

УДК 519.6, 621.3

DOI: 10.26102/2310-6018/2019.26.3.037

Ю.В. Бебихов, А.С. Семёнов, М.Н. Семёнова, И.А. Якушев  
**АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ В СРЕДЕ MATLAB**

*Политехнический институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия*

*Рассмотрен пакет программ MatLab с точки зрения универсальной среды моделирования технических систем. Произведен анализ методов математического, структурного и физического моделирования в MatLab при помощи библиотеки блоков Simulink и приложения SimPowerSystems. Для исследования выбрана электромеханическая система – двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, как одна из самых распространенных для приведения в движение технологических установок циклического действия. При помощи лабораторной установки разработана имитационная модель, позволяющая произвести оценку, анализ и сравнение результатов, полученных при моделировании, с реальными данными. Для проведения моделирования были рассчитаны дополнительные параметры двигателя постоянного тока, к которым относятся активные сопротивления и индуктивности обмоток якоря и возбуждения, взаимоиндукция, момент инерции, конструктивные и временные постоянные двигателя. Разработаны физическая, структурная и математическая модели. Получены результаты моделирования в виде графиков временных зависимостей основных параметров двигателя. Был произведен детальный анализ угловой скорости вращения двигателя постоянного тока, так как она является основной координатой для регулирования. Оценке подлежали качественные и количественные характеристики переходного процесса, такие как время регулирования, величина перерегулирования, количество колебаний. В ходе оценки и анализа результатов моделирования были установлены преимущества и недостатки различных методов моделирования технических систем в пакете программ MatLab. Сделаны заключения об универсальности среды MatLab для возможностей детальной и точной оценке сложных технических систем.*

**Ключевые слова:** моделирование технических систем, MatLab, Simulink, двигатель постоянного тока, угловая скорость вращения, переходной процесс, погрешность.

## **Введение**

Моделирование представляет собой сложный процесс, целью которого является создание представления о поведении той или иной системы при вариациях её параметров. Под моделированием на практике понимают адекватную замену исследуемого технического устройства или процесса соответствующей моделью и ее последующее изучение известными методами. Конечно, модель не является точной копией объекта или системы, и моделирование подразумевает пренебрежение какими-либо

процессами, происходящими в реальности. Однако моделирование широко применяется для изучения основных процессов. Кроме того, замена реального объекта его моделью дает большие преимущества для исследования.

В настоящее время на рынке программного обеспечения существует множество программ для моделирования технических систем. Некоторые из них появились не так давно, а какие-то – хорошо знакомы пользователям и являются очень популярными. Встречаются программы, которые могут использоваться для моделирования любых технических систем, но есть и имеющие узкую специализацию в какой-либо предметной области. Опираясь на такие важнейшие показатели функциональности программ, как назначение и возможности, состав библиотек и приложений, принципы построения моделей, методы интегрирования, средства визуализации результатов, представим структурную схему классификации программ моделирования технических систем (рисунок 1).

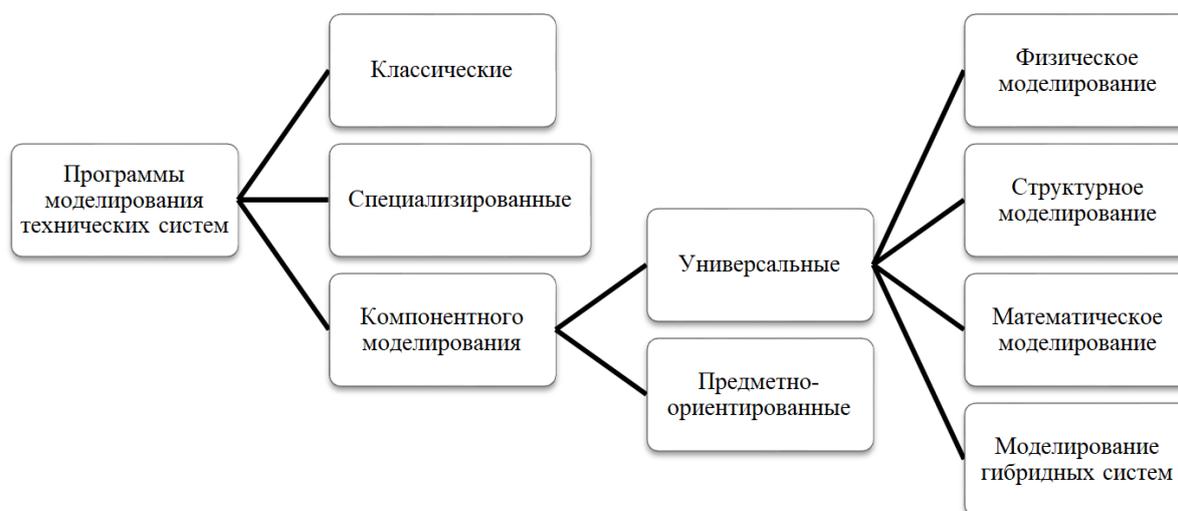


Рисунок 1 – Классификации программ моделирования технических систем

Так называемые «классические» программы, такие как Mathematica, Maple, MathCAD, хорошо приспособлены к выполнению расчетов в дисциплинах естественнонаучного цикла, когда модель задается в аналитической форме. В этих случаях программирование заключается в написании сравнительно небольших по объему программ, состоящих в основном только из макрооператоров. Программы же компонентного моделирования практически полностью ориентированы на численные эксперименты. В настоящее время они преобладают в процессах проектирования технических объектов и систем. К числу универсальных

программ моделирования, не ориентированных на конкретные прикладные области моделирования технических систем, можно отнести пакет программ MatLab.

На первый взгляд моделированию различных видов технических систем в пакете программ MatLab посвящено много работ, как научных, так и учебно-методических. Но если откинуть самоучители и учебные пособия, в которых больший объем информации занимает описание блоков и библиотек пакета программ, то получим ограниченный список авторов и их работ, где действительно дается качественная оценка методам моделирования технических систем в среде MatLab. Проанализируем ряд таких работ, посвященных моделированию электротехнических и электромеханических систем.

В работе [1] авторами произведена оценка влияния инерционности контура момента на временные и частотные характеристики системы позиционирования. Характеристики систем позиционирования получены с помощью средств символьной математики MathCAD и моделирования в среде MatLab/Simulink с использованием инструментов Linear Analysis. Этими же авторами в работе [2] определена фиксированная настройка, обеспечивающая робастность системы позиционирования при вариации инерционности модуля.

В работах [3-5] авторы представили модель на основе уравнения закона сохранения энергии при прокатке. Представлена структурная схема математической модели взаимосвязанных электроприводов вертикальных и горизонтальных валков трехклетевой прокатной группы стана. В результате сравнения переходных процессов координат электроприводов и параметров прокатки, полученных при моделировании и путем осциллографирования на стане, подтверждена адекватность разработанной модели исследуемому объекту.

Значительное внимание стоит уделить работе [6], где авторами разработаны математические модели алгоритмов модуляции. Они позволяют проводить исследования показателей электромагнитной совместимости трехуровневых преобразователей частоты с фиксированной нейтралью на базе различных многопульсных схем соединения с питающей сетью.

В работе [7] авторами проведено исследование электромагнитной совместимости частотно-регулируемого электропривода в программной среде MatLab/Simulink. При помощи моделирования подтверждено, что применение частотно-регулируемого асинхронного электродвигателя позволяет улучшить электромагнитную совместимость источника электроэнергии и уменьшить затраты на энергообеспечение.

Большой вклад в моделирование режимов работы систем электроприводов технологических установок горных предприятий внесен

авторами в работах [8, 9]. Разработаны структурные модели насосных и вентиляторных агрегатов в среде MatLab с использованием средств визуального моделирования Simulink для исследования электромеханических процессов, происходящих в центробежных машинах. Изложены принципы построения систем регулируемого электропривода машин и установок горного производства с циклическим характером действия (подъемные установки, краны, экскаваторы). Приведены методики расчета элементов силовой цепи и систем управления.

