

УДК 621.313

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В СИСТЕМЕ EWB

Бабенко В.П. к.т.н., доцент, E-mail: babenko@mirea.ru

Битюков В.К., д.т.н., профессор, зав. кафедрой, E-mail: bitukov@mirea.ru
МИРЭА, Москва, Россия

Аннотация. Система схемотехнического моделирования Electronics Workbench (EWB) отличается удобным и интуитивно понятным интерфейсом. Она получила широкое распространение при проведении, как семинарских занятий, так и лабораторного практикума по целому ряду радиоэлектронных и радиофизических дисциплин. Элементная база библиотеки EWB позволяет моделировать работу не только разнообразных электронных систем, но и электромеханических систем с исполнительным электродвигателем автоматической системы управления. Однако электродвигатель представлен лишь одной моделью DC Motor/Ideal, что ограничивает возможности программы. Предложена методика создания в библиотеке EWB неограниченного набора моделей электродвигателя при использовании в качестве исходных данных только технические параметры, приведенных в паспорте двигателя.

Ключевые слова: привод постоянного тока, система схемотехнического моделирования EWB, модель электродвигателя, учебно-исследовательский стенд.

SPECIAL METHODOLOGY OF DEVELOPING ELECTRIC MOTOR SIMULATOR IN THE EWB SYSTEM

Babenko V.P., PhD., assist. prof., E-mail: babenko@mirea.ru

Bitjukov V.K., Dr.ofSci (Tech.), prof., head of department, E-mail: bitukov@mirea.ru
MIREA, Moscow, Russia

Abstract. The circuit simulation system Electronics Workbench (EWB) is characterized by convenient and easily managed interface. It is widely used both at laboratory and practical classes of a number of subjects in radio electronics and radio physics. The hardware components available in the EWB library allow to simulate the activity of not only a variety of electronic, but electromechanical systems as well, with the actuating motor of an automatically controlled system. However, the electric motor is represented by only one Motor/Ideal DC model that limits the ability of the program. The methodology of building in the EWB library of an unlimited set of electric motor simulators is suggested where, as initial data, only the technical specifications in the motor passport is used.

Key words: direct current drive, circuit simulation system Electronics Workbench (EWB), electric motor simulator, training simulator.

В последние 15...20 лет активно ведется дискуссия по соотношению экспериментальной компоненты и компоненты компьютерного моделирования в учебном процессе [1, 2]. Естественно в том и другом случае приводятся веские и достаточно обоснованные доводы. Педагогический опыт показал, что указанные компоненты являются двумя сторонами одной медали. Поэтому в образовательном процессе равной степени должны использоваться как экспериментальное исследование физических процессов, протекающих в соответствующих устройствах, [3-9] так и их,

как правило, компьютерное моделирование [10-14]. Очевидно, что наилучший педагогический результат будет достигнут, если одно и то же устройство будет исследовано экспериментально и для конкретных параметров этого устройства будет выполнено компьютерное моделирование [14, 15].

При проведении учебных семинаров и лабораторного практикума по целому ряду радиоэлектронных и радиофизических дисциплин широко используется система схемотехнического моделирования Electronics Workbench 5.12. Среда EWB отличается удобным и интуитивно понятным интерфейсом. Она обладает гибкими регулируемыми возможностями проведения анализа. В этой среде доступна вполне достаточная для учебных целей библиотека аналоговых и цифровых компонентов. Более того, имеется возможность обновления, изменения и добавления собственных моделей [12, 13]. Отличительной особенностью EWB является возможность моделировать работу не только разнообразных электронных систем, но и электромеханических систем с исполнительным электродвигателем автоматической системы управления. Однако электродвигатель представлен лишь одной моделью DC Motor/Ideal, что ограничивает возможности программы. Поэтому в данной работе предложен способ создания в библиотеке EWB неограниченного набора моделей электродвигателя при использовании в качестве исходных данных только технических характеристик, приведенных в паспорте двигателя.

В панели компонентов Miscellaneous (разнообразные) содержится модель электродвигателя постоянного тока DC motor, содержащая обмотку возбуждения или статор (field), обмотку якоря или ротора (armature) и вывод, имитирующий выходной вал, с которого снимается сигнал U_o . Показания вольтметра U_o в вольтах соответствуют скорости вращения (об/мин). Схема включения электродвигателя на основании информации из HELP приведена на рис. 1. Такая модель позволяет изменять направление вращения и скорость вращения, переключая направление и величину тока через обмотки статора и ротора, позволяет реализовать три схемы включения двигателя: с параллельным, последовательным и независимым возбуждением.

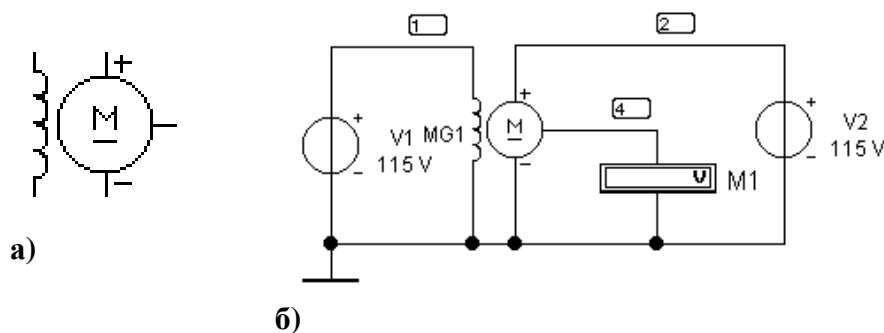


Рис. 1. Схема включения модели электродвигателя DC Motor/Ideal:
а – условное графическое обозначение (УГО); б - схема моделирования

Таблица 1. Меню Component Property DC Motor model 'Ideal'

