

саций электромагнитного момента двигателя, что обусловлено влиянием несинусоидальных по форме статорных токов (при применяемой низкой частоте ШИМ) на быстродействующие регуляторы, активной и намагничивающей составляющих статорного тока двигателя.

Перечень ссылок

1. Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Наука, 1966. – 298 с.
2. Сандлер А. С., Сарбатов Р. С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.
3. Кривицкий С. О., Эпштейн И. И., Динамика частотно-регулируемых электроприводов с автономными инверторами. – М.: Энергия, 1970. – 152 с.
4. Преобразователь частоты для приводов с короткозамкнутыми асинхронными электродвигателями SAMI // Описание 772 SAMI 23, Strumberg, 1980-03-20, С. 14–25.
5. Бродовский В. Н., Иванов Е. С. Приводы с частотно-токовым управлением. – М.: Энергия, 1974. – 168 с.
6. Шрейнер Р. Т., Дмитренко Ю. А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224 с.
7. Рудаков В. В., Столяров И. М., Дартау В. А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 134 с.
8. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage fur die Transvector – Regelung von Asynchronmaschinen. – Siemens-Zeitschrift. – Bd.45. – 1971. – № 10. – S. 757–760.
9. Пивняк Г. Г., Волков А. В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией. – Днепропетровск: НГУ, 2006. – 470 с.
10. Aaltonen M., Titinen P., Helkkila S. Direct Torque Control of AC motor drives. ABB Review. – 1995. – № 3. – P. 19–24.
11. Перельмутер В. М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока. – Харьков: Основа, 2004. – 210 с.
12. Волков А. В. Квазивекторное управление частотно-регулируемым асинхронным двигателем // Техн. електродинаміка. – 1999. – № 3. – С. 32–36.
13. Эпштейн И. И. Автоматизированный электропривод переменного тока. – М.: Энергоиздат, 1982. – 192 с.
14. Anters E. Variable speed a. c. drives for severe environments // Electrical Engineer. – 1978. – October. – Vol.55. – № 10. – P. 18–55.
15. Волков А. В., Скалько Ю. С. Цифровая модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением // Електротехніка та електроенергетика. – 2005. – № 2. – С. 75–81.
16. Волков А. В., Скалько Ю. С. Высоковольтный частотно-регулируемый асинхронный электропривод // Техн. електродинаміка: Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – 2008. – Ч. 5. – С. 27–30.

Поступила в редакцію 12.06.08 з.

З використанням імітаційного моделювання виконано дослідження та порівняльний аналіз перехідних електромеханічних процесів високовольтного асинхронного електропривода для систем автоматичного керування зі скалярним, квазивекторним та векторним принципами частотно-регулювання.

Using simulation technique investigation and comparative analysis of electromechanical processes in high-voltage asynchronous electric drive for control systems with scalar, quasivector and vector frequency control principles are made.

УДК 621.313.222.62-83

А. Р. Лучко, Е. В. Страколист

Уточненная имитационная модель тягового электродвигателя постоянного тока со смешанным возбуждением

С использованием пакетов программ ELCUT и MathCAD разработана уточненная модель электродвигателя постоянного тока со смешанным возбуждением и выполнен с её использованием пример расчета электромеханических процессов тягового двигателя постоянного тока для отечественного троллейбуса

В настоящее время в городском электротранспорте (троллейбус, трамвай) широко применяются тяговые электроприводы постоянного тока с двигателями смешанного возбуждения (ДПТ СВ). Однако, для ис-

следования электромеханических переходных процессов в ДПТ СВ до настоящего времени, к сожалению, используются довольно упрощенные методики и имитационные модели [1, 2], не учитывающие конструк-

© А. Р. Лучко, Е. В. Страколист 2008 г.