В недавних работах [10, 11] авторами рассмотрены особенности математического моделирования систем электроприводов технологических установок горных предприятий. Исследованы главная вентиляторная установка и скиповая подъемная установка подземного рудника, а также пульпонасосная установка обогатительной фабрики. Разработаны математические модели в MatLab/Simulink, подтверждающие эффективность внедрения систем частотно-регулируемого электропривода. Этими же авторами в работе [12] разработана математическая модель электромагнитного привода с системой управления стабилизации производительности питателя рентгенолюминесцентного сепаратора обогатительной фабрики.

Отличительной особенностью работы [13] является разработка достаточно сложной и трудоемкой универсальной математической модели системы электроснабжения участка промышленного предприятия, которая может адаптироваться под систему электроснабжения любого передела с питанием от 110 кВ и потребителями на 6/0,4 кВ.

Исходя из вышеизложенного, и принимая во внимание работу [14], можно сделать вывод, что среда MatLab, в частности приложение Simulink, позволяют получить мощный инструмент исследования сложных технических систем. Согласно классификации, представленной на рисунке 1, пакет программ MatLab был отнесен к универсальным программам моделирования, т.е. при помощи его инструментов можно реализовать и математическое, и структурное и физическое моделирование. Для подтверждения или опровержения этого факта выберем электромеханическую систему и проведем моделирование всеми тремя способами. Кроме того проанализируем и сопоставим все результаты моделирования с результатами, полученными на реальной лабораторной установке (имитационной модели).

### **Цель и задачи исследования**

Целью настоящего исследования будет являться анализ и сопоставление результатов моделирования электромеханической системы в пакете программ MatLab различными методами: физическое, структурное и математическое моделирование. Для достижения поставленной цели будут

решены следующие задачи: выбор электромеханической системы; разработка имитационной модели на лабораторном стенде для получения реальных данных; расчет математических и дополнительных физических параметров электромеханической системы; разработка и построение моделей тремя вышеуказанными методами; сопоставление смоделированных параметров; расчет погрешностей различных методов моделирования.

### **Объект и методика исследования**

В качестве объекта исследования выберем двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, так как он является очень распространенным электромеханическим преобразователем, используемым в системе электропривода промышленных установок, в связи с простотой регулирования координат.

Вид лабораторной установки, с помощью которой будет производиться имитационное моделирование, приведен на рисунке 2. На нем позициями обозначены следующие элементы: 1 – источник питания двигателя постоянного тока; 2 – указатель частоты вращения; 3 – преобразователь частоты; 4 – двигатель постоянного тока; 5 – маховик; 6 – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Коротко опишем принцип работы лабораторной установки. Двигатель постоянного тока 4 запитывается от источника питания двигателя постоянного тока 1, который обеспечивает независимое питание обмоток якоря и возбуждения. Причем на обмотке якоря возможна, как в ручном, так и в автоматическом режиме (через ПК) регулировка уровня напряжения. Для получения номинальных параметров работы и имитации нагрузки на валу двигателя постоянного тока используется связка преобразователя частоты 3 и асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором 6, который передает требуемое усилие на маховик 5. Величина частоты вращения двигателя постоянного тока при номинальной нагрузке фиксируется на указателе частоты вращения 2. Таким образом, в нашей имитационной модели частота вращения (переведенная в угловую скорость вращения) будет являться главной координатой электромеханической системы для дальнейшего исследования и сравнения.

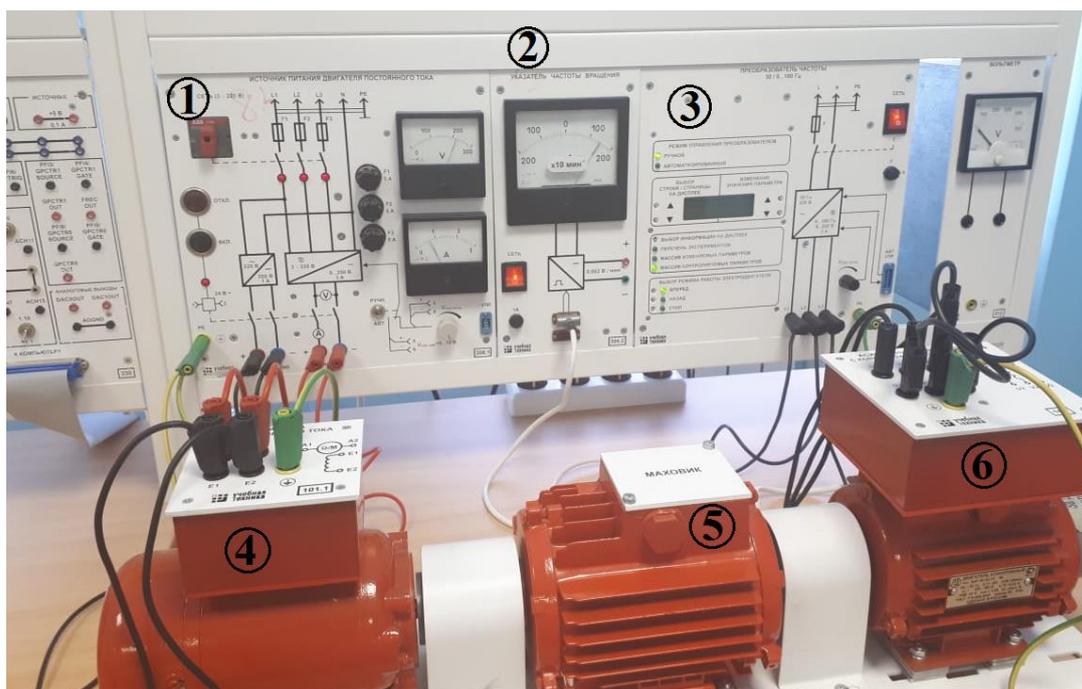


Рисунок 2 – Лабораторная установка для имитационного моделирования

Паспортные данные двигателя постоянного тока, используемого в имитационной модели, представлены в таблице 1. Они потребуются для дальнейших расчетов недостающих физических и временных параметров.

Таблица 1 – Паспортные данные двигателя постоянного тока ПЛ-062

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Тип двигателя	ПЛ-062 УХЛ 4
2	Номинальная мощность, $P_n$	90 Вт
3	Номинальное напряжение, $U_n$	220 В
4	Номинальный ток обмотки якоря, $I_{an}$	0,76 А
5	Номинальный ток обмотки возбуждения, $I_{fn}$	0,16 А
6	Номинальный момент, $M_n$	0,573 Н*м
7	Номинальный КПД двигателя, $\eta_n$	0,575
8	Номинальная частота вращения, $n_n$	1500 об/мин
9	Режим работы – продолжительный	S1

Как уже отмечалось ранее, в качестве методики исследования выбраны методы математического, структурного и физического моделирования в пакете программ MatLab, который отличается достаточной точностью моделирования технических систем с погрешностью не более 10 %.

## Основная часть исследования

**Расчет параметров для моделирования.** Произведем расчет дополнительных параметров двигателя постоянного тока для дальнейшего их использования в моделях.

Для реализации физической модели рассчитаем сопротивления и индуктивности обмоток якоря и возбуждения, взаимную индукцию, момент инерции по методикам, представленным в [15, 16].

Активное сопротивление обмотки якоря определим, используя приближенную формулу, предполагающую, что половина всех потерь в двигателе приходится на долю якоря:

$$R_a = 0.5 \cdot (1 - \eta_n) \cdot \frac{U_n}{I_n} = 61.510 \text{hm}$$

Индуктивность якорной цепи может быть найдена по формуле:

$$L_a = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_n}{I_n}\right)^2 - R_a^2}}{\omega_n} = 1.802 \text{H}$$

где  $\omega_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60} = 157 \text{rad/s}$  – угловая скорость вращения двигателя.

Активное сопротивление обмотки возбуждения определим по закону Ома:

$$R_f = \frac{U_{fn}}{I_{fn}} = 12500 \text{hm}$$

где  $U_{fn} = 200 \text{V}$  – напряжение, подаваемое из источника на обмотку возбуждения.

