \vee ((z_3 = 1) \wedge (f_{\pi+\alpha 03}^* = 1)) \rightarrow 1; \\
 f_6^* &= ((z_1 = 1) \wedge (f_{\pi+ap}^* = 1)) \vee ((z_2 = 1) \wedge (f_{\pi+\alpha 0}^* = 1)) \vee ((z_3 = 1) \wedge (f_{\alpha 03}^* = 1)) \rightarrow 1; \\
 f_7^* &= (z_3 = 1) \vee (z_4 = 1) \wedge (f_{\alpha 0}^* = 1) \rightarrow 1; \\
 f_8^* &= (z_3 = 1) \vee (z_4 = 1) \wedge (f_{\pi+\alpha 0}^* = 1) \rightarrow 1.
 \end{aligned} \tag{27}$$

При невыполнении условий (26), (27) все соответствующие логические функции равны нулю.

Результаты моделирования. Разработанная математическая модель реализована в программном пакете MATLAB. Сила тяги и начальная скорость движения поезда (по тяговой характеристике [11]), масса состава, номер зоны регулирования, углы регулирования ВИП задаются пользователем модели.

Условия моделирования: метод интегрирования ode23tb (с переменным шагом), минимальный шаг интегрирования 10^{-10} , максимальный шаг 10^{-4} , начальный шаг 10^{-6} , относительная погрешность 10^{-3} . Масса поезда 2500 т, начальная скорость 60 км/ч, сила тяги 350 кН. Электровоз работает на IV зоне регулирования; углы открывания тиристоров $\alpha_0 = 9^\circ$, $\alpha_p = 90^\circ$. Результаты моделирования приведены на рис. 5 и 6.