Property model	Свойства модели	Размерность
Armature resistance (RA)	Сопротивление обмотки якоря	Ом
Armature Inductance (LA)	Индуктивность якоря	Гн
Field resistance (RF)	Сопротивление обмотки возбуждения	Ом
Field Inductance (LF)	Индуктивность обмотки возбуждения	Гн
Shaft friction (BF)	Момент трения скольжения	Н·м·с/рад
Machine rotational inertia (J)	Момент инерции вращения	Н·м·с/рад
Rated rotational speed (NN)	Номинальная скорость вращения	об/мин
Armature voltage Rated (VAN)	Напряжение на обмотке ротора	В
Rated armature current (IAN)	Ток в обмотке ротора	А
Rated field voltage (VFN)	Напряжение на обмотке возбуждения	В
Load torque (TL)	Внешний момент вращения	Н·м

Меню параметров модели, приведенное в табл.1, появляется после двойного щелчка левой клавишей мыши по выделенному компоненту Component Property/Edit. Ряд параметров описывают электрические свойства обмоток двигателя (ток, напряжение, сопротивление, индуктивность). Другая часть параметров относится к механическим характеристикам самого двигателя и параметрам внешней нагрузки. Сложность создания модели двигателя по справочным характеристикам связана с неопределенностью влияния каждого параметра многомерной модели. Для этого исследуются электромеханические характеристики модели DC Motor/Ideal в разных схемах включения.

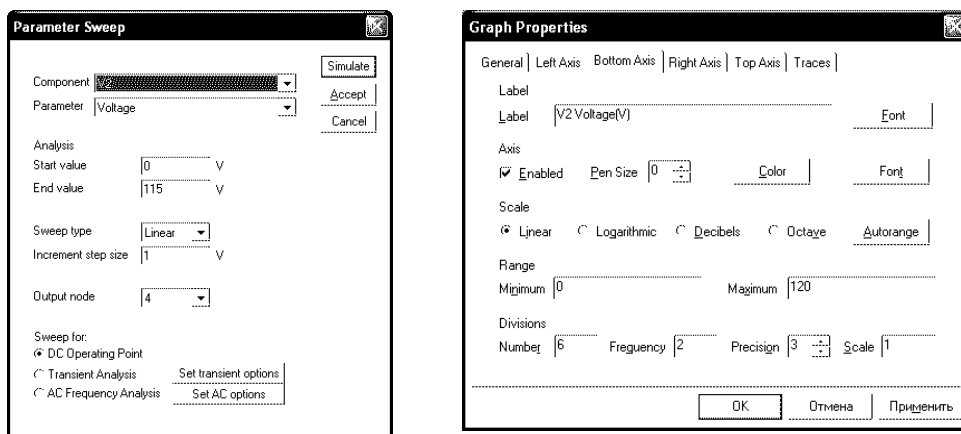
Схема управления скоростью вращения электродвигателя

Достаточно простой способ регулировки скорости вращения электродвигателя можно реализовать за счет изменения напряжения (тока) на обмотках (рис. 1). При этом возможны следующие способы регулировки скорости вращения путем изменения напряжения источника ($V=var$):

$$V1=var, V2=const,$$

$$V1=const, V2=var,$$

либо $V1=V2=var$, когда обе обмотки подключены к одному источнику (например, $V1$).



а)

б)

Рис. 2. Опции моделирования:
 а - окно опций Analysis/Parameter Sweep;
 б - окно редактирования параметров графика

В инструментарии EWB для исследования влияния какого-либо параметра на режим схемы, предусмотрена возможность моделирования с вариацией этого параметра (команда Analysis/Parameter Sweep). Для отображения на схеме нумерации выводов (nodes) и идентификаторов компонент (reference ID) следует в команде Circuit/Schematic Options, отметить галочками соответствующие действия.

Исследование скорости вращения электродвигателя от напряжения источников питания (схема на рис. 1,б) проводится в режиме Analysis/Parameter Sweep. В окне (рис. 2,а) выделяем компонент U2 (строка меню Component), а в строке Parameter задаем параметр компонента (Voltage), который будет изменяться в диапазоне от Start value (0 V) до End value (115 V). Выбираем линейный закон (Linear) свипирования в строке (Sweep type), шаг свипирования (Increment step size – 1 V) и тип анализа по постоянному току (DC Operating Point). Когда параметры установлены, то щелкаем клавишу Stimulate (Моделировать). Открывается окно Analysis Graphs с результатом моделирования. Параметры графика легко редактировать, щелкнув правой кнопкой на окне графика и выбрав в меню Graph Properties (рис. 2,б). Легко видеть, что редактируются практически все параметры графического изображения и оси. Результаты исследования скорости вращения при изменении напряжения источников питания показан на рис. 3.

Видно, что линейный закон регулирования скорости обеспечивается регулировкой напряжением или током в роторной обмотке (рис. 3,б) при фиксированном напряжении на статорной обмотке.

ШИМ-регулировка скорости вращения

Регулировка скорости вращения током или напряжением на обмотке энергетически невыгодна, так как значительная часть мощности выделяется в регуляторе, что снижает КПД, а также возникают проблемы с отводом тепла от регулятора.