тивні особливості (геометричні розміри, типи використовуваних електротехнічних матеріалів) двигателя і проходять при його функціонуванні зміни значень індуктивностей обмоток якоря і збудження, що призводить до суттєвої погрешності при розрахунку електромеханічних процесів і розвиваємого електромагнітного моменту для такого двигателя. На практиці, внаслідок існування магнітної зв'язки між обмотками послідовного і паралельного збудження, приводящої до великої погрешності в розрахунку, здійснюється використання відомих імітаційних моделей двигателів послідовного збудження [2] для дослідження електромеханічних процесів в ДПТ СВ.

Метою статті є розробка уточненої імітаційної моделі ДПТ СВ, призначеної для розрахунку електромеханічних процесів даного двигателя і дозволяючої врахувати конструктивні особливості і виникаючі зміни індуктивностей якорної обмотки і обмотки збудження двигателя постійного струму з сумішним збудженням в процесі його функціонування.

Електрична схема включення ДПТ СВ показана на рис. 1, де використовуються наступні позначення: М – якорна обмотка двигателя, $OB_{посл}$ – послідовна обмотка збудження, $OB_{пар}$ – паралельна обмотка збудження, ОДП – обмотка додаткових полюсів, $I_я$ і $I_{пар}$ – токи якорної цепи і паралельної обмотки збудження відповідно.

Складемо систему рівнянь, описуючу напругу на якорній цепи і на паралельній обмотці збудження ДПТ СВ:

$$\left. \begin{aligned} U_я &= C\Phi_B\omega + I_я(R_я + R_{ПОСЛ}) + \\ &+ W_я \frac{d}{dt}\Phi_я + W_{ПОСЛ} \frac{d}{dt}\Phi_B, \\ U_я &= I_{ПАР} \cdot R_{ПАР} + W_{ПАР} \frac{d}{dt}\Phi_B \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

а також приведемо рівняння механічного руху якоря двигателя [1]:

$$J \frac{d}{dt}\omega = C\Phi_B I_я - M_C, \quad (2)$$

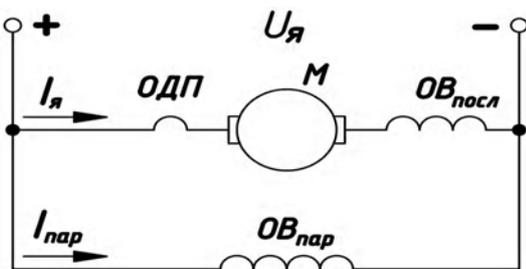


Рис. 1. Електрична схема включення ДПТ СВ

де $U_я$ – напруга якорної цепи (або напруга живлячої мережі постійного струму); C – конструктивна постійна двигателя; Φ_B – сумарний магнітний потік збудження машини; ω – кутова частота обертання (швидкість) якоря; $R_я$ – опір обмотки якоря; $R_{ПОСЛ}$ і $R_{ПАР}$ – опори обмоток послідовного і паралельного збудження відповідно; $W_я$ – кількість витків обмотки якоря; $\Phi_я$ – магнітний потік якоря; $W_{ПОСЛ}$ і $W_{ПАР}$ – кількість витків послідовної і паралельної обмоток збудження відповідно; J – приведений до валу двигателя момент інерції привода; M_C – момент опору.

Магнітний потік якоря (з урахуванням нелінійності кривої намагнічування використовуваних магнітних матеріалів ДПТ) є складною нелінійною функцією магнітодвижущої сили (МДС) якоря $F_я$ (або, по суті, – струму якоря $I_я$) [3]:

$$\Phi_я = f(F_я) = f(W_я \cdot I_я). \quad (3)$$

Магнітний потік якоря $\Phi_я$ створюється обмотками якоря і додаткових полюсів при протіканні по них відповідних струмів. Результуючий магнітний потік Φ_B , створений послідовною і паралельною обмотками збудження, перпендикулярний магнітному потоку якоря (і тому при розрахунку останнього не враховується) [4]. Путем розрахунку магнітного поля для чотириполюсного ДПТ СВ (поперечний розріз якого показаний на рис. 2) методом кінцевих елементів [5] визначаються чисельні значення для залежності (3).

