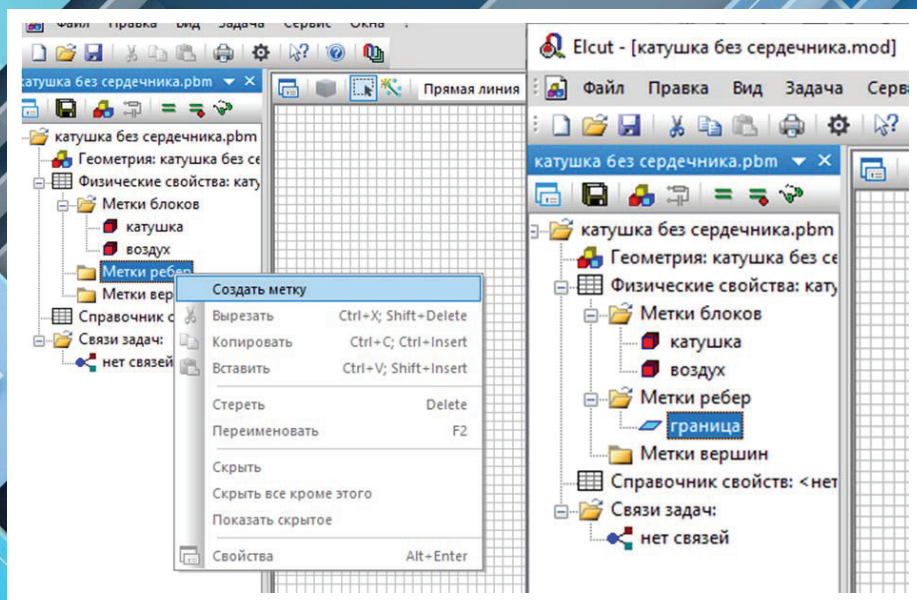


М.В. Позднов

ГИБКИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ

Лабораторный практикум



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет

М.В. Позднов

ГИБКИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ

Лабораторный практикум

Тольятти
Издательство ТГУ
2025

УДК 621.865.8:004.942 (075.8)+338.364(075.8)

ББК 32.816-02я73+32.966.093я73

П471

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор кафедры «Сервис технических
и технологических систем» Поволжского государственного
университета сервиса *Б.М. Горшков*;

канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника»
Тольяттинского государственного университета *А.В. Прядилов*.

П471 Позднов, М.В. Гибкие производственные системы :
лабораторный практикум / М.В. Позднов. — Тольятти : Изда-
тельство ТГУ, 2025. — 54 с. — ISBN 978-5-8259-1725-2.

Лабораторный практикум содержит методические указания
по выполнению виртуальных лабораторных работ по дисциплине
«Гибкие производственные системы».

Предназначен для студентов, обучающихся по направлению
подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» очной и за-
очной форм обучения, в том числе с использованием дистанцион-
ных образовательных технологий.

УДК 621.865.8:004.942 (075.8)+338.364(075.8)

ББК 32.816-02я73+32.966.093я73

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
Тольяттинского государственного университета.

© Позднов М.В., 2025

ISBN 978-5-8259-1725-2 © ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2025

Введение

Дисциплина «Гибкие производственные системы» изучает современные методы и комплексы, используемые при проектировании гибких, быстро перенастраиваемых производств, которые необходимы для эффективного изготовления продукции в современных условиях. Лабораторный курс основан на математическом моделировании процессов, происходящих в элементах гибких производственных систем (ГПС).

Задачи курса: ознакомление со структурой и элементами производства ГПС, принципами робототехники, развитие навыков и компетенций через выполнение практических заданий. Кроме того, задачей курса является постепенное выстраивание рабочей модели системы привода механического линейного манипулятора (робота) с цикловым управлением линейного типа через выполнение лабораторных работ. В качестве моделей выбраны элементы электромеханической системы привода. То есть процесс выполнения работ идет следующим образом: сначала составляется и моделируется механическая часть в среде Matlab/Simulink; далее с помощью среды ELCUT в результате 3D-расчета получается модель привода; затем через систему Matlab/Simulink проводится моделирование механической системы манипулятора с реальной моделью электромагнитного привода.

Таким образом, в лабораторной работе 1 рассматривается механическая модель привода, в лабораторной работе 2 рассчитываются характеристики модели электромагнитного привода, в лабораторной работе 3 данные из ELCUT переводятся в Matlab/Simulink, в лабораторной работе 4 моделируются процессы динамики привода в Matlab/Simulink на основе модели привода.

В процессе выполнения работ формируются знания и умения, необходимые при составлении математических моделей электромеханических систем, их описании в расчетных системах типа ELCUT и Matlab/Simulink, а также навыки работы в этих системах и анализа полученных результатов.

Система ELCUT предоставляется в ограниченной версии на сайте компании ELCUT (<https://elcut.ru/>). Скачать ее можно по прямой ссылке https://elcut.ru/downloads/elcut_stud_64_setup.exe. Если ссылка не работает, можно попробовать скачать последнюю версию после регистрации здесь: https://elcut.ru/free_soft_r.htm. Подробное руководство пользователя: https://elcut.ru/free_doc_r.htm.

Система Matlab/Simulink предоставляется в свободном доступе в специализированных аудиториях университета по сетевой лицензии.

Для решения лабораторных задач необходимо обратить внимание на главы 1, 3, 4, 6, 7, 8 Руководства пользователя [1]. Для более глубокого понимания можно прочитать и остальные главы.

Дополнительно на сайте расположено множество примеров и пояснений по работе среды. В интернете на ресурсе youtube.com предлагаются уроки и вебинары, на которых даются примеры решения задач. Их несложно найти по поисковым запросам типа «ELCUT решение задач». Имеется ряд решенных задач с примерами в пособии А.В. Мамонтова [2].