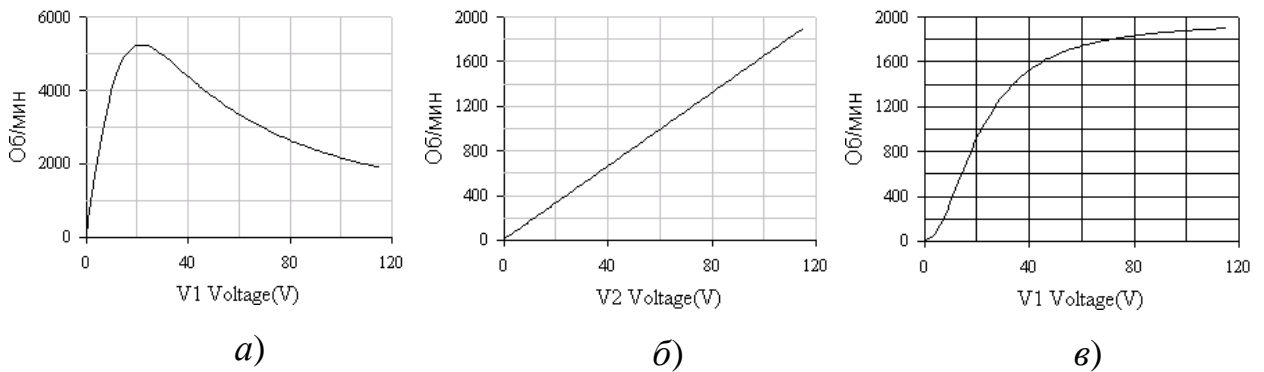


Рис. 3. Зависимость скорости вращения от напряжения питания:
 а - статорной обмотки $V1=var$; б - роторной обмотки $V2=var$;
 в - одновременное изменение питания обоих обмоток $V1=V2=var$

Этих недостатков лишен импульсный способ управления мощностью с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [8].

Для моделирования ШИМ-регулировки скорости вращения электродвигателя соберем схему, показанную на рис. 4.

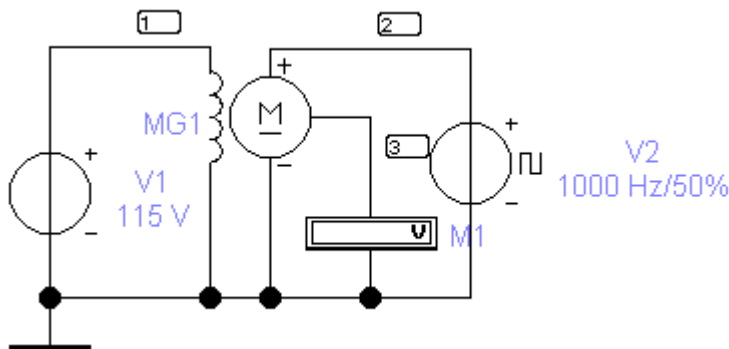
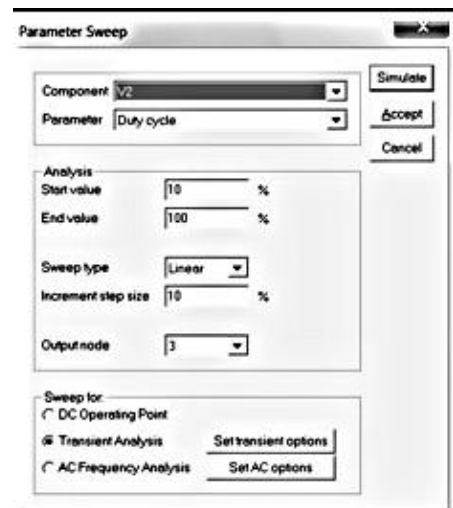


Рис. 4. Схема для моделирования ШИМ-управления скоростью вращения и опции меню Parameter Sweep



Чтобы наблюдать пульсации вращения (дребезг ротора) моделирование проводится в режиме Analysis Parameter Sweep/Transient Analysis. Статор питается от источника $V1$ постоянного тока, а ротор – от импульсного источника Clock, содержащегося в панели Source. В меню компонента Clock/Clock Properties устанавливаем амплитуду 115 В, частоту 100 Гц и 400 Гц в соответствующих

экспериментах. При установке режима моделирования в меню Analysis/Parameter Sweep в строке Sweep for, отмечаем опцию Transient Analysis. Принимаем установившийся режим процесса (считаем, что время переходного процесса – разгон двигателя менее 1 с). В окне Set Transient Option устанавливаем время начала моделирования Start Time 1 с и конец моделирования End Time 1,1 с.

Выбираем компонент V2 и в окне параметров устанавливаем режим свипирования для параметра Duty cycle (длительность импульса в %). Выбираем начальную и конечную величину длительности импульса от 10 % до 100 % с шагом (Increment step size) – 10 %.

Результаты моделирования для двух случаев (частоты 100 Гц и 400 Гц) показаны на рис. 5.