Индуктивность обмотки возбуждения определим по формуле, предусматривающей запас по конструктивному коэффициенту, где величина  $C=(2 \div 5)$  принимается по соображениям, что большая величина относится к тихоходным двигателям, а также к некомпенсированным машинам, как в нашем случае:

$$L_f = 5 \cdot \frac{L_a \cdot R_f}{R_a} = 183.1 \text{H}$$

Взаимная индуктивность между цепью якоря и цепью возбуждения двигателя определяется по следующей формуле:

$$L_{af} = \frac{M_n}{I_{an} \cdot I_{fn}} = 4.712 \text{H}$$

Момент инерции двигателя определим по аналогии индуктивности обмотки возбуждения с учетом конструктивного коэффициента по формуле:

$$J = 5 \cdot \frac{L_a \cdot P_n^2}{\omega_n^2 \cdot R_a^2 \cdot I_{an}^2} = 0.00135 \text{kg} \cdot \text{m}^2$$

Для реализации структурной и математической моделей необходимо рассчитать параметры двигателя по методикам, представленным в [17, 18]. Приведем расчет постоянных времени и коэффициентов двигателя постоянного тока: моментная постоянная двигателя:  $C_M = M_n / I_{an} = 0.754$ ; конструктивная постоянная двигателя:  $C_E = 0.95$ ; электромагнитная постоянная времени:  $T_E = L_a / R_a = 0.0293$ ; электромеханическая постоянная времени:  $T_M = (J \cdot R_a) / C_M^2 = 0.146$ .

После выполнения всех необходимых расчетов и получения дополнительных параметров двигателя постоянного тока можно приступить к моделированию.

**Разработка и реализация физической модели.** Для разработки и реализации физической модели двигателя постоянного тока в пакете программ MatLab воспользуемся приложением Simulink, а именно подкаталогом библиотеки блоков SimPowerSystems. В новых версиях пакета программ MatLab (с 2014 года) предусмотрен большой набор примерных разработанных физических моделей электротехнических и электромеханических систем. Различные модели двигателя постоянного тока можно найти путем ввода в строку поиска адреса //SimPowerSystems/Specialized Technology/Electric Drives/Simulate a DC Motor Drive. Но для точности проводимых исследований, нами будет разработана физическая модель «с нуля».

Для создания модели будут использованы следующие блоки: DC Machine – блок двигателя постоянного тока; DC Voltage Source – источник постоянного напряжения; Ground – заземлитель; Constant – источник постоянного значения (имитирует номинальную нагрузку на валу двигателя); Bus selector – шина-селектор (обеспечивает выбор необходимых параметров для измерения); Scope – осциллограф (используется для отображения результатов в функции времени); XY Graph – графопостроитель (используется для отображения результатов в функции  $y(x)$ ); Powergui – блок графического интерфейса (обеспечивает хранения эквивалентной Simulink-модели в пространстве состояний). После того как все блоки добавлены в модель, соединяем их между собой в необходимой последовательности и получаем готовую физическую модель (рисунок 3).

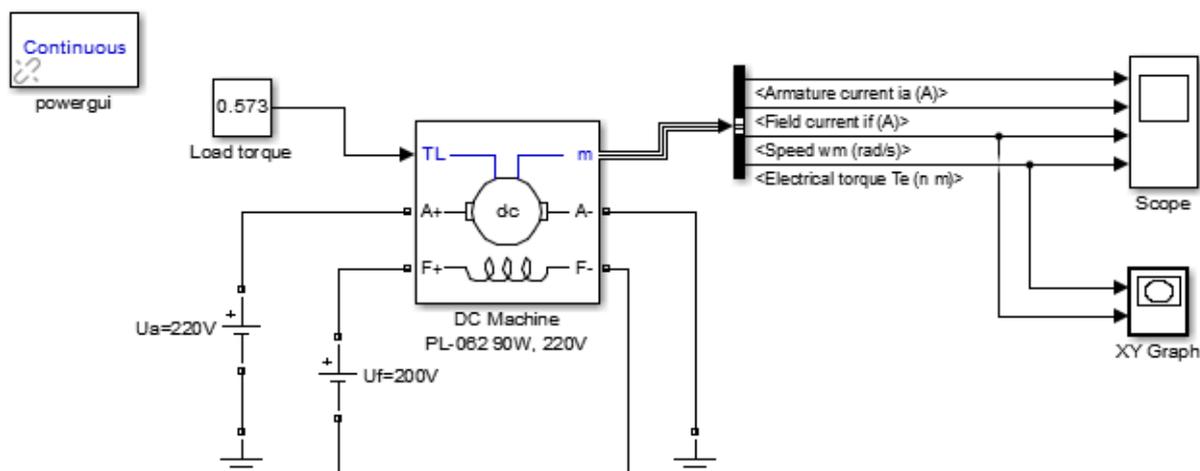


Рисунок 3 – Физическая модель двигателя постоянного тока в SimPowerSystems

Для обеспечения корректной работы модели в главный блок DC Machine подставляем рассчитанные ранее параметры и паспортные данные двигателя. В блоки DC Voltage Source подставляем значения напряжений, поступающих на обмотку якоря и обмотку возбуждения соответственно. В блок Constant подставляем номинальный момент двигателя.

Когда все манипуляции с блоками модели завершены, запускаем процесс моделирования, в результате чего получаем на блоке Scope временные зависимости токов якоря (а) и обмотки возбуждения (б), угловую скорость вращения (в) и электромагнитного момента (г) двигателя постоянного тока (рисунок 4). Также с помощью блока XY Graph можно получить механическую характеристику двигателя постоянного тока – зависимость угловой скорости вращения от электромагнитного момента. Численные результаты моделирования будут проанализированы далее.

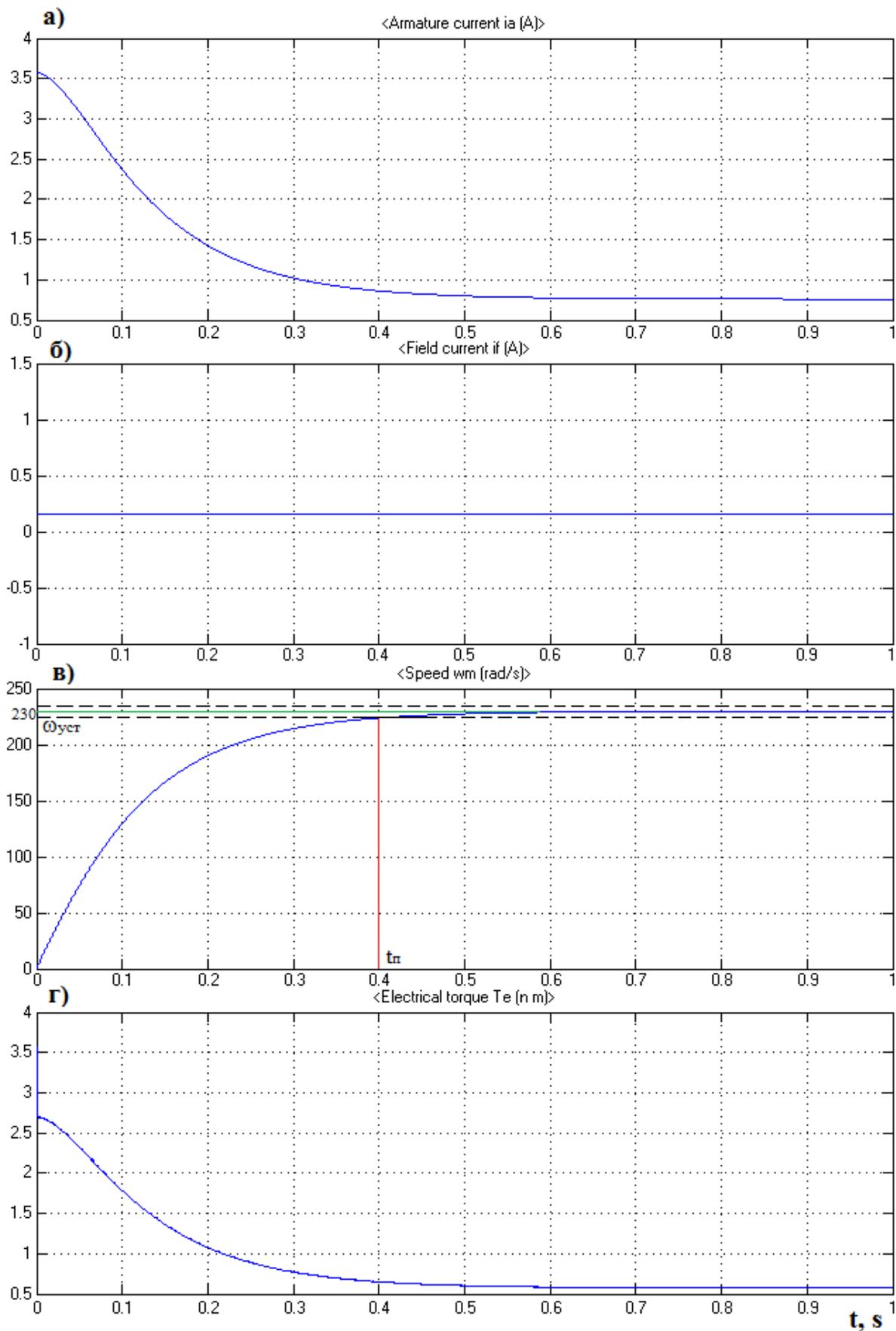


Рисунок 4 – Результаты физического моделирования двигателя постоянного тока

**Разработка и реализация структурной модели.** Структурно двигатель постоянного тока можно разделить на три составляющих части: часть якоря, часть обмотки возбуждения, механическая часть двигателя. Систему уравнений этих укрупненных составляющих частей можно представить в операторной форме записи на основании второго закона Кирхгофа и уравнения движения двигателя:

$$\begin{cases} W_a(p) = \frac{I_{an}(p)}{U_n(p) - E(p)} = \frac{1/R_a}{T_M(p) + 1} \\ W_f(p) = \frac{\Phi(p)}{U_{fn}(p)} = \frac{C_E/R_f}{T_E(p) + 1} \\ W_m(p) = \frac{\omega_n(p)}{M(p) - M_c(p)} = \frac{1}{Jp} \end{cases} \quad (1)$$

Структурная модель в построении проще физической. Основные принципы вывода уравнений статических электромеханической и механической характеристик двигателя постоянного тока подробно представлены в [19]. Здесь приведем описание основных блоков структурной модели и представим результаты моделирования.

Все блоки находятся в библиотеке блоков Simulink в подкаталогах Continuous, Math Operations, Sinks и Sources. Основным блоком, имитирующим каждую из трех частей двигателя постоянного тока, является Transfer Fcn – передаточная функция. Также используются блоки: Step – задатчик входного шагового сигнала; Sum – сумматор сигналов; Product – произведение сигналов; Gain – усилитель сигнала; Scope – осциллограф для отображения выходного сигнала.

Блоки соединяются между собой и в них подставляются рассчитанные ранее данные согласно системе уравнений (1). Готовая структурная модель двигателя постоянного тока приведена на рисунке 5.

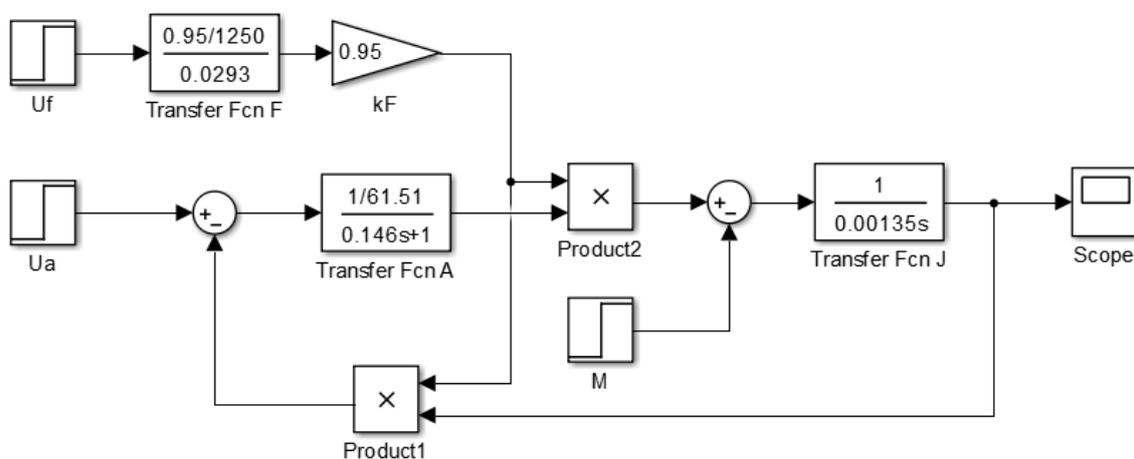


Рисунок 5 – Структурная модель двигателя постоянного в Simulink

На рисунке 6 представлены результаты структурного моделирования в виде временной зависимости угловой скорости вращения двигателя постоянного тока. Численная оценка будет произведена далее.

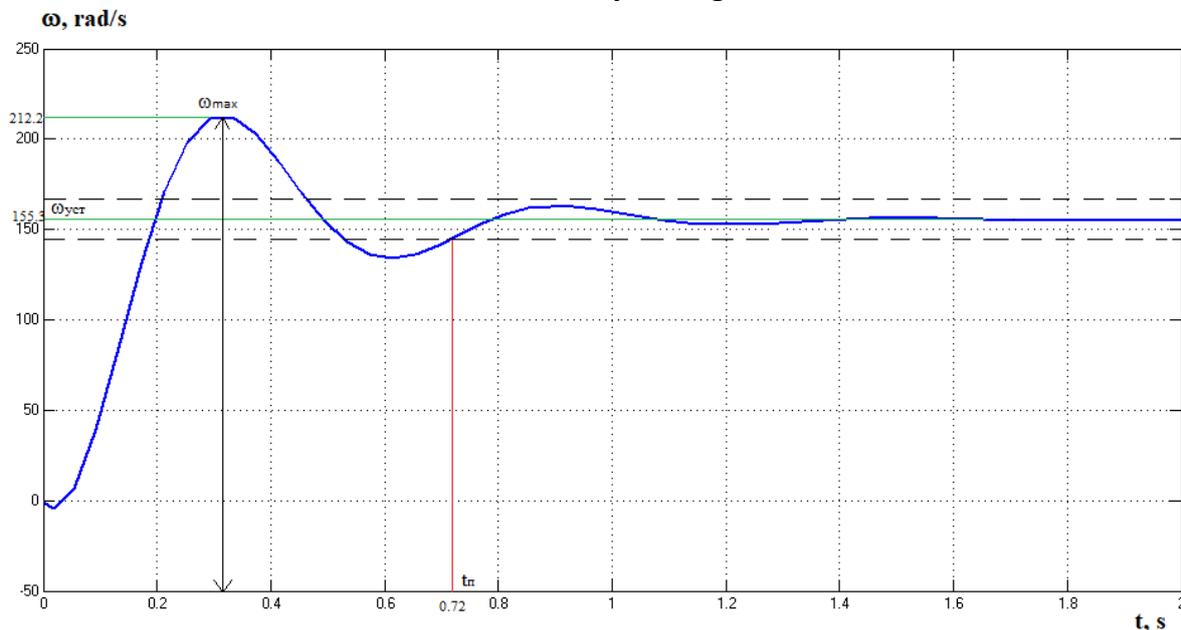


Рисунок 6 – Результаты структурного моделирования двигателя постоянного тока

**Разработка и реализация математической модели.** Для создания математической модели двигателя постоянного тока переведем операторную форму системы уравнений (1) в единую передаточную функцию. Согласно [20] передаточная функция двигателя постоянного тока с независимым возбуждением будет выглядеть следующим образом:

$$W(dpt) = \frac{C_E \cdot C_M}{T_M T_E (p^2) + T_M (p) + 1}$$

Вводим полученную передаточную функцию непосредственно в MatLab в окно Command Window, подставляя рассчитанные ранее коэффициенты и постоянные времени. Передаточная функция двигателя постоянного тока, рассчитанная для выполнения математического моделирования, будет иметь вид, показанный на рисунке 7.

```
Command Window
>> Wdpt=tf(0.7163,[0.004279 0.146 1])

Wdpt =

    0.7163
-----
0.004279 s^2 + 0.146 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> ltiview(Wdpt)
>>
```

Рисунок 7 – Математическая модель двигателя постоянного тока

Проведем исследования передаточной функции двигателя постоянного тока на устойчивость по различным критериям при помощи команды *ltiview*. В результате получаем реакцию на единичное ступенчатое воздействие (а), реакцию на единичное импульсное воздействие (б), логарифмические амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики (в), а также диаграмму устойчивости по Найквисту (г) и годограф Николса (д), изображенные на рисунке 8. Анализируя полученные результаты согласно методике в [21], можно сделать вывод о полной устойчивости исследуемой передаточной функции.