Основные моменты работы в ELCUT и Matlab/Simulink рассмотрены в каждой лабораторной работе.

Требования к технике безопасности

Все работы выполняются на персональных компьютерах, поэтому правила техники безопасности соответствуют правилам техники безопасности при работе с бытовой техникой. Эти правила доводятся до студентов под подпись в начале лабораторного курса в специальном журнале безопасности аудитории, в которой проводится занятие.

Лабораторная работа 1

Моделирование механической системы линейного привода (Simulink)

Цель работы — разработка и изучение математической модели механической части манипулятора.

Используемое оборудование и материалы. Для выполнения работы необходимо программное обеспечение ELCUT и Simulink/Matcad.

Методические рекомендации по проведению занятия

Рассмотрим практическую задачу, определяющую план дальнейшего исследования. Пусть требуется смоделировать работу линейного робота, представляющего собой механическую систему с линейным электромагнитным приводом. Конструктивная схема робота представлена на рис. 1.1.

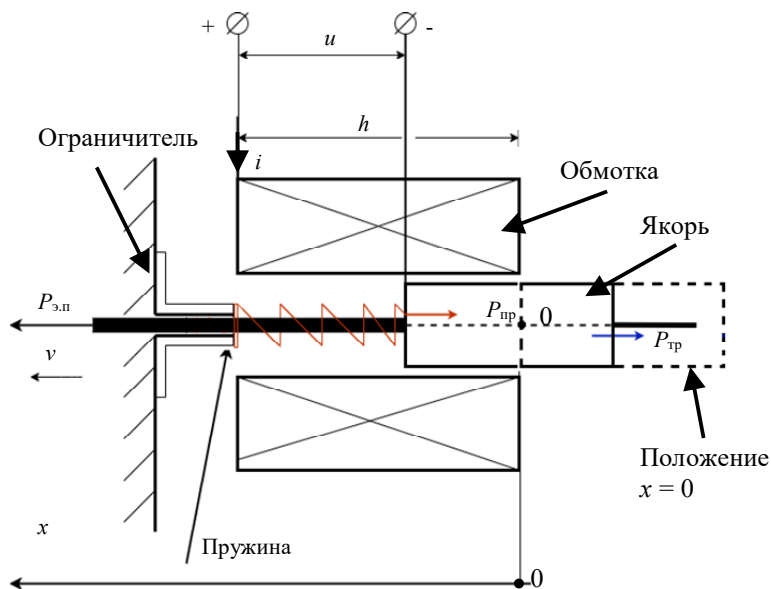


Рис. 1.1. Конструктивная схема линейного привода робота

Она включает цилиндрическую катушку с осевым расположением якоря, выполненного из ферромагнитного материала, например из конструкционной стали, который удерживается с одного торца механической пружиной. При этом при указанном расположении этих элементов сдвиг сердечника вправо или влево вызывает возвращающую силу $P_{\text{пр}}$ к точке покоя. Эта точка указана цифрой 0 на рисунке. Система имеет одну степень свободы вдоль оси x . Привод может только втягивать якорь внутрь катушки. Следовательно, движение якоря происходит под действием иницилирующей одноподправленной силы электромагнитного взаимодействия $P_{\text{э.п}}$ (влево). Дополнительно в системе присутствуют элементы, демпфирующие работу привода (на рисунке не показаны). Сила их действия — это сила вязкого трения $P_{\text{тр}}$, направленная противоположно скорости движения якоря.

Работа привода происходит следующим образом. В витки катушки подают ток i , например, от источника напряжения. Около витков возникает магнитное поле, которое приводит к втягиванию сердечника в катушку. При этом возникает сила $P_{\text{э.п}}$ и сердечник начинает двигаться влево, сжимая пружину, которая сопротивляется его движению с силой $P_{\text{пр}}$. Движению также сопротивляется сила вязкого трения $P_{\text{тр}}$. Движение продолжается до момента равенства этих сил и установления статического равновесия на определенную величину сдвига якоря или до момента выбора рабочего хода h (показан на рисунке) и удара об ограничитель. Ограничитель обладает механической упругостью и сопротивлением вязкого трения, поглощающего деформацию, что может провоцировать отскок якоря и повторные удары, если сила притяжения привода не уменьшена. Уменьшение тока в катушке приводит к возврату якоря в исходное положение $x = 0$.

Указанные процессы можно описать с помощью второго закона Ньютона, расписывая каждую составляющую силы.

Для движения до ограничителя, то есть при $x < h$, и после соударения, то есть $x \geq h$, выполняются уравнения:

$$x < h \left\{ \begin{array}{l} m \cdot a = P_{\text{э.п}} - P_{\text{пр}} - P_{\text{тр}}; \\ v = \frac{dx}{dt}; \\ a = \frac{dv}{dt}; \\ P_{\text{э.п}} = f(i, x); \\ P_{\text{пр}} = k_1 \cdot x; \\ P_{\text{тр}} = \mu_1 \cdot v. \end{array} \right. ; x \geq h \left\{ \begin{array}{l} m \cdot a = P_{\text{э.п}} - P_{\text{пр}} - P_{\text{тр}}; \\ v = \frac{dx}{dt}; \\ a = \frac{dv}{dt}; \\ P_{\text{э.п}} = f(i, x); \\ P_{\text{пр}} = k_2 \cdot x; \\ P_{\text{тр}} = \mu_2 \cdot v. \end{array} \right. \quad (1.1)$$

Жесткости k_1 и k_2 существенно отличаются. k_2 — жесткость ограничителя, существенно большая, чем k_1 , и включающая k_1 . С коэффициентами демпфирования μ_1 , μ_2 сложнее, так как требуется их непосредственное измерение, предполагается, что удар об ограничитель происходит упругим образом. Это наблюдается при полном смыкании витков пружины и ударе сердечника о стальной ограничитель, $\mu_1 \ll \mu_2$. В реальной конструкции можно установить упругую мягкую прокладку и уменьшить μ_2 и k_2 .