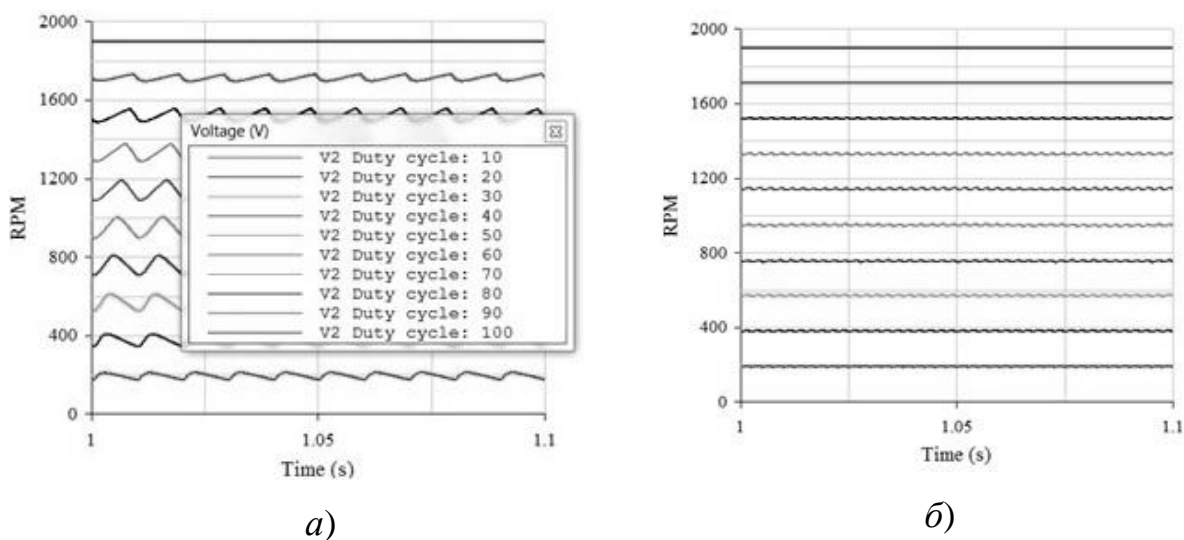


Рис. 5. Временные диаграммы скорости вращения от длительности импульсов (Duty cycle) для разной частоты следования импульсов F генератора V2: а - $F=100$ Гц; б - $F=400$ Гц

«Зубцы» на графике связаны с дребезгом ротора при импульсном управлении. На частоте 100 Гц они существенно выше, что означает необходимость оптимизирования частоту следования импульсов под конкретный электродвигатель. Равномерное расположение диаграмм на рис. 5,а и рис. 5,б при изменении длительности импульсов (Duty Cycle) подтверждает линейность управления скоростью вращения.

Исследование динамических характеристик электродвигателя

Основные электромеханические характеристики привода (время разгона и торможения привода, силовая нагрузка на вал привода) могут быть промоделированы схемой, показанной на рис. 6.

Особенностью схемы является использования ключа S1 (Time Delay Switch Properties из библиотеки “Basic”), который программно управляет током ротора. Опции ключа показаны на рис. 6,б. Время включения (Time on) выбрано отличным от нуля, чтобы на оси времени были видны начальные условия. Время выключения также выбрано равным 2 с, чтобы двигатель успел за это время набрать обороты и выйти на номинальный режим.

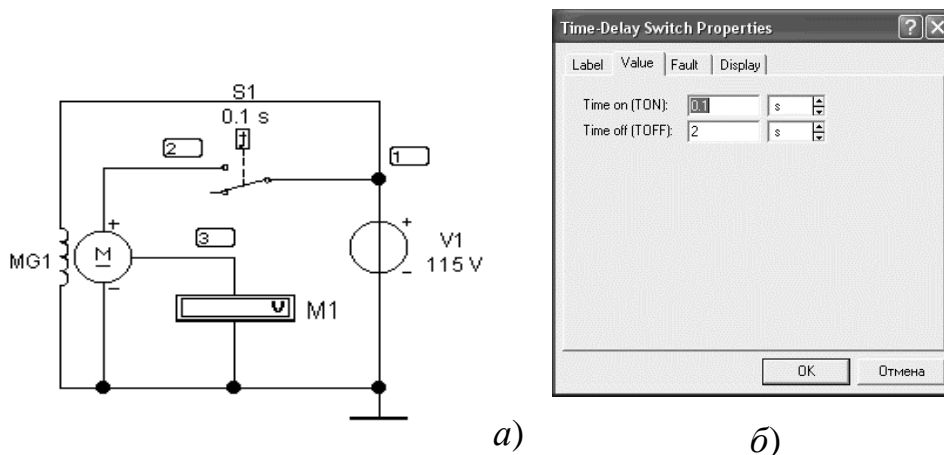


Рис. 6. Схема моделирования электромеханических характеристик:
а - схема включения электродвигателя; б - опции временного ключа S1

Моделирование ведется в режиме Analysis/Transient в течение временного интервала от 0 до 5 с, чтобы наблюдать время торможения двигателя после 2-х секундного разгона. Опции моделирования и результата моделирования показаны на рис. 7. Из графика видно, что время разгона составляет 0,1...0,2 с, после чего электродвигатель набирает номинальные обороты. Время торможения составляет свыше 3 с. Подобные динамические характеристики характерны стандартному режиму модели двигателя DC Motor “Ideal” при номинальном питании обмоток.