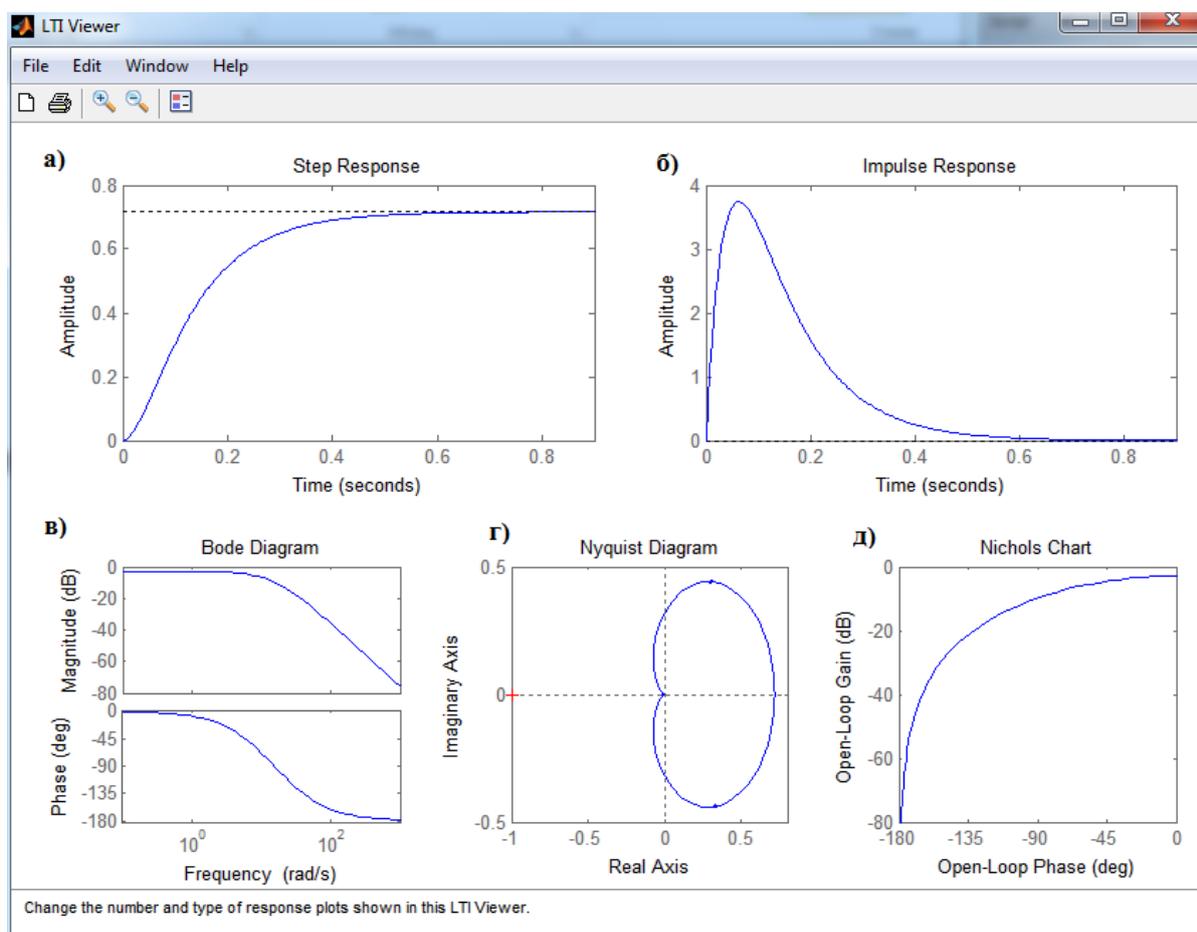


Рисунок 8 – Результаты исследования передаточной функции на устойчивость

При умножении единичного ступенчатого воздействия (числителя передаточной функции) на величину входящего сигнала (напряжение якоря), равную 220, получим характеристику переходного процесса угловой скорости вращения двигателя постоянного тока (рисунок 9).

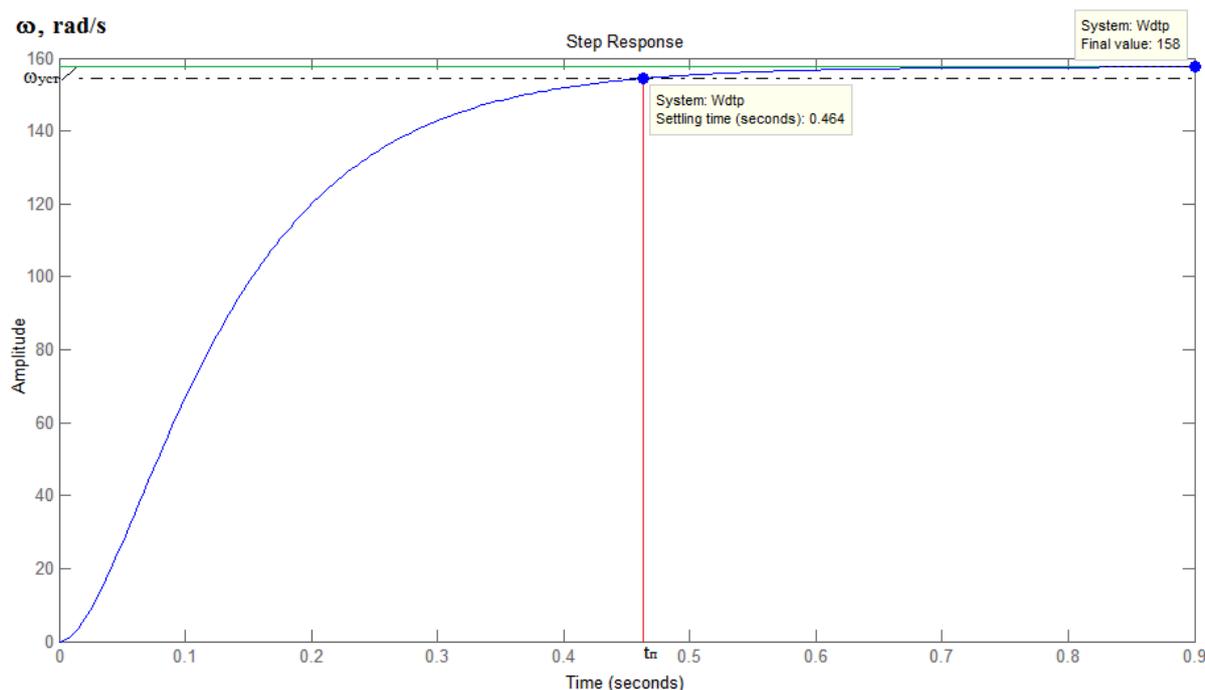


Рисунок 9 – Результаты математического моделирования двигателя постоянного тока

**Результаты моделирования.** После разработки и реализации моделей двигателя постоянного тока всеми выбранными способами и получения результатов моделирования в виде графиков временной зависимости угловой скорости вращения двигателя, проанализируем эти результаты. Во всех случаях моделирования была получена характеристика переходного процесса, для которой присущи некоторые показатели качества линейных непрерывных систем, обуславливающие динамику переходного процесса и точность системы. Рассмотрим ряд таких показателей, а именно время переходного процесса, перерегулирование и число колебаний.

Время переходного процесса  $t_n$  (или время регулирования) – это важнейший показатель, характеризующий быстродействие системы. Для его определения на графике характеристики проводят две прямые, параллельные оси  $t$ , отстоящие от установившегося значения на величину 0,05 в обе стороны (трубка 5 %). Время переходного процесса – это момент времени, когда переходная характеристика входит в трубку 5 % и больше из нее не выходит. Переходный процесс имеет аperiodический или колебательный характер. По переходной характеристике колебательность определяется в зависимости от величины перерегулирования. Таким образом, перерегулирование  $\sigma$  характеризует степень удаления системы от колебательной границы устойчивости (в случае нахождения системы на колебательной границе устойчивости в системе наблюдаются незатухающие колебания и  $\sigma = 100\%$ ). Запас устойчивости считается достаточным, если  $\sigma = 10\div 30\%$ . Иногда допускается перерегулирование до 70 %, а в ряде случаев не допускается вообще (для инерционных систем).