Указанные уравнения (1.1) можно упростить и переписать относительно переменных, описывающих состояние системы, — скорости v и перемещения x :

$$x < h \left\{ \begin{array}{l} m \cdot \frac{dv}{dt} = P_{\text{э.п}} - k_1 x - \mu_1 \cdot v; \\ \frac{dx}{dt} = v. \end{array} \right. = \left\{ \begin{array}{l} v = \int \frac{1}{m} (P_{\text{э.п}} - k_1 x - \mu_1 v) \cdot dt; \\ x = \int v \cdot dt. \end{array} \right.$$

$$x \geq h \left\{ \begin{array}{l} m \cdot \frac{dv}{dt} = P_{\text{э.п}} - k_2 (x - h) - \mu_2 \cdot v; \\ \frac{dx}{dt} = v. \end{array} \right. = \left\{ \begin{array}{l} v = \int \frac{1}{m} (P_{\text{э.п}} - k_2 (x - h) - \mu_2 v) \cdot dt; \\ x = \int v \cdot dt. \end{array} \right. \quad (1.2)$$

Интегральные уравнения, полученные из (1.1) в (1.2) для численных систем, более предпочтительны, чем дифференциальные (1.1), дающие большие ошибки при вычислениях. Указанную систему уравнений можно решить в Simulink, если составить расчетную схему. Расчетные схемы составляются из блоков, отвечающих за каждое алгебраическое действие или несколько действий при расчетах.

На рис. 1.2 представлена полная расчетная схема динамики системы. Красным выделены именно блоки по уравнениям (1.2).

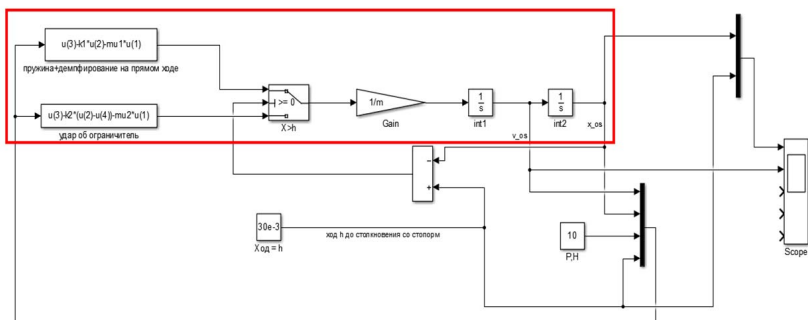


Рис. 1.2. Расчетная схема системы привода

Алгоритм создания математической модели

Среда Simulink является подмодулем пакета Matlab, и для ее загрузки надо в основном меню Matlab кликнуть на соответствующий значок (рис. 1.3).

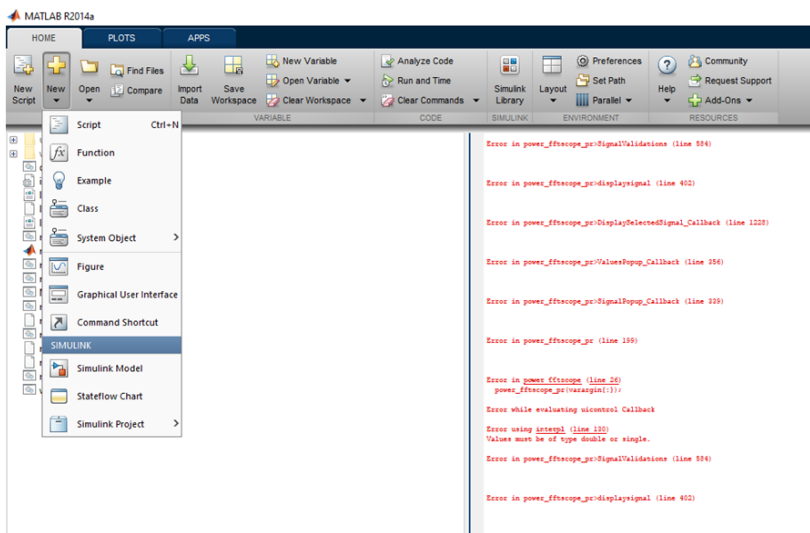


Рис. 1.3. Интерфейсное окно программы Matlab

Для составления расчетной модели объекта необходимо использовать блоки, отражающие математические операции над данными, являющимися параметрами объекта. Для этого необходимо загрузить библиотеку блоков операций, кликнув на значок (рис. 1.3).

Поскольку математические модели описываются математическими соотношениями — уравнениями, формулами, то для этого описания в Simulink есть общий набор библиотек, который называется Simulink (рис. 1.4).