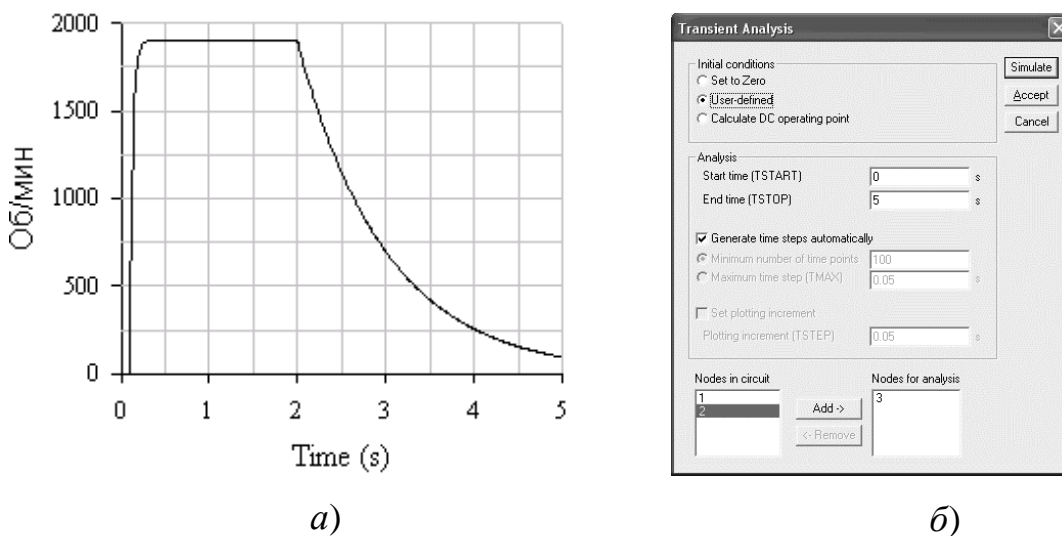


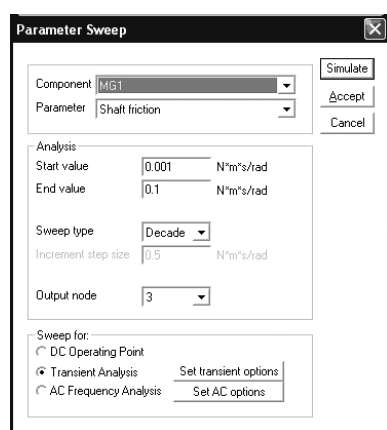
Рис. 7. Динамическая характеристика электродвигателя:
а - диаграмма разгона и торможения двигателя; б - опции моделирования

Исследование влияние параметров на электродинамические характеристики модели электродвигателя

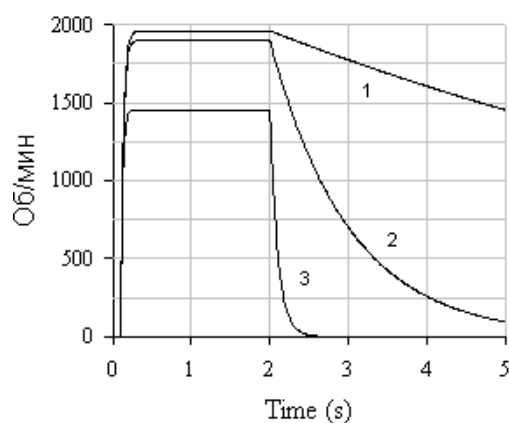
Чтобы разработать модель электродвигателя с заданными характеристиками необходимо понять взаимозависимость между параметрами модели DC Motor/Ideal. Для этого используем схему (рис. 6) в режиме моделирования Analysis/Parameter Sweep. А в качестве свипуемого параметра используем элементы модели электродвигателя, приведенные в табл. 1. Результаты моделирования и опции моделирования приведены ниже. В окне выбираем компонент, свойства которого исследуются (двигатель MG1), а в окне Parameter, щелкнув слайдер справа, выбираем из перечня параметров Shaft Friction. Величину Start value выбираем на порядок меньше номинальной (модель DC Motor/Ideal), а величину End value – на порядок больше номинальной.

В окошке Sweep Type устанавливаем логарифмический характер свипования – Decade. Режим анализа - Transient Analysis. Кнопкой Set transient options устанавливаем время анализа от 0 до 5 секунд, достаточное, чтобы наблюдать переходные процессы при разгоне и торможении.

Результат моделирования представлены на рис. 8 в виде семейства характеристик для разных значений параметра Shaft Friction. Время разгона практически не зависит от параметра Shaft Friction.



а)



б)

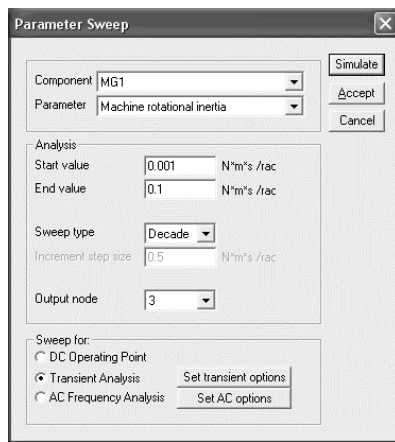
Рис.8. Влияние параметра Shaft Friction на динамические характеристики двигателя: а - окно опций моделирования; б - семейство динамических характеристик (1 - BF=0,001; 2 - BF=0,01; 3 - BF=0,1)

Номинальная скорость вращения снижается при увеличении момента трения. Время торможения существенно зависит от момента трения.

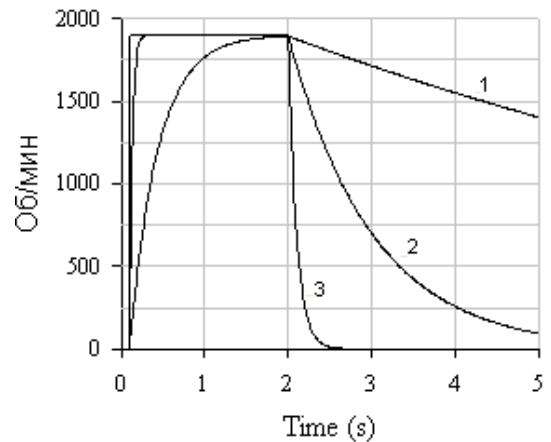
Аналогично исследуем влияние момента инерции Machine rotational inertia на время разгона и торможения. Параметры и результат моделирования показаны на рис 9.

С увеличением момента инерции увеличивается время разгона и торможения электродвигателя. Скорость вращения в установившемся режиме от момента инерции не зависит.

Результаты моделирования динамических характеристик двигателя при вариации параметра номинальной скорости вращения Rated Rotational Speed представлены на рис. 10. Время разгона и торможения практически не зависит от этого параметра, но в соответствии с параметром изменяется скорость вращения электродвигателя в установившемся режиме.