Картина розподілу магнітного поля якоря в машині, розрахована при допомозі програми ELCUT [5], показана на рис. 3, а (при цьому обмотки збудження умовно не показані).

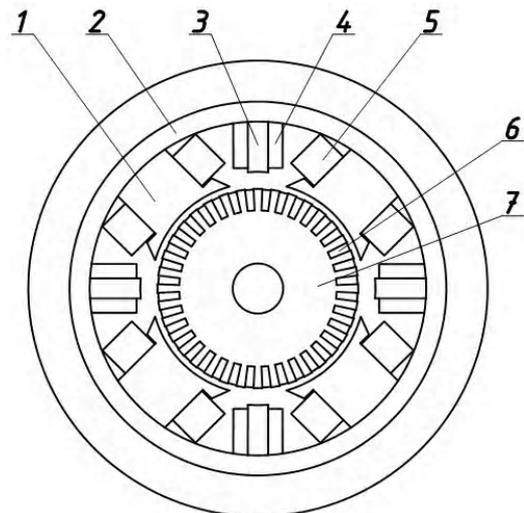


Рис. 2. Поперечний розріз ДПТ СВ (1 – основний полюс; 2 – станина двигателя; 3 – додатковий полюс; 4 – обмотка додаткових полюсів; 5 – обмотка збудження; 6 – обмотка якоря; 7 – якорь)

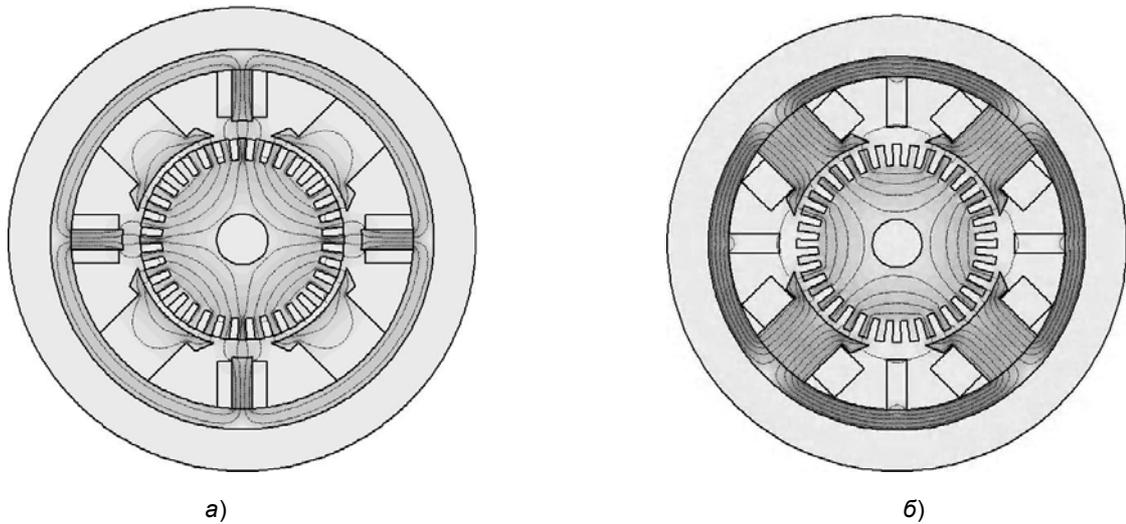


Рис. 3. Картина распределения магнитного потока в ДПТ СВ (а – распределение магнитного потока якоря; б – распределение магнитного потока возбуждения)