Число колебаний  $r$  за время переходного процесса – это показатель колебательности, который легко определяется по виду переходной характеристики. Допустимое число колебаний обычно не более  $r = 2 \div 3$ , для слабо колебательных систем – меньше одного колебания.

Произведем оценку наших результатов моделирования по показателям качества переходного процесса.

В результате физического моделирования (рисунок 4, в) получаем величину угловой скорости вращения в установившемся режиме работы, равную 230 рад/с. Продолжительность переходного процесса составляет 0,4 с. Перерегулирование в переходном процессе отсутствует. Характер переходного процесса – аperiodический, колебания отсутствуют.

В результате структурного моделирования (рисунок 6) получаем величину угловой скорости вращения в установившемся режиме работы, равную 155,3 рад/с. Продолжительность переходного процесса составляет 0,72 с. В переходном процессе присутствует перерегулирование, которое определяется из выражения:  $\sigma = \frac{\omega_{MAX} - \omega_{уст}}{\omega_{уст}} = \frac{212,2 - 155,3}{155,3} \cdot 100 \% = 36,6 \%$ . Характер переходного процесса – колебательный, число колебаний за время переходного процесса – 2.

В результате математического моделирования (рисунок 9) получаем величину угловой скорости вращения в установившемся режиме работы, равную 157,6 рад/с. Продолжительность переходного процесса составляет 0,46 с. Перерегулирование в переходном процессе отсутствует. Характер переходного процесса – аperiodический, колебания отсутствуют.

Перейдем к сопоставлению, анализу и обсуждению результатов исследования.

### Результаты исследования и обсуждения

Сопоставим результаты моделирования с исходными данными имитационной модели. Сопоставлению будет подлежать угловая скорость вращения двигателя постоянного тока. Во время сопоставления вычислим абсолютную и относительную погрешности результатов произведенного моделирования.

Абсолютной погрешностью числа называют разницу между этим числом и его точным значением. В нашем случае для определения абсолютной погрешности угловой скорости вращения воспользуемся формулой  $\Delta\omega = \omega - \omega_H$ . Относительной погрешностью называют отношение абсолютной погрешности числа к самому этому числу. В нашем случае относительная погрешность будет определяться по формуле  $\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\omega} \cdot 100 \%$ . Результаты сопоставления и определения погрешностей представлены в таблице 2.

Таблица 2. Сопоставление результатов моделирования

№ п/п	Параметр	Результаты моделирования		
		Физическая модель	Структурная модель	Математическая модель
1	Угловая скорость вращения двигателя при моделировании, $\omega$ (рад/с)	230	155,3	157,6
2	Время переходного процесса, $t_n$ (с)	0,4	0,72	0,46
3	Перерегулирование, $\sigma$ (%)	-	36,6	-
4	Число колебаний, $r$ (ед.)	-	2	-
5	Угловая скорость при номинальном режиме работы в имитационной модели, $\omega_n$ (рад/с)	157	157	157
6	Абсолютная погрешность, $\Delta\omega$ (рад/с)	73	-1,7	0,6
7	Относительная погрешность, $\varepsilon$ (%)	31,7	-1,1	0,4

Проанализируем полученные результаты.

В результате физического моделирования наблюдаем большое (недопустимое) отклонение величины угловой скорости вращения двигателя, несмотря на то, что значения токов и момента (рисунок 4) полностью совпадают с расчетными значениями. При моделировании технических систем в MatLab допустимое отклонение не должно превышать 15 %. В то же время продолжительность переходного процесса при физическом моделировании имеет самое меньшее, а соответственно и самое оптимальное значение. Такое отклонение угловой скорости вращения может быть связано с внутренними особенностями блока двигателя постоянного тока DC Machine. Заглянем «под маску» этого блока и посмотрим из каких компонентов он состоит. На рисунке 10 (а) видно, что основным блоком, отвечающим за механический выход  $m$ , является блок Continuous TL input. В свою очередь на рисунке 10 (б) видно, что уже «под маской» этого блока находятся два элемента Gain и Integrator, которые формируют выход угловой скорости вращения  $\omega$ . В параметрах окна блока Integrator на рисунке 10 (в) видно, что единственной величиной, влияющей на процесс моделирования, является  $\omega_0$  – начальное значение угловой скорости, которое в нашем случае равно 1. Экспериментально было установлено, что изменение этого параметра не влияет на величину установившегося значения угловой скорости. Заглянув в параметры окна Gain на рисунке 10

(г), было обнаружено, что величина усиления в нём является константой и извне этого блока задаваться не может.

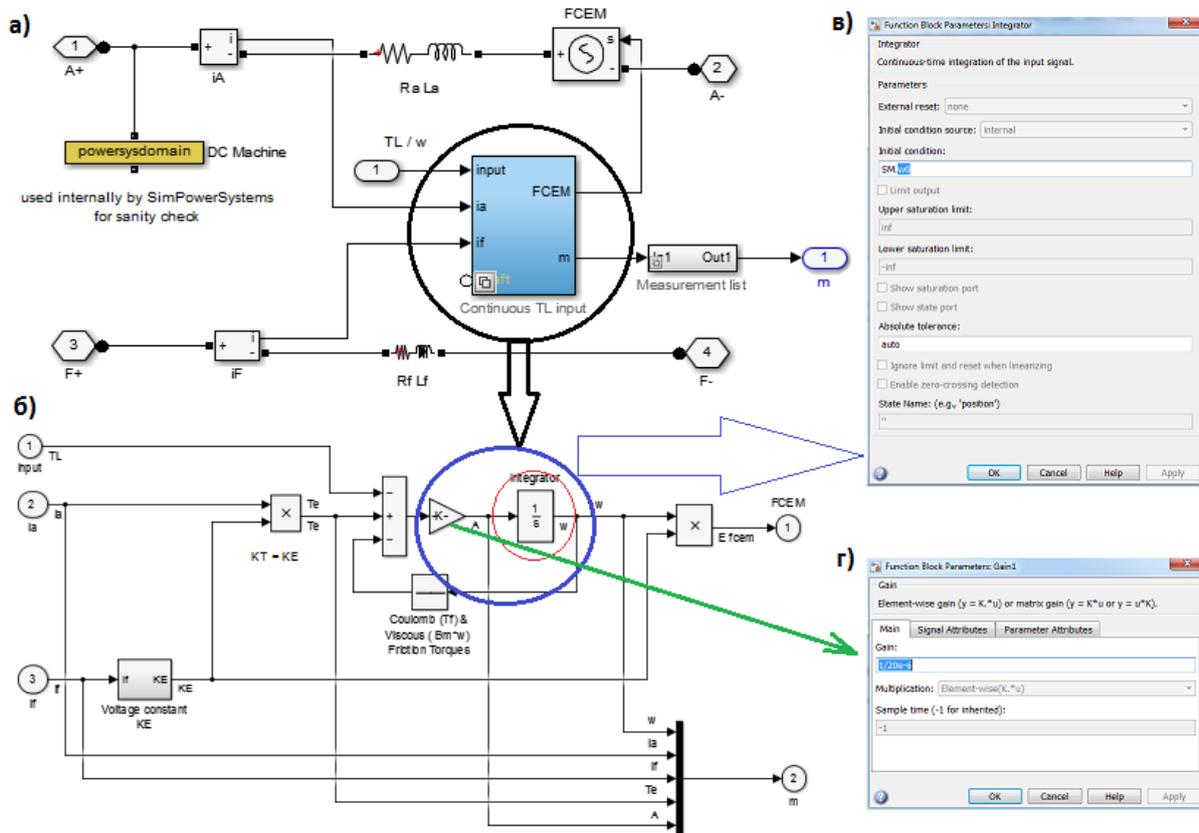


Рисунок 10 – Структура блока DC Machine “look under mask”

При увеличении и уменьшении параметра усилителя на один порядок не было замечено никаких отклонений от стандартного графика (рисунок 4), но зато процесс моделирования всё той же одной секунды занял в два раза больше и меньше времени соответственно. При увеличении на два порядка, процесс моделирования занял около трех часов, и никаких изменений не было. Пойдя по пути уменьшения порядка, было обнаружено, что при уменьшении на четыре порядка увеличилось время переходного процесса, и величина установившегося значения угловой скорости начала снижаться, в то время как остальные параметры (ток якоря, ток обмотки возбуждения и момент) оставались неизменными. После уменьшения на семь порядков модель перестала «запускаться», и нам не удалось достичь величины угловой скорости вращения близкой к 157 рад/с. Тем самым было доказано, что блоки библиотеки SimPowerSystems имеют некую внутреннюю погрешность и требуют скрупулезной настройки. С похожей проблемой авторы столкнулись в работе [22].