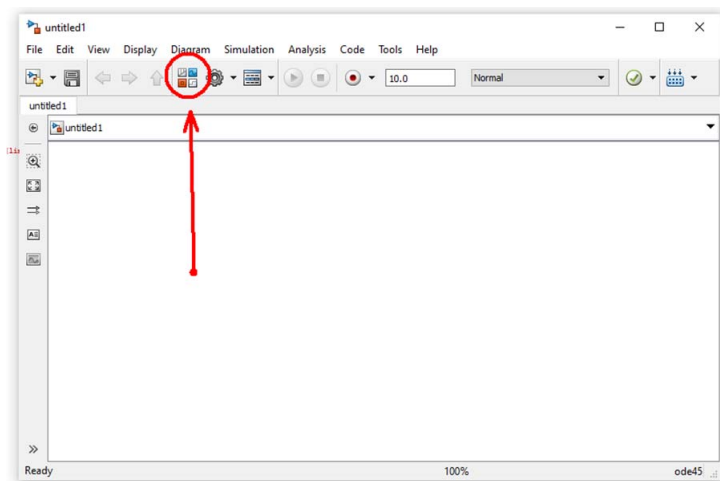


Рис. 1.4. Библиотеки системы Simulink

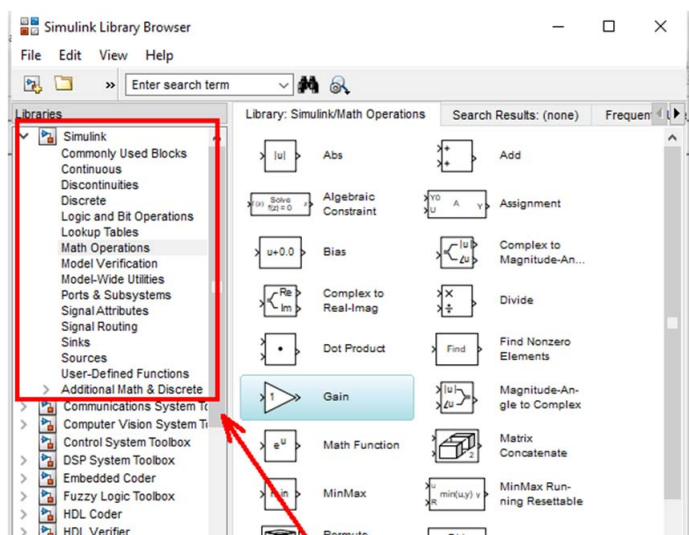


Рис. 1.5. Подбиблиотеки системы Simulink

В общей библиотеке есть ряд подбиблиотек (рис. 1.5), отражающих различные типы операций. Например, вывод информации на экран, соединения связей в модели, операторные действия с данными, логические операции и т. д.

Для того чтобы не описывать все элементы в библиотеках, будем описывать только необходимые для построения нашей модели блоки и подбиблиотеки.

Обратим внимание на структурную схему нашей модели управления (рис. 1.6). В ней содержатся блоки источников сигнала, логические операторы, операторы сравнения, операторы функций. Дополнительно необходимы блоки вывода информации на экран в виде виртуального осциллографа.

Для описания функциональной математической операции удобно использовать блок *Fcn* из подбиблиотеки User-Defines Functions.

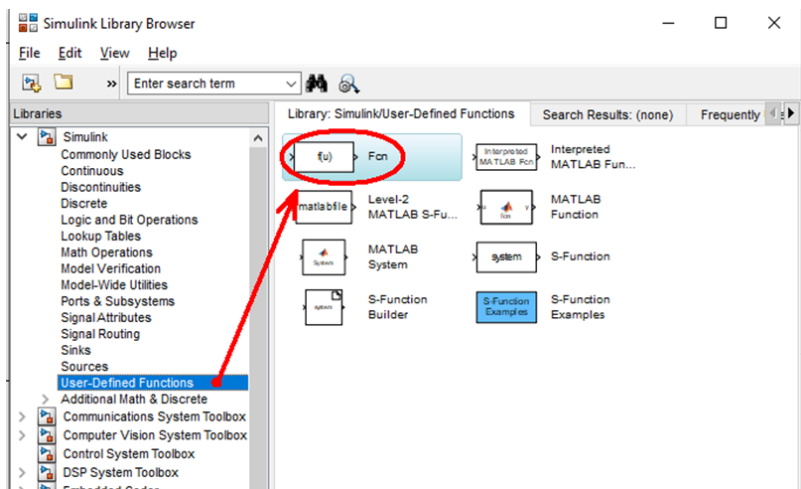


Рис. 1.6. User-Defines Functions – подбиблиотека системы Simulink

Далее нам еще понадобится для описания переключательной функции Switch функция интегрирования Integrator, функция суммирования Add, функция мультиплексирования Mux, функция задания постоянной Constant, функция съема осциллограмм и графиков процессов моделирования Scope. Все они связаны с указанными подбиблиотеками на рисунках (рис. 1.7).

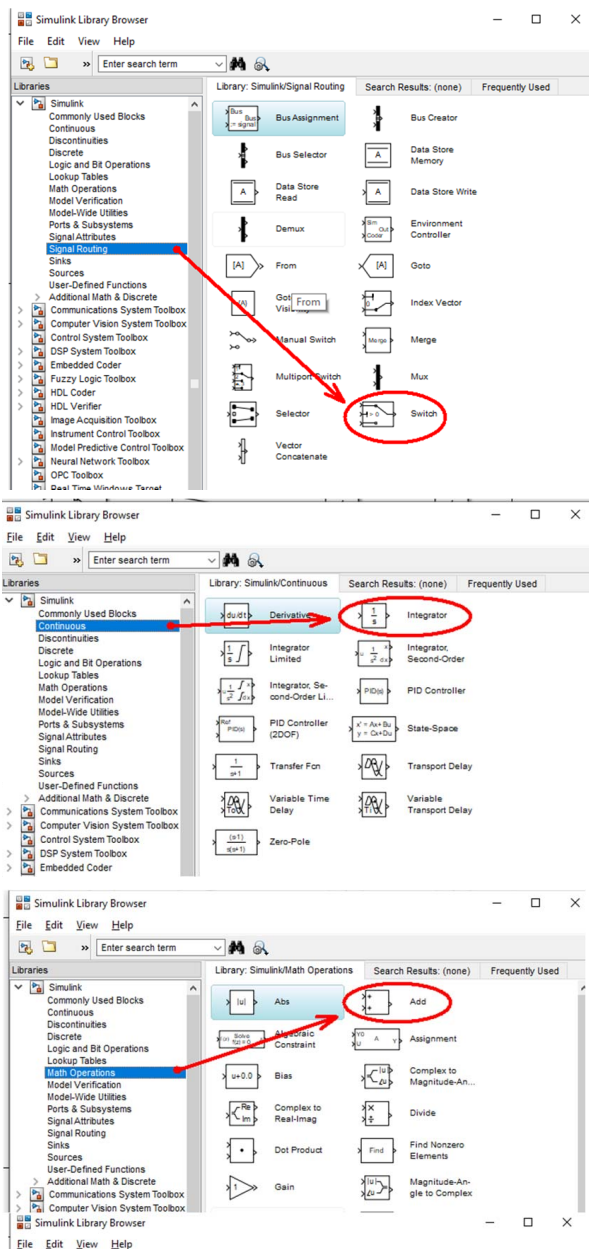


Рис. 1.7. Необходимые для построения модели блоки
(окончание см. на с. 14)