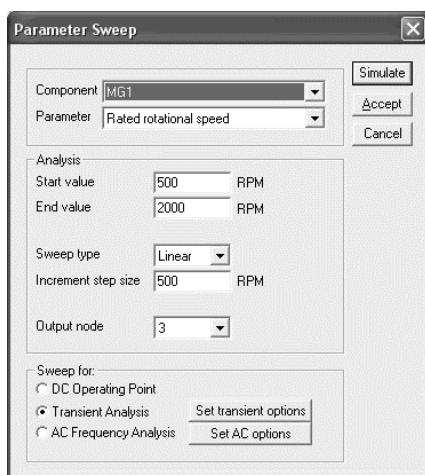


а)

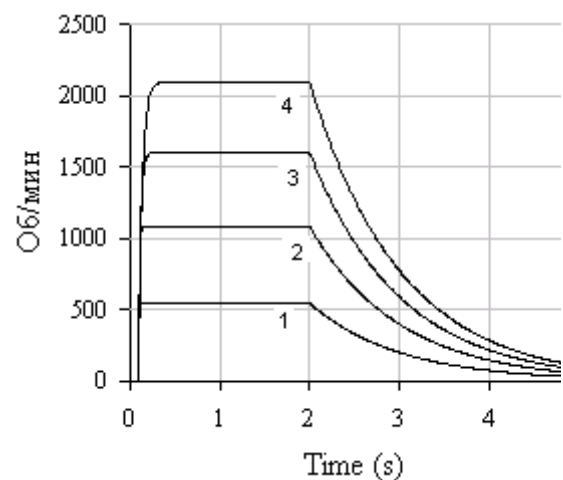


б)

Рис. 9. Влияние параметра Machine rotational inertia на динамические характеристики двигателя: а) окно опций моделирования; б) Семейство динамических характеристик (1 - $J=0,001$; 2 - $J=0,01$; 3 - $J=0,1$)



а)



б)

Рис. 10. Влияние параметра Rated Rotational Speed на динамические характеристики двигателя: а - окно опций моделирования; б - семейство динамических характеристик (1- $NN=500$ об/мин; 2- $NN=1000$ об/мин; 3- $NN=1500$ об/мин; 4- $NN=2000$ об/мин)

Моделирование показало, что параметр Rated Rotational Speed влияет на скорость вращения в установившемся режиме и практически не влияет на время разгона и торможения двигателя. В табл. 2 приведены параметры электродвигателя, которые показали, что при аналогичных исследованиях со свипированием в указанных диапазонах величин, оказывают незначительное влияние на динамические характеристики и в разработанных моделях могут быть оставлены без изменения и соответствующими модели DC Motor/Ideal.

Таблица 2. Диапазон изменения параметров модели, при которых влияние этих параметров на динамические характеристики двигателя не существенно

Параметры		Start Value	End Value
Armature resistance	Сопротивление обмотки якоря	0,5 Ом	1,5 Ом
Armature Inductance	Индуктивность обмотки якоря	0,0001 Гн	0,01 Гн
Field resistance	Сопротивление обмотки возбуждения	50 Ом	150 Ом
Field Inductance	Индуктивность обмотки возбуждения	0,0001 Гн	0,01 Гн

Из проведенного исследования модели DC Motor “Ideal” можно сделать выводы, полезные при разработке других моделей электродвигателей:

- характерное время разгона электродвигателя составляет доли секунды, а время торможения - несколько секунд;
- наибольшее влияние на динамические характеристики электродвигателя оказывают момент трения и момент инерции;
- момент трения практически не влияет на время разгона электродвигателя. При его увеличении снижается скорость вращения электродвигателя в установившемся режиме и резко уменьшается время торможения;
- момент инерции увеличивает время разгона и торможения и не влияет на скорость вращения в установившемся режиме.

Разработка модели электродвигателя по техническим параметрам

В пакете EWB имеется возможность пополнять библиотеку компонент дополнительными (разработанными) моделями. Воспользуемся этим для создания модели электродвигателя в соответствии конкретными техническими параметрами. Для этого в меню DC Motor Properties, выделив модель DC Motor/Ideal, копируем параметры идеальной модели, нажав кнопку Copy. Создадим свою библиотеку (например, “My”), нажав кнопку New Library. Откроем созданную библиотеку “My” и копируем в папку параметры модели “Ideal”, щелкнув кнопку Paste. В открывшемся

окне переименуем созданную модель (например, 24В,1А). Отредактируем параметры модели, записав в соответствующих ячейках заданные напряжение, ток и скорость вращения. Остальные параметры оставим без изменения. Соберем схему для исследования динамических характеристик, подобную показанной на рис. 6, с новой моделью электродвигателя и источником питания 24 В. Результаты моделирования в режиме Analysis/Transient показаны на рис. 11.

Характеристика (рис. 11,а) соответствуют промежуточной модели, когда отредактированы только параметры: ток и напряжение. Остальные параметры оставлены без изменения, как у модели “Ideal”. Очевидно, что характеристика (рис. 11,а) соответствует слишком большому времени разгона, а также отсутствует участок номинальной скорости - электродвигатель за две секунды не успевает разогнаться до номинальных оборотов. Время торможения приблизительно в норме. Такое поведение характеристики возможно, если момент инерции слишком большой. После коррекции модели электродвигателя (уменьшение момента инерции) динамическая характеристика приобретает характер, подобный модели DC Motor/Ideal, и показана на рис 11,б.

На рис. 12 приведены примеры разработанных моделей двигателей. Моделирование привода с моделями электродвигателей, приведенных на рис. 12, продемонстрировало гибкие пусковые и регулировочные характеристики, хорошее соответствие электромеханических характеристик стандартной модели.