В результате структурного моделирования получили рабочую модель, показывающую хорошие параметры быстродействия и маленькие абсолютную и относительную погрешности. Недостатком является наличие

перерегулирования в переходном процессе, превышающем запас устойчивости 30 %.

Наилучшие результаты были получены при математическом моделировании двигателя постоянного тока. Время переходного процесса и погрешности имеют очень маленькие значения, что говорит о возможностях точной настройки всех параметров модели. Характер переходного процесса – апериодический, что говорит об отсутствии перерегулирования и колебаниях системы.

### **Заключение**

В результате проведенного исследования проанализировано сопоставление физического, структурного и математического моделирования с результатами имитационного моделирования двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при помощи пакета программ MatLab. Для этого были решены следующие задачи: разработана имитационная модель на лабораторной установке; рассчитаны дополнительные параметры двигателя постоянного тока, необходимые для моделирования; разработаны физическая, структурная и математическая модели с помощью библиотек блоков Simulink и SimPowerSystems, а также непосредственно в окне Command Window среды MatLab; полученные результаты моделирования сопоставлены с результатами имитационного моделирования; определены абсолютная и относительная погрешности в результатах.

Следует отметить, что физическое моделирование является более сложным как при разработке модели, так и при анализе результатов моделирования по сравнению со структурным и математическим моделированием. Но в то же время физическое моделирование позволяет получить и проанализировать намного больше физических (в нашем случае электрических) параметров, которые важны для оценки работы электромеханической системы. Структурная модель в построении проще физической, но требует дополнительных расчетов постоянных времени и констант двигателя для адекватного моделирования. Преимущество структурной модели заключается в том, что блок измерителя (осциллограф) может быть подключен к любой точке модели, в отличие от физической модели, где измерители подключаются только к специальным блокам. Исходя из всех результатов, можно смело утверждать, что математическое моделирование для двигателя постоянного тока является наиболее предпочтительным, благодаря малым погрешностям и высокой точности результатов. Также при математическом моделировании легко произвести оценку передаточной функции на устойчивость при помощи команды *ltview*, не прибегая к дополнительным расчетам.

Из всего вышеизложенного можно сделать вывод, что пакет программ MatLab действительно является отличным универсальным пакетом для физического, структурного и математического моделирования сложных технических систем. Этот факт также подтверждается его широким распространением в научно-исследовательских институтах и университетах по всему миру для проведения научно-исследовательских работ и использования в учебном процессе [23-25].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев С.К., Колганов А.Р. Регуляторы положения систем позиционирования с динамикой бесселя для электромехатронных модулей // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 6. – С. 41-47. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.6.041-047.
2. Gnezdov N.E., Lebedev S.K., Kolganov A.R. Structural and parametric synthesis of positioning systems of electromechatronic modules // 9th International Conference on Power Drives Systems (ICPDS). – 2016. – С. 7756725. DOI: 10.1109/ICPDS.2016.7756725.
3. Радионов А.А., Карандаев А.С., Евдокимов А.С., Андрюшин И.Ю., Гостев А.Н., Шубин А.Г. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клеток прокатного стана. Часть 1. Разработка математической модели // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2015. – Т. 15. – № 1. – С. 59-73. DOI: 10.14529/power150108.
4. Радионов А.А., Карандаев А.С., Храмшин В.Р., Евдокимов А.С., Андрюшин И.Ю., Гостев А.Н., Шубин А.Г., Гасияров В.Р. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клеток прокатного стана. Часть 2. Исследование динамических нагрузок в универсальных клетях // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2015. – Т. 15. – № 2. – С. 67-76. DOI: 10.14529/power150209.
5. Храмшин В.Р., Радионов А.А., Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Шубин А.Г., Логинов Б.М. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем непрерывной подгруппы клеток прокатного стана. Часть 3. Исследование способа согласования линейных скоростей вертикальных // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 47-57. DOI: 10.14529/power160108.

6. Гасияров В.Р., Радионов А.А., Маклаков А.С. Моделирование трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 1 (34). – С. 4-9. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-4-9.
7. Шевырёв Ю.В., Моргачёв Д.А. Исследование электромагнитной совместимости частотно-регулируемого электропривода буровой установки и источника электроэнергии соизмеримой мощности // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2015. – Т. 15. – № 2. – С. 25-33. DOI: 10.14529/power150204.
8. Фащиленко В.Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий. – М.: Горная книга, 2011. – 84 с.
9. Ляхомский А.В., Фащиленко В.Н. Автоматизированный электропривод машин и установок горного производства. Часть 1. Автоматизированный электропривод механизмов циклического действия. – М.: Горная книга, 2014. – 477 с.
10. Semenov A.S., Khubieva V.M., Kharitonov Y.S. Mathematical modeling of static and dynamic modes DC motors in software package MATLAB // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2018. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501666.
11. Семёнов А.С., Егоров А.Н. Особенности математического моделирования систем электроприводов технологических установок горных предприятий // Каротажник. – 2018. – № 11 (293). – С. 85-99.
12. Семёнов А.С., Харитонов Я.С., Егоров А.Н. Разработка математической модели электромагнитного привода с системой управления стабилизации производительности питателя // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – № 2 (121). – С. 123-131.
13. Бебихов Ю.В., Кугушева Н.Н., Хубиева В.М., Семёнова М.Н., Якушев И.А. Разработка универсальной математической модели системы электроснабжения участка промышленного предприятия // Естественные и технические науки. – 2018. – № 12 (126). – С. 387-394.
14. Семёнов А.С., Якушев И.А., Егоров А.Н. Математическое моделирование технических систем в среде MATLAB // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 8. – С. 56-64. DOI: 10.17513/snt.36780.
15. Дьяконов В.П. MATLAB R2006/2007/2008 + SIMULINK 5/6/7. Основы применения. Учебное пособие. – М.: СОЛОН-Пресс, 2008. – 800 с.
16. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. Учебное пособие. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

17. Семёнов А.С. Моделирование автоматизированного электропривода. – М.: Издательство «Спутник+», 2012. – 60 с.
18. Семёнов А.С. Программа MATLAB. – М.: Издательство «Спутник+», 2012. – 40 с.
19. Семёнов А.С., Хубиева В.М., Харитонов Я.С. Математическое моделирование статических и динамических режимов двигателя постоянного тока в пакете программ MATLAB // Пром-Инжиниринг: труды IV международной научно-технической конференции. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2018. – С. 381-385.
20. Семёнов А.С., Хубиева В.М., Петрова М.Н. Математическое моделирование режимов работы двигателя постоянного тока в среде MATLAB // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10-3. – С. 523-528.
21. Аносов В.Н., Наумов В.В., Котин Д.А. Теория автоматического управления. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2016. – 68 с.
22. Bolgov I., Bolgova V. Detailed simulation model of the two-phase brushless DC motor designed for VFD integration // 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – 2016. – № 57. – С. 7763154. DOI: 10.1109/RTUCON.2016.7763154.
23. Skovranek T., Mojžišová A., Pócsová J. MATLAB: The ultimate tool for teaching process control oriented courses // 17th International Carpathian Control Conference (ICCC). – 2016. DOI: 10.1109/CarpathianCC.2016.7501189.
24. Mandal A., Alom A., Khan K.A., Pal S., De A. MATLAB-graphical user interface (GUI) to study PV module characteristics // International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS). – 2017. DOI: 10.1109/ICECDS.2017.8389879.
25. Durak U., Öztürk A., Katircioglu M. Simulation Deployment Blockset for MATLAB/Simulink // Symposium on Theory of Modeling and Simulation (TMS-DEVS). – 2016. DOI: 10.23919/TMS.2016.7918818.