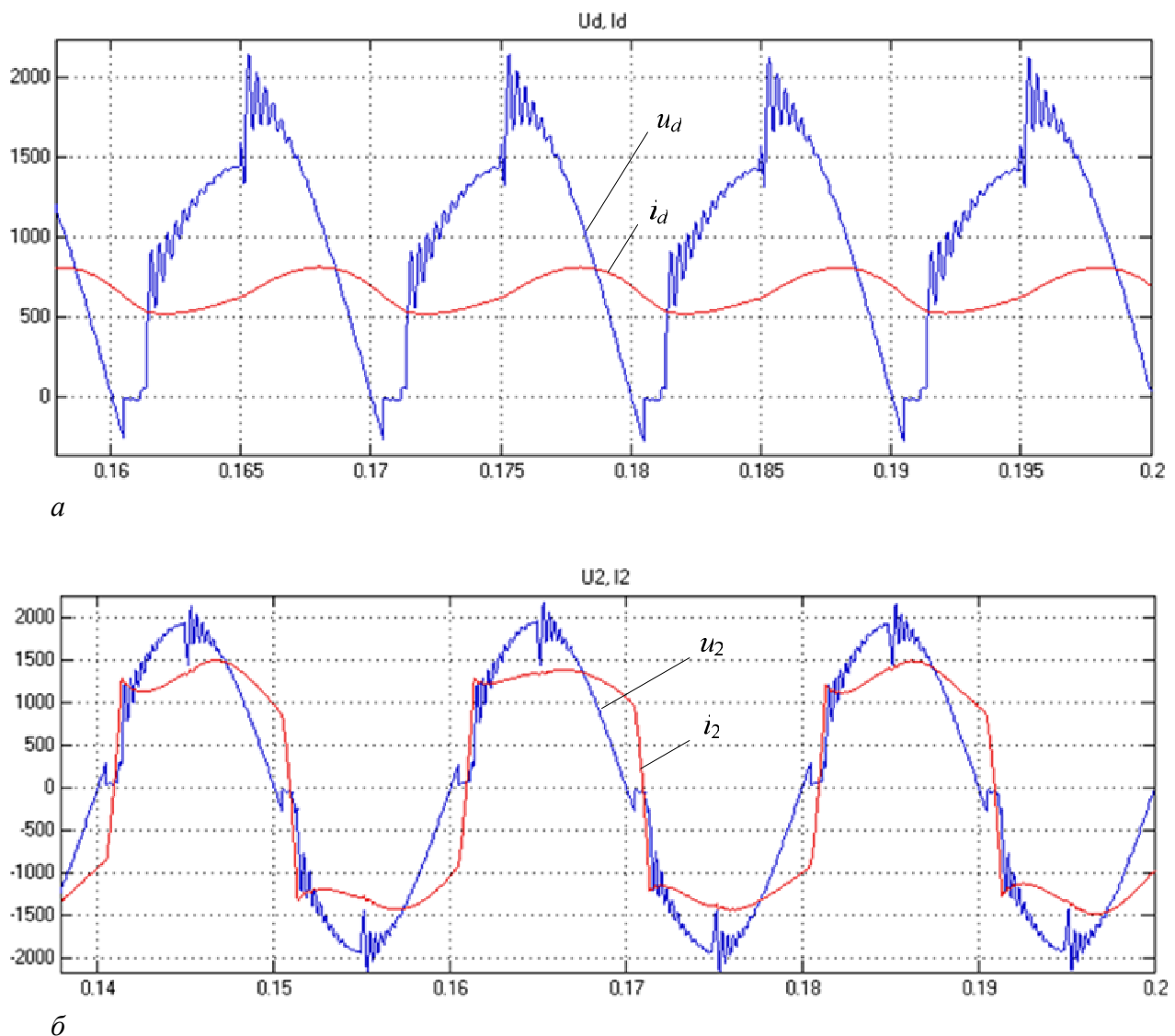


Рис. 5. Результаты компьютерного моделирования: выпрямленное напряжение u_d и ток i_d (а); напряжение u_2 и ток i_2 вторичной обмотки трансформатора (б)

Из рис. 5, а видно, что в моменты времени, соответствующие $\alpha_p = 90^\circ$, происходит переключение ВИП на вторичную обмотку с высшим напряжением. В начале полупериода u_d снижается до нуля, что объясняется процессами сетевой и фазной коммутации. Ток i_d имеет пульсирующую форму.

Искажение кривой напряжения u_2 вторичной обмотки трансформатора (рис. 5,б) вызвано процессами коммутации в ВИП и волновыми процессами в тяговой сети [2, 3, 5, 6]. Такие же искажения характерны и для напряжения на токоприемнике u_1 (рис. 6). Токи i_1 и i_2 имеют форму, близкую к прямоугольной, вследствие индуктивного характера

нагрузки. Первая гармоника тока i_1 отстает от напряжения u_1 на угол φ , поэтому полная компенсация реактивной мощности в данном режиме не обеспечивается.

При указанных условиях моделирования получены следующие показатели: коэффициент мощности электровоза 0,856; коэффициент несинусоидальности напряжения на токоприемнике 6,1 %; коэффициент искажения первичного тока электровоза 0,9671; коэффициент мощности на шинах тяговой подстанции 0,859. Характер электромагнитных процессов и результаты моделирования в целом соответствуют данным, полученным в [2-6], что позволяет считать разработанную модель адекватной.

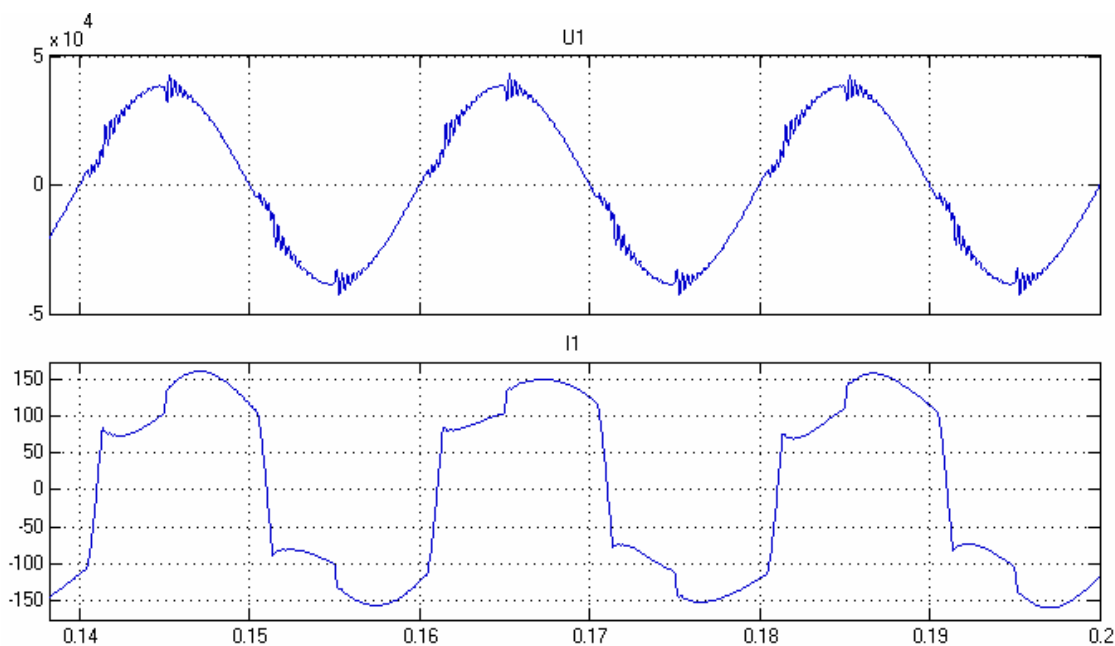


Рис. 6. Результаты компьютерного моделирования: напряжение u_1 и ток i_1 на токоприемнике электровоза