Parameter	Value	Unit
Armature resistance (RA)	1.1	Ω
Armature inductance (LA)	0.001	H
Field resistance (RF)	128	Ω
Field inductance (LF)	0.001	H
Shaft friction (BF)	0.01	N*m*s/rad
Machine rotational inertia (J)	0.01	N*m*s ² /rad
Rated rotational speed (NN)	1800	RPM
Rated armature voltage (VAN)	24	V
Rated armature current (IAN)	1	A
Rated field voltage (VFN)	24	V

Parameter	Value	Unit
Armature resistance (RA)	0.001	Ω
Armature inductance (LA)	0.001	H
Field resistance (RF)	128	Ω
Field inductance (LF)	0.001	H
Shaft friction (BF)	0.001	N*m*s/rad
Machine rotational inertia (J)	0.001	N*m*s ² /rad
Rated rotational speed (NN)	1800	RPM
Rated armature voltage (VAN)	24	V
Rated armature current (IAN)	1	A
Rated field voltage (VFN)	24	V

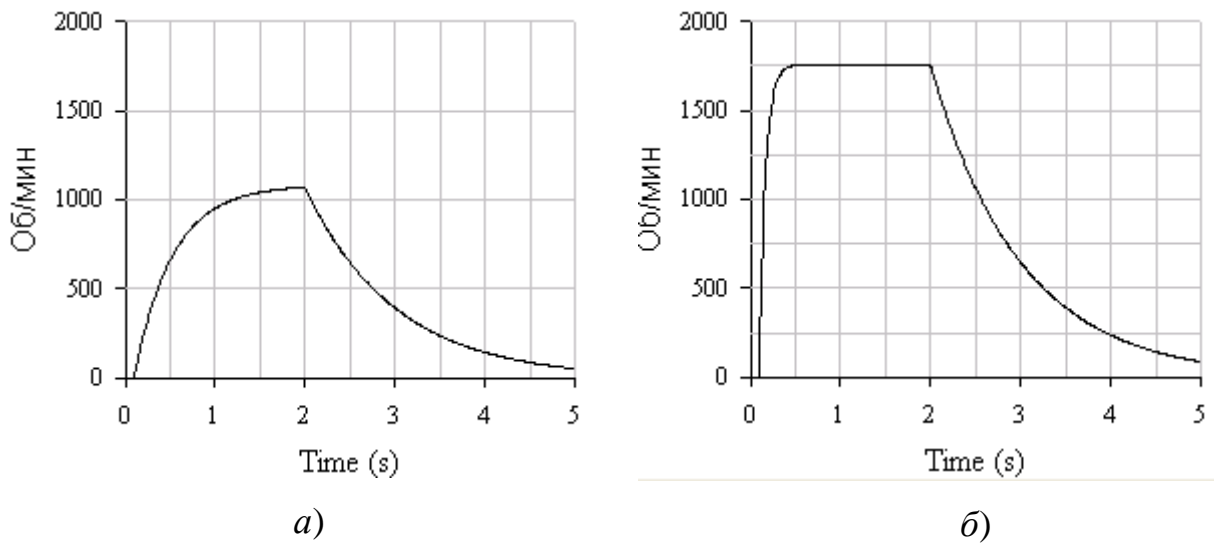
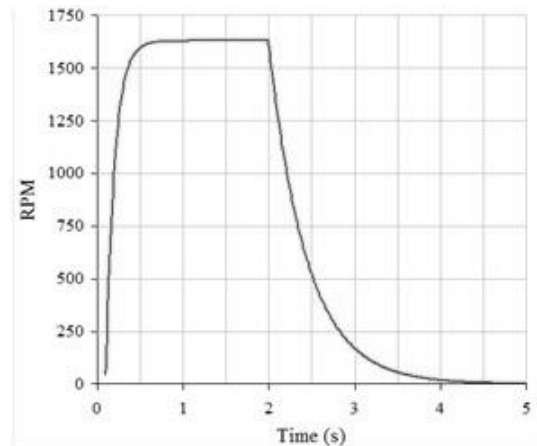
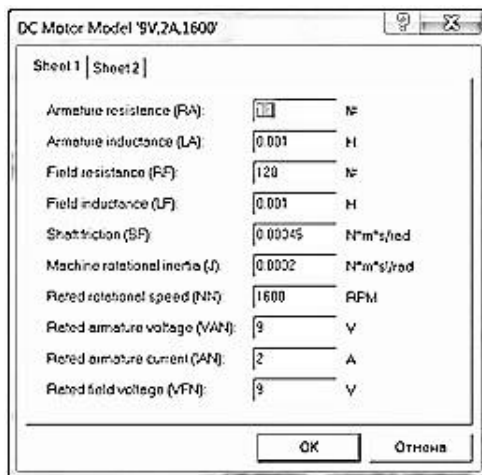
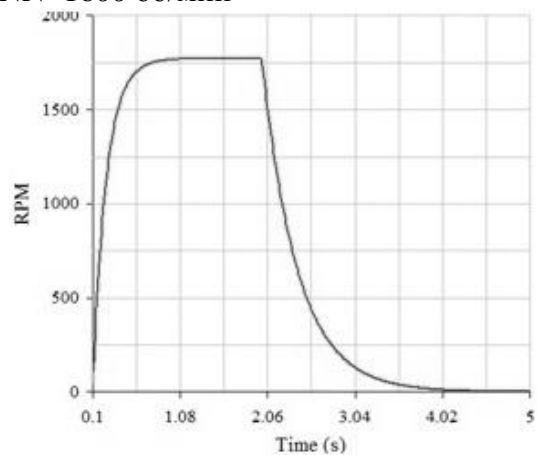
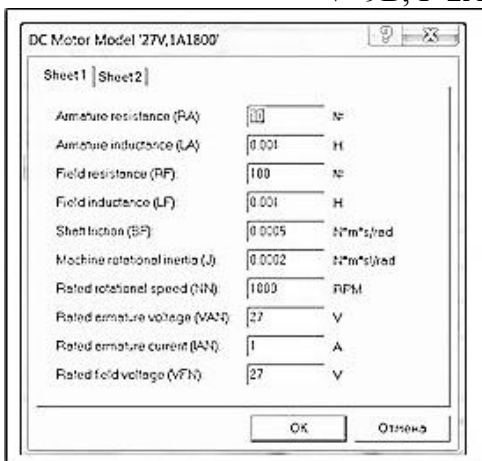


Рис. 11. Параметры и динамические характеристики двигателя DC Motor “24V,1A”: а - характеристики промежуточной модели двигателя с неоптимизированной нагрузкой; б - характеристики модели двигателя “24V,1A” с оптимизированной нагрузкой

Появилась возможность исследовать в системе EWB переходные электромагнитные и электромеханические процессы привода с электродвигателем, параметры которого заданы техническими характеристиками.