Из рассчитанной зависимости $\Phi_{Я} = f(W_{Я} \cdot I_{Я})$ определим производную потока якоря $\Phi_{Я}$ в функции МДС $F_{Я}$ якоря в виде частной производной по МДС $F_{Я}$ якоря:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Phi_{Я}(W_{Я} \cdot I_{Я}) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial (W_{Я} \cdot I_{Я})} [\Phi_{Я}(W_{Я} \cdot I_{Я})] \cdot W_{Я} \frac{d}{dt} I_{Я} \end{aligned} \quad (4)$$

Как известно из [1], индуктивность обмотки возбуждения находится по формуле:

$$L = W \frac{\partial \Phi}{\partial I} \quad (5)$$

С учетом этого выражение (4) преобразуется к виду:

$$L_{диф.Я}(W_{Я} \cdot I_{Я}) = \frac{\partial}{\partial (W_{Я} \cdot I_{Я})} [\Phi_{Я}(W_{Я} \cdot I_{Я})], \quad (6)$$

где $L_{диф.Я}(W_{Я} \cdot I_{Я})$ – дифференциальная индуктивность обмотки якоря, являющаяся функцией МДС $F_{Я}$ якоря.

При этом магнитный поток возбуждения $\Phi_{В}$ является, в свою очередь, функцией суммарной МДС $F_{В}$ обмоток возбуждения (или, по сути, – функцией двух токов $I_{Я}$ и $I_{ПАР}$, протекающих соответственно в последовательной и параллельной обмотках двигателя) [3]:

$$\Phi_{В} = f(F_{В}) = f(W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР}). \quad (7)$$

Аналогично рассмотренному ранее, при анализе магнитного потока возбуждения оценим действие только самих обмоток возбуждения. Картина распре-

деления магнитного поля возбуждения в машине показана на рис. 3, б (обмотка дополнительных полюсов условно не показана). Исходя из свойств применяемых в машине электротехнических материалов и ее геометрических размеров, определяется зависимость: $\Phi_{В} = f(W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР})$. Выразим производную потока возбуждения $\Phi_{В}$ в функции суммарной МДС возбуждения $F_{В}$ в виде частной производной по МДС возбуждения $F_{В}$:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Phi_{В}(W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР}) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial F} \Phi_{В}(F_{В}) \cdot \left(\frac{d}{dt} F_{В} \right) = \\ &= \frac{\partial}{\partial F_{В}} \Phi_{В}(F_{В}) \times \\ &\times \left[W_{ПОСЛ} \cdot \frac{d}{dt} I_{Я} + W_{ПАР} \cdot \frac{d}{dt} I_{ПАР} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

С учетом (5) выражение (8) преобразуем к виду:

$$\begin{aligned} L_{диф.В}(W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР}) &= \\ &= \frac{\partial \cdot [\Phi_{В}(W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР})]}{\partial (W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР})}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $L_{диф.В}(W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР})$ – дифференциальная индуктивность возбуждения в функции суммарной МДС возбуждения $F_{В}$.

С учетом зависимостей (6) и (9) два уравнения системы (1) и уравнение движения (2) примут вид:

Систему уравнений (11) преобразуем к следующему виду:

$$\left. \begin{aligned}
 U_{Я} &= C\omega\Phi_B(W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР}) + \\
 &+ I_{Я} \cdot (R_{Я} + R_{ПОСЛ}) + W_{Я} \times \\
 &\times L_{ДИФ.Я}(W_{Я} \cdot I_{Я}) \cdot \left(W_{Я} \frac{d}{dt} I_{Я} \right) + \\
 &+ W_{ПОСЛ} \cdot L_{ДИФ.В}(W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР}) \times \\
 &\times \left[W_{ПОСЛ} \frac{d}{dt} I_{Я} + W_{ПАР} \frac{d}{dt} I_{ПАР} \right], \\
 U_{Я} &= I_{ПАР} \cdot R_{ПАР} + W_{ПАР} \times \\
 &\times \left[L_{ДИФ.В}(W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР}) \times \right. \\
 &\left. \left(W_{ПОСЛ} \frac{d}{dt} I_{Я} + W_{ПАР} \frac{d}{dt} I_{ПАР} \right) \right], \\
 J \frac{d}{dt} \omega &= CI_{Я}\Phi_B \times \\
 &\times (W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР}) - M_C.
 \end{aligned} \right\} (10)$$