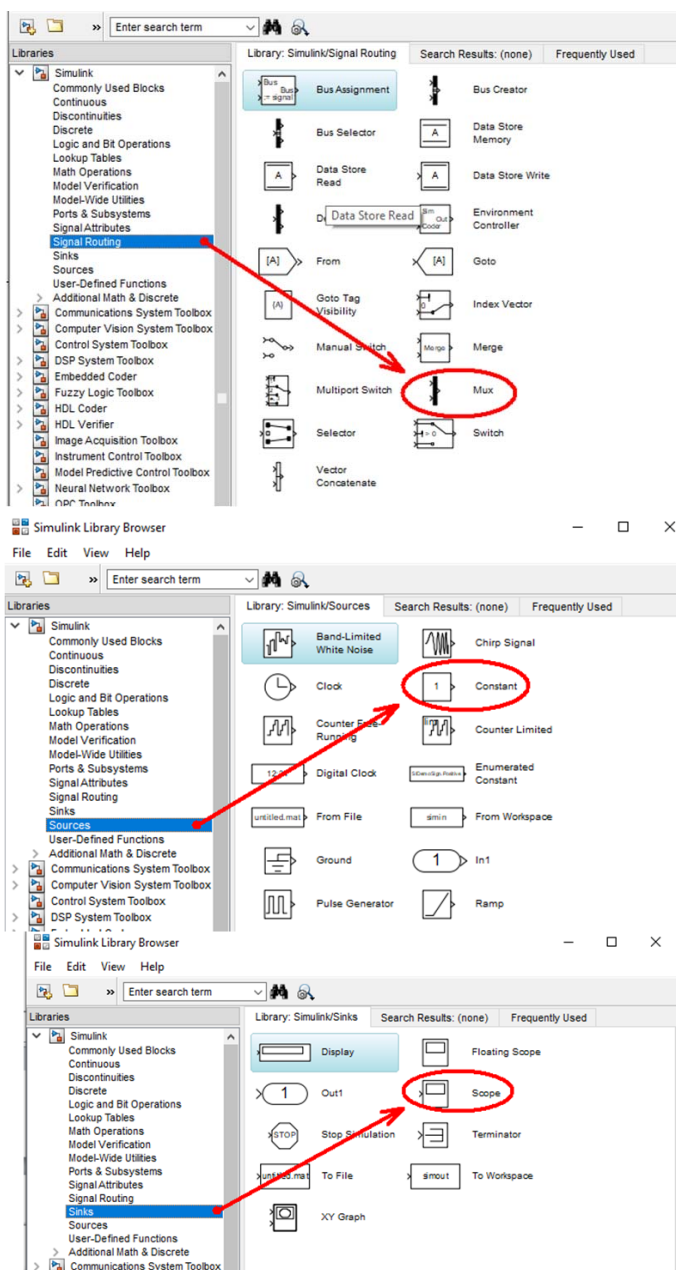


Рис. 1.7. Окончание (начало см. на с. 13)

Для сборки схемы нужно, удерживая левой клавишей мыши, стянуть указанные элементы на рабочее поле открытого окна Simulink-модели. Все блоки при необходимости можно копировать через буфер обмена.

Далее, удерживая левой клавишей мыши выходы блоков, потянуть линии к соответствующим входам блоков (рис. 1.8) других элементов, с которыми планируется соединение.



Рис. 1.8. Линия связи (выходная) от блока схемы

Если линия соединения остается красной, то это означает, что она не подключена к блоку, то есть ее не дотянули до входа очередного блока. После удачного соединения она становится черной.

Если линия проведена ошибочно, то, выделяя левой клавишей мыши связь и нажимая Del, можно удалить линию.

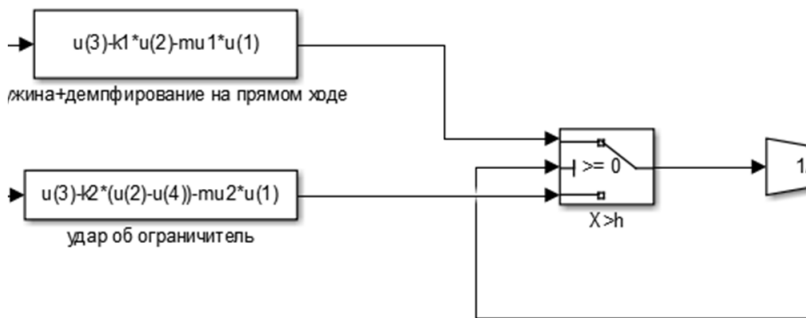


Рис. 1.9. Соединение элементов

Для реализации дискретности работы системы, ведь до удара об ограничитель система работает по первой системе уравнений (1.1), а после удара по второй (1.2), используется блок Switch. На рис. 1.9 он обозначен как $X > h$. Он работает так, что на выход подает результат вычисления по первой системе уравнения, когда на его управляющий средний вход подается величина, большая или равная нулю. В противном случае на выход подается результат расчета по второй

системе. Первые уравнения в системах (1.2) похожи, результатом правой части является одинаковый член (ускорение якоря). То есть в зависимости от условия различаются уравнения, по которым рассчитывается ускорение. Далее ускорение подвергается интегрированию до расчета скорости v и второму интегрированию до расчета перемещения x .