V=9V, I=2A, NN=1600 об/мин



V=27V, I=1A, NN=1800 об/мин

Рис. 12. Параметры и динамические характеристики электродвигателей

Выводы

Разработана технология моделирования и выполнено исследование влияния параметров модели DC Motor “Ideal” на электродинамические характеристики электродвигателя.

Исследованы способы регулирования скорости вращения изменением напряжения на обмотках и ШИМ управления.

Установлено, что линейная регулировочная характеристика получается при регулировании тока в якорной обмотке при фиксированном токе статорной обмотки.

Приведена методика создания модели двигателя по заданным техническим параметрам.

Расширены возможности использования EWB 5.12 в учебном процессе для моделирования устройств автоматики с электродвигателем постоянного тока.

Литература

1. Битюков, В. К. Формирование у студентов наукоемких специальностей системно-творческого подхода / В.К. Битюков, Г. Ф. Горшков, Л. П. Русинова // Наукоемкие технологии. – 2007. – Т. 8. - № 2-3. – С. 103-107.
2. Битюков, В. К. Способы повышения продуктивности действий студентов, обучающихся по наукоемким техническим направлениям / В. К. Битюков, Л. П. Русинова // Наукоемкие технологии. – 2007. – Т. 8. - № 2-3. – С. 108-113.
3. Битюков, В. К. Экспериментальное исследование стабилизированных источников вторичного электропитания / В. К. Битюков, А. В. Миронов, Н. Г. Михневич, В. А. Петров // Учебный эксперимент в образовании. – 2015. - № 1(73). – С. 68-82.
4. Битюков, В. К. Исследование характеристик стабилизированных источников электропитания, построенных на базе регулируемых DC-DC преобразователей с накачкой заряда / В. К. Битюков, А. В. Богатов, Н. Г. Михневич, В. А. Петров // Наукоемкие технологии. – 2012. – Т. 13. - № 5. – С. 5–15.
5. Битюков, В. К. Нагрузочные характеристики стабилизированных источников вторичного электропитания на основе регулируемого DC-DC преобразователя MAX1759 с накачкой заряда / В. К. Битюков, А. В. Богатов, Н. Г. Михневич, В. А. Петров // Сборник научных трудов первой Международной научно-практической конференции “Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем”. Часть 1. Москва: 28-30 марта 2013 года. – С. 12–14.

6. Битюков, В. К. Виртуальная лицевая панель реального стенда для дистанционного управления исследованием характеристик стабилизированных источников вторичного питания / В. К. Битюков, А. А. Иванов, Н. Г. Михневич, В. А. Петров // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2014. – Т. 19. – № 1. – С. 52–57.
7. Битюков, В. К. Учебно-исследовательский стенд DC-DC преобразователя с накачкой заряда / В. К. Битюков, Н. Г. Михневич, В. А. Петров // Материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий, ИНФО-2014», Сочи: 1-10 октября 2014. – С. 48–50.
8. Битюков, В. К. Лабораторный практикум по дисциплине «Физические основы преобразовательной техники»: Учебное пособие для вузов / В. К. Битюков, Ю. А. Власюк, В. А. Петров, Е. И. Федоров. – М.: МИРЭА, 2003. – 148 с.
9. Нефедов, В. И. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах: Учебник для вузов / В. И. Нефедов, А. С. Сигов, В. К. Битюков, В. И. Хахин, Ю. Д. Белик, В. С. Верба, Ю. И. Борисов / Под ред. В. И. Нефедова и А. С. Сигова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2005. – 599 с.
10. Каганов, В. И. Основы радиоэлектроники и связи: Учебное пособие для вузов / В. И. Каганов, В. К. Битюков. – 2-е изд. – М.: Горячая линия-Телеком. 2012. – 542 с.
11. Бартенев, В. Г. Инновационный курс «Программируемая радиоэлектроника» для инженерных вузов / В. Г. Бартенев, В. К. Битюков, Е. Г. Кузеленкова // Цифровая обработка сигналов. – 2011. – №4. – С. 37-41.
12. Бабенко, В. П. Схемотехника электронной аппаратуры управления, контроля и мониторинга параметров волоконных лазеров и телекоммуникационных ВОСП. Компьютерное моделирование / Учебное пособие // В. П. Бабенко, В. Н. Серов, В. И. Шишкин. – М.: МГТУ МИРЭА, 2013. – 98 с.
13. Бабенко, В. П. Схемотехника электронной аппаратуры управления, контроля и мониторинга параметров волоконных лазеров и телекоммуникационных ВОСП. Компьютерное моделирование / Учебное пособие // В. П. Бабенко, В. Н. Серов. – М.: МИРЭА. 2011. – 95 с.
14. Битюков, В. К. Методические особенности построения управляемых выпрямителей с вольтодобавкой / В. К. Битюков, Д. С. Симачков // Учебный эксперимент в образовании. – 2014. – №1(69). – С. 64-79.
15. Битюков, В. К. Электропреобразовательные устройства / Учебное пособие // В. К. Битюков, А. А. Бокуняев, Э. М. Черниговская. – М.: МИРЭА. 2000. – 155 с.