Решим последнюю систему относительно производных:

$$\left. \begin{aligned}
 U_{Я} - [C\omega\Phi_B(W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР}) + \\
 + I_{Я} \cdot (R_{Я} + R_{ПОСЛ})] &= W_{Я} \cdot L_{ДИФ.Я}(W_{Я} \cdot I_{Я}) \times \\
 &\times \left(W_{Я} \frac{d}{dt} I_{Я} \right) + W_{ПОСЛ} \cdot L_{ДИФ.В} \times \\
 &\times (W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР}) \times \\
 &\times \left[W_{ПОСЛ} \frac{d}{dt} I_{Я} + W_{ПАР} \frac{d}{dt} I_{ПАР} \right], \\
 U_{Я} - I_{ПАР} \cdot R_{ПАР} &= W_{ПАР} \times \\
 &\times \left[L_{ДИФ.В}(W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР}) \times \right. \\
 &\left. \times \left(W_{ПОСЛ} \frac{d}{dt} I_{Я} + W_{ПАР} \frac{d}{dt} I_{ПАР} \right) \right], \\
 J \frac{d}{dt} \omega &= CI_{Я}\Phi_B \times \\
 &\times (W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР}) - M_C.
 \end{aligned} \right\} (11)$$

Как показали в последующем произведенные экспериментальные исследования, система уравнений (12) с достаточной для инженерных задач точностью описывает ДПТ СВ с учетом динамически изменяющихся параметров машины (дифференциальных индуктивностей якоря и возбуждения). На основе этой системы уравнений стало возможным создание уточненной имитационной модели ДПТ СВ, позволяющей учесть упомянутые параметры двигателя и предназначенной для исследования электромагнитных процессов, протекающих в тяговом двигателе постоянного тока со смешанным возбуждением.

С использованием уточненной модели был выполнен пример расчета ДПТ СВ типа ДК-210А-3 (устанавливаем на отечественном троллейбусе) [6] с номинальными параметрами, приведенными в табл. 1.

$$\left. \begin{aligned}
 U_{Я} - [C\omega\Phi_B(W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР}) + \\
 + I_{Я} \cdot (R_{Я} + R_{ПОСЛ})] &= \\
 &= \left(W_{Я}^2 \cdot L_{ДИФ.Я}(W_{Я} \cdot I_{Я}) + W_{ПОСЛ}^2 \times \right. \\
 &\times L_{ДИФ.В}(W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР}) \left. \right) \times \\
 &\times \frac{d}{dt} I_{Я} + W_{ПОСЛ} \cdot W_{ПАР} \cdot L_{ДИФ.В} \times \\
 &\times (W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР}) \frac{d}{dt} I_{ПАР}, \\
 U_{Я} - I_{ПАР} \cdot R_{ПАР} &= W_{ПАР}^2 \cdot L_{ДИФ.В} \times \\
 &\times (W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР}) \frac{d}{dt} I_{ПАР} + \\
 &+ W_{ПАР} \cdot W_{ПОСЛ} \cdot L_{ДИФ.В} \times \\
 &\times (W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР}) \frac{d}{dt} I_{Я}, \\
 J \frac{d}{dt} \omega &= CI_{Я}\Phi_B \times \\
 &\times (W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР}) - M_C.
 \end{aligned} \right\} (12)$$

Таблица 1. Номинальные параметры двигателя ДК-210А-3

Наименование параметра, размерность	Значение
Мощность, кВт	110
Напряжение, В	550
Частота вращения, об/мин	1500
Ток якоря, А	185
Сопротивление обмотки якоря, Ом	0,062
Сопротивление обмотки параллельного возбуждения, Ом	380
Сопротивление обмотки последовательного возбуждения, Ом	0,192
Число витков параллельной обмотки возбуждения, витков (одной катушки)	380
Число витков последовательной обмотки возбуждения, витков (одной катушки)	24

Конструктивные геометрические размеры двигателя ДК-210А-3 (в миллиметрах) показаны на рис. 4.