После сборки системы надо настроить параметры блоков. Для этого двойным кликом на каждом блоке открывается меню настройки.

Блок *Mux* может объединять по умолчанию 2 шины данных. Для увеличения этого числа нужно в настройках изменить двойку на нужное число. Этот блок используется, например, для связи со *Score* для вывода на одном поле диаграммы нескольких графиков, как это показано на рис. 1.15.

Два блока *Fcn* слева на рис. 1.2 и 1.9 при двойном нажатии на них имеют структуру:

$$u(3)-k1*u(2)-mu1*u(1) \text{ и } u(3)-k2*(u(2)-u(4))-mu2*u(1),$$

где $u(1)$, $u(2)$, $u(3)$ — номер переменной, поступающей из *Mux*-блока. Причем если посмотреть по очереди со входа на этот блок (рис. 1.2), то можно понять, что:

- $u(1)$ — сигнал с меткой v_os — это скорость привода;
- $u(2)$ — сигнал с меткой x_os — это перемещение привода;
- $u(3)$ — сила привода, получаемая от блока *Constant* с названием P , Н.

Дополнительно отметим, что любому блоку внизу можно дать название. Для этого необходимо кликнуть коротко два раза на нижнее название блока и в текстовое поле внести его название.

Константы $k1$, $k2$, $mu1$, $mu2$ введены в отдельной области в меню *File/Model Properties/Callbacks/InitFcn* (рис. 1.10).

Масса, которая фигурирует в блоке *Gain*, задана: $m = 1$ кг (масса якоря). На поле схемы также есть блок *Constant*, в котором задано: $h = 0,03$ м (ход якоря до столкновения).

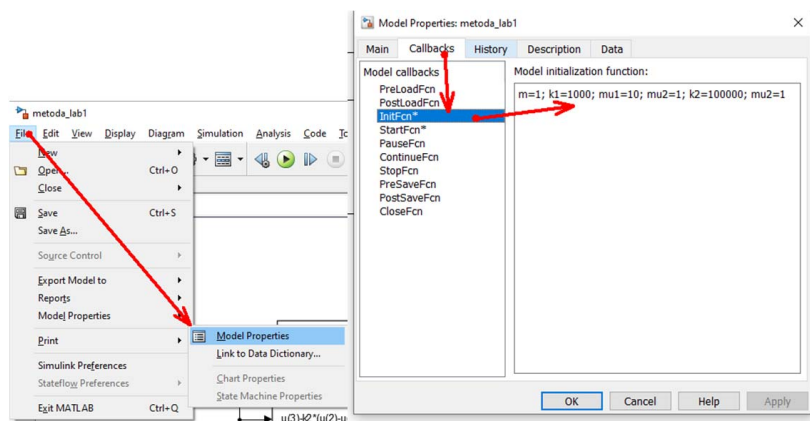


Рис. 1.10. Задание констант

Рассмотрим настройки Scope – прибора для вывода диаграмм работы системы. Для вывода всех рассчитанных при моделировании процессов точек в виде графика необходимо зайти в настройки Scope, кликнув по нему двойным коротким кликом, и в меню настройки (шестерня). Во вкладке History нужно убрать галочку в Limit data points to last, чтобы выводить все точки процесса, а не ограниченное их число (рис. 1.11).

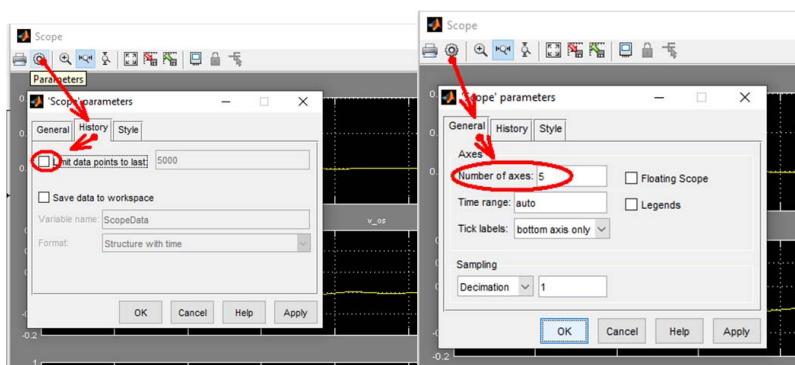


Рис. 1.11. Настройка модуля Scope

Дополнительно для вывода нескольких полей на общий график можно воспользоваться настройками вкладки General и выбрать число необходимых графиков Numbers of axes. Также дополнитель-

но для расчета необходимо настроить цифровые методы расчета схемы и точность расчета. Для этого в окне Simulation нужно выбрать Model Configuration Parameters (рис. 1.12).