Y.V. Bebikhov, A.S. Semenov, M.N. Semenova, I.A. Yakushev  
**ANALYSIS OF METHODS OF MODELING TECHNICAL SYSTEMS IN  
MATLAB**

*North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Polytechnic  
Institute (branch) in Mirny,  
Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia*

*The MatLab software package is considered from the point of view of a universal modeling environment for technical systems. The analysis of methods of mathematical,*

*structural and physical modeling in MatLab using the library of blocks Simulink and application SimPowerSystems. For the study, an electromechanical system was chosen - a DC motor with independent excitation, as one of the most common for driving technological installations of cyclic action. With the help of a laboratory setup, a simulation model has been developed that allows you to evaluate, analyze and compare the results obtained during modeling with real data. To carry out the simulation, additional parameters of the DC motor were calculated, which include the active resistances and inductances of the armature windings and excitations, mutual induction, moment of inertia, design and time constants of the motor. Physical, structural and mathematical models are developed. The simulation results are obtained in the form of graphs of time dependences of the main engine parameters. A detailed analysis of the angular speed of rotation of the DC motor was made, since it is the main coordinate for regulation. Qualitative and quantitative characteristics of the transition process, such as control time, magnitude of overshoot, and the number of oscillations, were subject to assessment. During the evaluation and analysis of simulation results, the advantages and disadvantages of various methods of modeling technical systems in the MatLab software package were established. Conclusions are made about the universality of the MatLab environment for the possibilities of a detailed and accurate assessment of complex technical systems.*

**Keywords:** modeling of technical systems, MatLab, Simulink, DC motor, angular rotation speed, transient, error.

## REFERENCES

1. Lebedev S.K., Kolganov A.R. Regulyatory polozheniya sistem pozitsionirovaniya s dinamikoy besselya dlya elektromekhatronnykh moduley // Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. – 2015. – No. 6. – pp.41-47. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.6.041-047.
2. Gnezdov N.E., Lebedev S.K., Kolganov A.R. Structural and parametric synthesis of positioning systems of electromechatronic modules // 9th International Conference on Power Drives Systems (ICPDS). – 2016. – S.7756725. DOI: 10.1109/ICPDS.2016.7756725.
3. Radionov A.A., Karandaev A.S., Evdokimov A.S., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Shubin A.G. Matematicheskoe modelirovanie vzaimosvyazannykh elektromekhanicheskikh sistem nepreryvnoy podgruppy kletey prokatnogo stana. Chast' 1. Razrabotka matematicheskoy modeli // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. – 2015. – Vol.15. – No. 1. – pp.59-73. DOI: 10.14529/power150108.
4. Radionov A.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R., Evdokimov A.S., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Shubin A.G., Gasiyarov V.R. Matematicheskoe modelirovanie vzaimosvyazannykh elektromekhanicheskikh sistem nepreryvnoy podgruppy kletey prokatnogo stana. Chast' 2. Issledovanie dinamicheskikh nagruzok v universal'nykh kletyakh // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta.

- Seriya: Energetika. – 2015. – Vol.15. – No. 2. – pp.67-76. DOI: 10.14529/power150209.
5. Khramshin V.R., Radionov A.A., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Shubin A.G., Loginov B.M. Matematicheskoe modelirovanie vzaimosvyazannykh elektromekhanicheskikh sistem nepreryvnoy podgruppy kletey prokatnogo stana. Chast' 3. Issledovanie sposoba soglasovaniya lineynykh skorostey vertikal'nykh // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. – 2016. – Vol.16. – No. 1. – pp.47-57. DOI: 10.14529/power160108.
  6. Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Maklakov A.S. Modelirovanie trekhurovneвого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме ShIM с удалением выделенных гармоник // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – No. 1 (34). – pp.4-9. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-4-9.
  7. Shevyrev Yu.V., Morgachev D.A. Issledovanie elektromagnitnoy sovmestimosti chastotno-reguliruemogo elektroprivoda burovoy ustanovki i istochnika elektroenergii soizmerimoy moshchnosti // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. – 2015. – Vol.15. – No. 2. – pp.25-33. DOI: 10.14529/power150204.
  8. Fashchilenko V.N. Reguliruemyy elektroprivod nasosnykh i ventilyatornykh ustanovok gornyykh predpriyatiy. – M.: Gornaya kniga, 2011. – 84 p.
  9. Lyakhomskiy A.V., Fashchilenko V.N. Avtomatizirovannyy elektroprivod mashin i ustanovok gornogo proizvodstva. Chast' 1. Avtomatizirovannyy elektroprivod mekhanizmov tsiklicheskogo deystviya. – M.: Gornaya kniga, 2014. – 477 p.
  10. Semenov A.S., Khubieva V.M., Kharitonov Y.S. Mathematical modeling of static and dynamic modes DC motors in software package MATLAB // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2018. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501666.
  11. Semenov A.S., Egorov A.N. Osobennosti matematicheskogo modelirovaniya sistem elektroprivodov tekhnologicheskikh ustanovok gornyykh predpriyatiy // Karotazhnik. – 2018. – No. 11 (293). – pp.85-99.
  12. Semenov A.S., Kharitonov Ya.S., Egorov A.N. Razrabotka matematicheskoy modeli elektromagnitnogo privoda s sistemoy upravleniya stabilizatsii proizvoditel'nosti pitatelya // Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva. – 2018. – No. 2 (121). – pp.123-131.
  13. Bebikhov Yu.V., Kugusheva N.N., Khubieva V.M., Semenova M.N., Yakushev I.A. Razrabotka universal'noy matematicheskoy modeli sistemy elektrosnabzheniya uchastka promyshlennogo predpriyatiya // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. – 2018. – No. 12 (126). – pp.387-394.
  14. Semenov A.S., Yakushev I.A., Egorov A.N. Matematicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem v srede MATLAB // Sovremennye

- naukoemkie tekhnologii. – 2017. – No. 8. – pp.56-64. DOI: 10.17513/snt.36780.
15. D'yakonov V.P. MATLAB R2006/2007/2008 + SIMULINK 5/6/7. Osnovy primeneniya. Uchebnoe posobie. – M.: SOLON-Press, 2008. – 800 p.
  16. Chernykh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB. SimPowerSystems i Simulink. Uchebnoe posobie. – M.: DMK Press, 2007. – 288 p.
  17. Semenov A.S. Modelirovanie avtomatizirovannogo elektroprivoda. – M.: Izdatel'stvo «Sputnik+», 2012. – 60 p.
  18. Semenov A.S. Programma MATLAB. – M.: Izdatel'stvo «Sputnik+», 2012. – 40 p.
  19. Semenov A.S., Khubieva V.M., Kharitonov Ya.S. Matematicheskoe modelirovanie staticheskikh i dinamicheskikh rezhimov dvigatelya postoyannogo toka v pakete programm MATLAB // Prom-Inzhiniring: trudy IV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. – Chelyabinsk: Izdatel'stvo YuUrGU, 2018. – pp.381-385.
  20. Semenov A.S., Khubieva V.M., Petrova M.N. Matematicheskoe modelirovanie rezhimov raboty dvigatelya postoyannogo toka v srede MATLAB // Fundamental'nye issledovaniya. – 2015. – No. 10-3. – pp.523-528.
  21. Anosov V.N., Naumov V.V., Kotin D.A. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. – Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2016. – 68 p.
  22. Bolgov I., Bolgova V. Detailed simulation model of the two-phase brushless DC motor designed for VFD integration // 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – 2016. – No. 57. – S.7763154. DOI: 10.1109/RTUCON.2016.7763154.
  23. Skovranek T., Mojžišová A., Pócsová J. MATLAB: The ultimate tool for teaching process control oriented courses // 17th International Carpathian Control Conference (ICCC). – 2016. DOI: 10.1109/CarpathianCC.2016.7501189.
  24. Mandal A., Alom A., Khan K.A., Pal S., De A. MATLAB-graphical user interface (GUI) to study PV module characteristics // International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS). – 2017. DOI: 10.1109/ICECDS.2017.8389879.
  25. Durak U., Öztürk A., Katircioglu M. Simulation Deployment Blockset for MATLAB/Simulink // Symposium on Theory of Modeling and Simulation (TMS-DEVS). – 2016. DOI: 10.23919/TMS.2016.7918818.