В качестве материалов для двигателя использованы следующие: для станины двигателя – сталь 2013, для якоря – слаболегированная сталь Э12, для основных и дополнительных полюсов – листовая сталь (Ст3) толщиной (1-2) мм. Кривые намагничивания для указанных материалов заимствованы из [7]. При помощи программы расчета магнитных полей ELCUT [5], исходя из геометрических размеров применяемых материалов двигателя, произведены расчеты зависимостей: $\Phi_{Я} = f(W_{Я} \cdot I_{Я})$ и $\Phi_{В} = f(W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР})$.

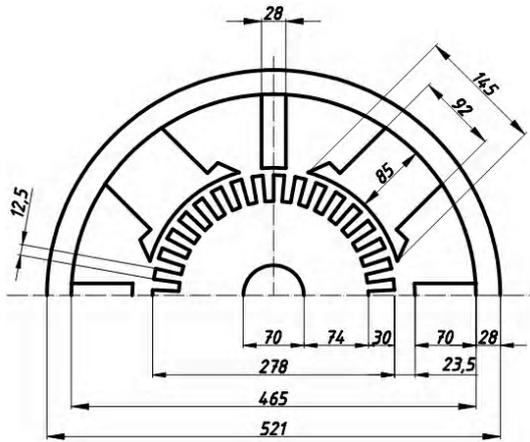


Рис. 4. Геометрические размеры двигателя ДК-210А-3
Данные расчета сведены в табл. 2 и 3.

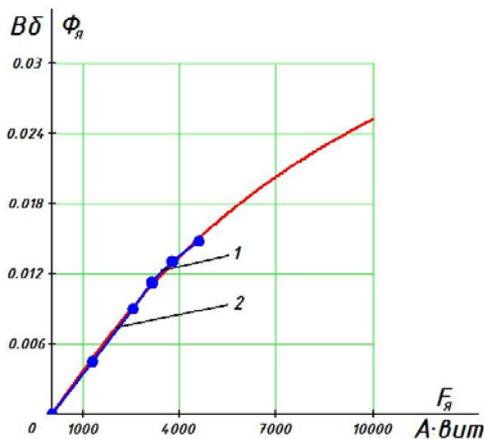
Таблица 2. Рассчитанные зависимости $\Phi_{Я} = f(W_{Я} \cdot I_{Я})$

$\Phi_{Я}, Вб$	0	0,0045	0,009	0,0112	0,0131	0,0148
$F_{Я}, А/м^2$	0	1250	2500	3125	3750	4563

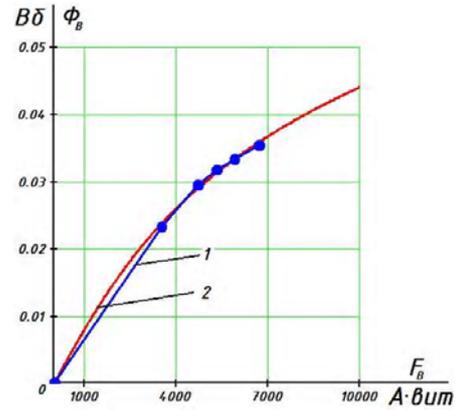
Таблица 3. Рассчитанные зависимости $\Phi_{В} = f(W_{ПОСЛ} \cdot I_{Я} + W_{ПАР} \cdot I_{ПАР})$

$\Phi_{В}, Вб$	0	0,0233	0,0296	0,0317	0,0334	0,0355
$F_{В}, А/м^2$	0	3525	4725	5325	5925	6705

На основании расчетных данных из табл. 2 и табл. 3 построим характеристики намагничивания (показаны на рис. 5, а, б жирными точками в виде кривой 1). Произведем аппроксимацию этих характеристик намагничивания гиперболическим арксинусом, выполненную при помощи пакета MathCAD [8] (показаны на рис. 5, а, б сплошной линией в виде кривой 2).