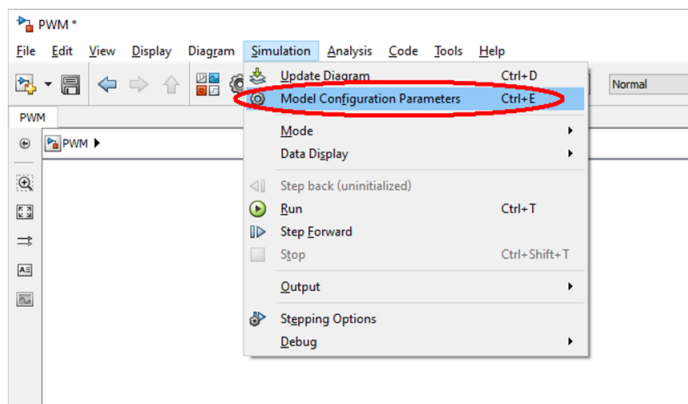


Рис. 1.12. Настройка расчетных методов

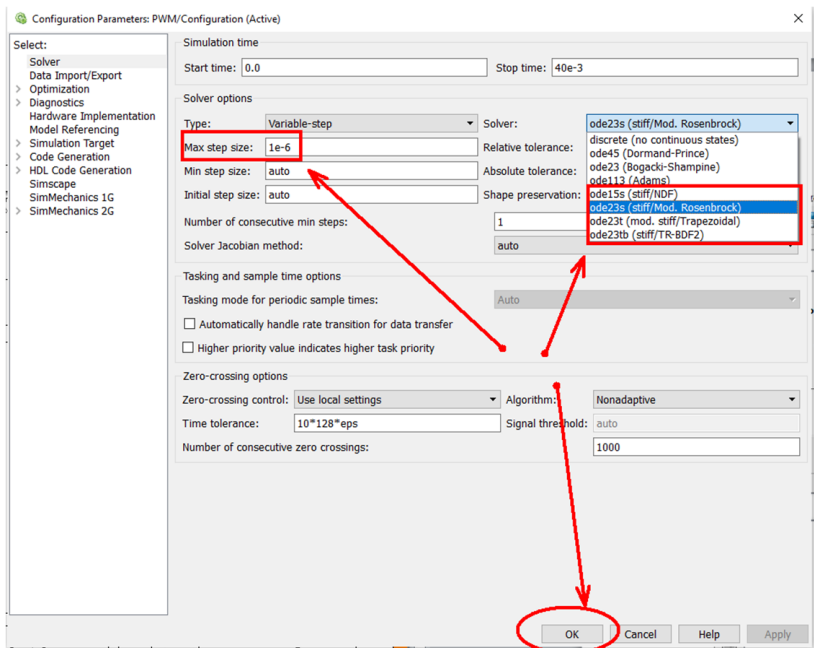


Рис. 1.13. Выбор и настройка окна Solver

В открывшемся окне выбрать Solver (рис. 1.13). Предпочтительными для систем со сложным интегрированием являются методы с индексом s (выделенный прямоугольник на рисунке), так как они обеспечивают решение жестких и трудноинтегрируемых систем дифференциальных уравнений.

Необходимо указать также максимальную длину шага по времени при интегрировании (указано значение $1e-6$ с, но можно начать с меньшей величины, чтобы ускорить расчет). Она влияет на точность интегрирования и время моделирования. Чем она меньше, тем точность выше, но медленнее рассчитывается модель.

Итак, для данной модели указаны следующие данные:

- масса $m = 1$ кг;
- жесткость пружины $k1 = 1000$ Н/м;
- коэффициент демпфирования при работе магнита $mu1 = 10$ Н · с/м;
- коэффициент демпфирования ограничителя $mu2 = 1$ Н · с/м;
- жесткость ограничителя $k2 = 100\,000$ Н/м;
- сила $P = 10$ Н;
- блок ход $h = 0,03$ м.

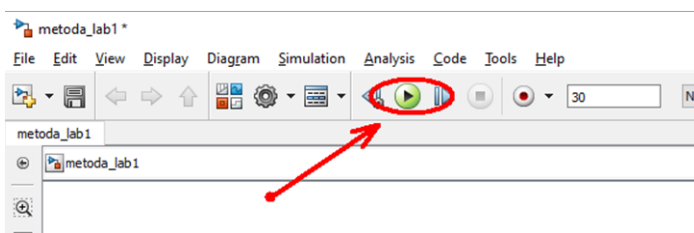


Рис. 1.14. Кнопка запуска моделирования

Запускаем систему на моделирование, нажав зеленую кнопку (рис. 1.14) на верхней строчке экрана.

После выполнения расчета, за прогрессом которого можно наблюдать по индикатору времени внизу страницы справа, кликнув двойным кликом на Score, смотрим результаты. Поиск интересующей нас части сигнала можно производить инструментами (лупы), расположенными вверху экрана (рис. 1.15).

На полях графиков подписаны обозначения графиков. Для того чтобы вывести произвольное название графика в расчетной модели,

надо на линии ввода (рис. 1.16) в Scope кликнуть двойным коротким кликом и в появившемся окошке дать название.

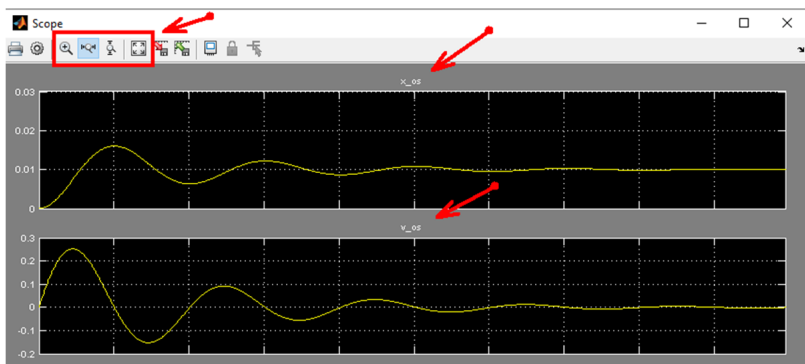


Рис. 1.15. Окно результатов в блоке Scope

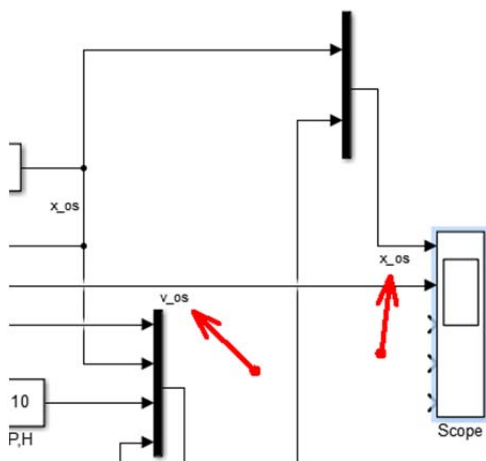


Рис. 1.16. Ввод названий графиков

Анализируя график на рис. 1.15, заметим, что якорь сдвигается и колеблется относительно установившегося состояния $x = 0,01$ м с последующим затуханием колебаний. Попробуем увеличить P до получения удара об ограничитель, который расположен на уровне $x = 0,03$ м (рис. 1.2), и отскока якоря от упора.