Выводы из исследований и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении. Разработанная математическая модель тягового электропривода электровоза 2ЭЛ5 позволяет исследовать электромагнитные процессы с учетом несинусоидальности

напряжения на токоприемнике и нелинейности цепи выпрямленного тока. Имеется возможность оценки показателей качества электроэнергии. Результаты виртуальных экспериментов подтвердили адекватность разработанной модели.

Список использованных источников

1. Бакланов, А. А. Анализ энергетической эффективности электрической тяги [Текст] / А. А. Бакланов // Материалы международного симпозиума Eltrans 2007. — СПб.: ПГУПС (ЛИИЖТ), 2009. — С. 63-68.
2. Математическое моделирование динамики электровозов [Текст] / А. Г. Никитенко, Е. М. Плохов, А. А. Зарифьян [и др.]; под ред. А. Г. Никитенко. — М.: Высш. школа, 1998. — 274 с.
3. Кулинич, Ю. М. Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием напряжения [Текст]: монография / Ю. М. Кулинич. — Хабаровск: ДВГУПС, 2001. — 153 с.
4. Янов, В. П. Оценка эффективности компенсатора реактивной мощности на электровозе ЗЭС5К [Текст] / В. П. Янов, П. Г. Колпахчян // Вестник ВЭЛНИИ. — 2009. — № 1 (57). — С. 23-32.
5. Мельниченко, О. В. Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока [Текст]: дисс... д-ра техн. наук: 05.09.03 — Электротехнические комплексы и системы / О. В. Мельниченко. — Хабаровск, 2015. — 392 с.
6. Bunyaeva E. V., Skorik V. G., Vlas'evskii S. V., Fokin D. S. A method for improving the energy efficiency of an alternating current electric locomotive in the regenerative braking mode // Russian Electrical Engineering. — 2016. — Vol. 87. — No. 2. — P. 73-76.
7. Cismaru C. D. Mathematical Models of High-Speed Trains Movement // WSEAS Transactions on Circuits and Systems. — 2008. — Vol. 7. — No. 2. — P. 67-74.
8. Кузьмич, В. Д. Теория локомотивной тяги [Текст]: учеб. для вузов ж.-д. транспорта / В. Д. Кузьмич, В. С. Руднев, С. Я. Френкель; под ред. В. Д. Кузьмича. — М.: Маршрут, 2004. — 448 с.
9. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст]: монография в 2 т. — Т. 1 / Г. К. Гетьман. — Днепропетровск: Изд-во Маковецкий, 2011. — 456 с.
10. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст]: монография в 2 т. — Т. 2 / Г. К. Гетьман. — Днепропетровск: Изд-во Маковецкий, 2011. — 364 с.
11. Электровоз 2ЭЛ5. Руководство по эксплуатации. Книга 1. Описание и работа. Электрические схемы. ИДМБ.661142.010РЭ1 [Текст]. — Новочеркасск, 2005. — 169 с.
12. Электровоз 2ЭЛ5. Руководство по эксплуатации. Книга 3. Описание и работа. Электрические машины. ИДМБ.661142.010РЭ3 [Текст]. — Новочеркасск, 2005. — 33 с.
13. Электровоз 2ЭЛ5. Руководство по эксплуатации. Книга 4. Электрические аппараты. ИДМБ.661142.010РЭ4 [Текст]. — Новочеркасск, 2005. — 245 с.

Ягуп Валерій Григорович, д-р техн. наук, професор кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова. Тел.: (050) 973-81-99. E-mail: yagup_valery@rambler.ru.

Краснов Олексій Олександрович, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу «Інфраструктура залізниць та електрична тяга» Харківського відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» ПАТ «Укрзалізниця». Тел.: (057) 724-41-20. E-mail: uzdlines@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7538-8965>.

Yagup Valery Grygorovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Systems and Electric Power Supply of Cities, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel.: (050) 973-81-99. E-mail: yagup.valery@gmail.com.

Krasnov Oleksiy Oleksandrovych, Leading Researcher, Kharkiv Department of Railway Transport Design and Survey Institute, JSC "Ukrzaliznytsya". Tel.: (057) 724-41-20. E-mail: uzdlines@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7538-8965>.

Стаття прийнята 13.06.2017 р.