а)



б)

Рис. 5. Кривые намагничивания двигателя ДК-210А-3:
а – для $\Phi_{Я} = f(F_{Я})$; б – для $\Phi_{В} = f(F_{В})$

С учетом аппроксимированных значений кривых намагничивания двигателя, показанных на рис. 5, рассчитаем из соотношений (6) и (9) и построим на рис. 6 кривые изменения дифференциальных индуктивностей якоря и возбуждения.

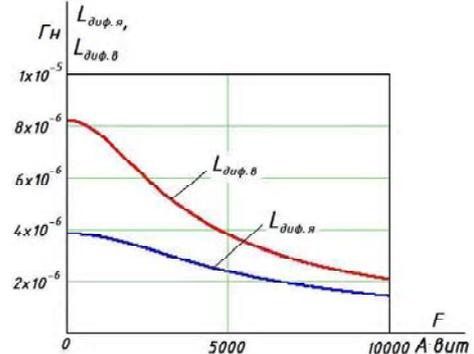


Рис. 6. Графики изменения дифференциальных индуктивностей якоря и возбуждения двигателя ДК-210А-3

С помощью программы MathCAD [8] методом Рунге-Кутты решим систему дифференциальных уравнений (12). По рассчитанным результатам построим на рис. 7 графики переходных электрохимических процессов разгона двигателя ДК-210А-3 с линейно изменяющимся моментом сопротивления вида: $M_C = M_{СН} + 0,1M_{СН}(\omega/\omega_H)$, где $M_{СН}$ – номинальный момент сопротивления двигателя; ω_H – номинальная скорость двигателя.

Выводы

Созданная имитационная модель ДПТ СВ точнее всех существующих производит расчет электрохимических переходных процессов в данном двигателе, поскольку в отличие от всех известных учитывает геометрические размеры элементов двигателя, типы примененных материалов, а также влияние изменения дифференциальных индуктивностей данного двигателя. Как показали экспериментальные исследования с двигателем ДК-210А-3, отличие рассчитанных на модели электрохимических переходных процессов от экспериментальных не превышает (5–8)%.

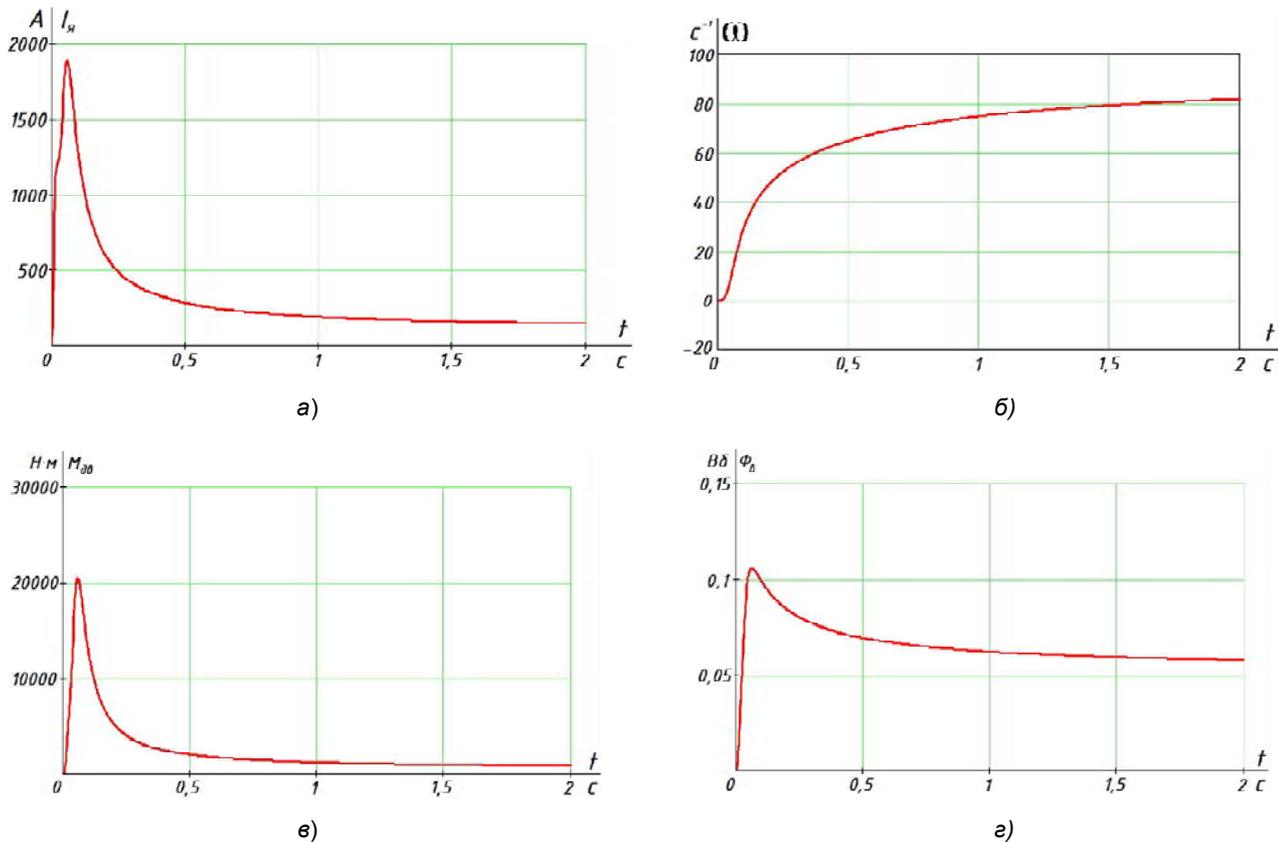


Рис. 7. Графики переходных электромеханических процессов при разгоне двигателя ДК-210А-3 (а – ток якоря; б – скорость; в – электромагнитный момент; г – магнитный поток возбуждения)

Перечень ссылок

1. Андреев В. П., Сабинин Ю. А. Основы электропривода. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 772 с.
2. Андриенко П. Д., Каплиенко А. О., Шило С. И., Немудрый И. Ю. Исследование динамики серийного электродвигателя с различными импульсными схемами регулирования // Электротехника та електроенергетика. – 2007. – № 1. – С4–8.
3. Вольдек А. И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 839 с.
4. Постников И. М. Проектирование электрических машин. – К.: ГИТЛ УССР, 1952. – 910 с.
5. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 4.2. Руководство пользователя. – СПб.: ПК TOP, 2000. – 130 с.
6. Вишник Г. В., Шабалин В. И., Осипов И. Г. Троллейбус пассажирский ЗиУ-682Б. – М.: Транспорт, 1977. – 208 с.
7. Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов / И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков и др. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.
8. Гурский Д. А., Турбина Е. С. Вычисление в MathCAD12. – СПб.: Питер, 2006. – 544 с.

Поступила в редакцию 19.06.08 г.

З використанням пакетів програм ELCUT і MathCAD розроблена уточнена модель електродвигуна постійного струму зі змішаним збудженням і виконаний з її використанням приклад розрахунку електромеханічних процесів тягового двигуна постійного струму для вітчизняного тролейбуса.

With the use of software packages of ELCUT and MathCAD the specified model of DC electric motor with the mixed excitation is developed and the example of calculation of electromechanics processes of DC traction motor is executed with its use for a domestic trolleybus.