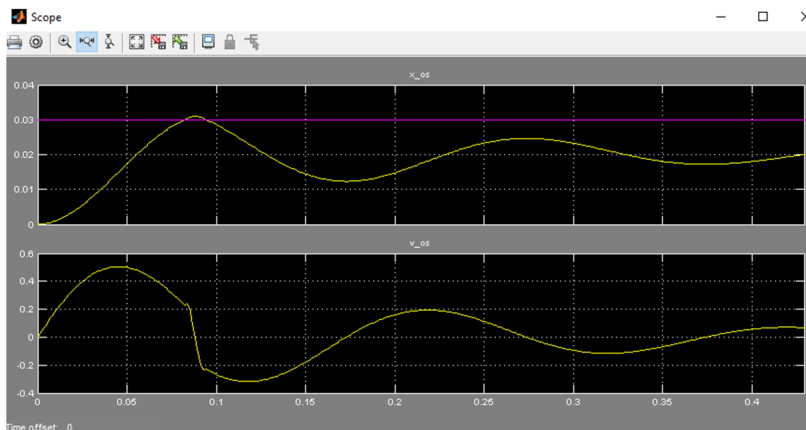


Рис. 1.17. Процессы движения якоря с ударом об ограничитель ($P = 20$ Н)

Процессы с ударом на рис. 1.17 получены при $P = 20$ Н. Об ударе свидетельствует пересечение фиолетовой линии в кривой перемещения (первый график) и более крутое изменение скорости (второй график) с момента соприкосновения якоря и упора.

Увеличим еще силу $P = 100$ Н (рис. 1.18).

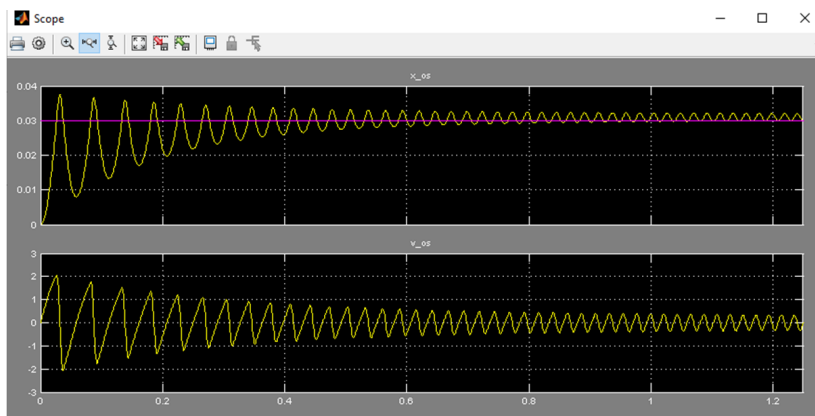


Рис. 1.18. Процессы движения якоря с ударом об ограничитель ($P = 100$ Н)

По рис. 1.18 заметны многократные удары якоря об ограничитель и проминание опоры при первом ударе почти на 10 мм (до 0,04 мм).

Для уменьшения ударов можно на поверхность ограничителя поставить полимерную, например полиуретановую, прокладку, которая уменьшит k_2 и увеличит tu_2 . Зададим вместо $tu_2 = 1 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$; $k_2 = 100\,000 \text{ Н/м}$ новые значения: $tu_2 = 100 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$; $k_2 = 10\,000 \text{ Н/м}$ для более мягкой прокладки (рис. 1.19). Если модель не изменять, то предполагается, что ограничитель сместится в положительном направлении по x при установке прокладки на величину толщины прокладки, при этом начало соприкосновения с демпфером ($x = h$) не изменится.

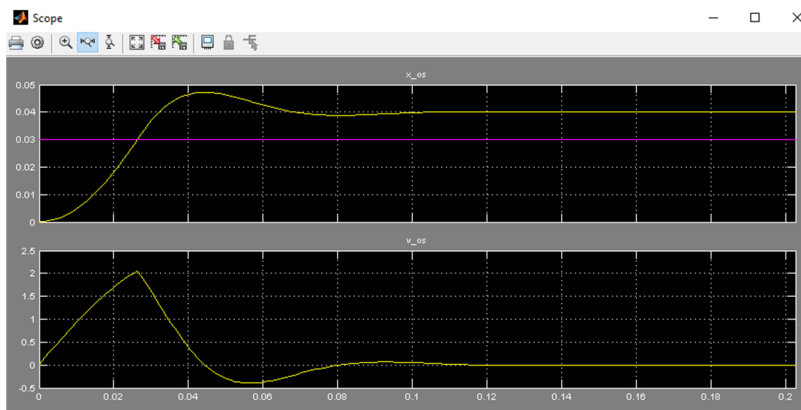


Рис. 1.19. Динамические процессы в системе при смене $tu_2 = 100 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$; $k_2 = 100\,000 \text{ Н/м}$ на $tu_2 = 100 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$; $k_2 = 10\,000 \text{ Н/м}$

По графикам заметно демпфирование процессов и увеличение статического продавливания прокладки примерно на 10 мм (до $x = 0,04 \text{ мм}$).

Можно промоделировать поведение системы по циклу подачи силы роботом для выдвигания якоря при включении катушки и обратного возврата штока при отключении катушки.

Для этого вместо источника постоянной силы на расчетной схеме (рис. 1.20) выберем генератор импульсов в подбиблиотеке (рис. 1.21) Sources/Pulse Generator. С параметрами: период 2 с, амплитуда 50 Н, заполнение периода импульсом 50 % (длина импульса равна полупериоду).

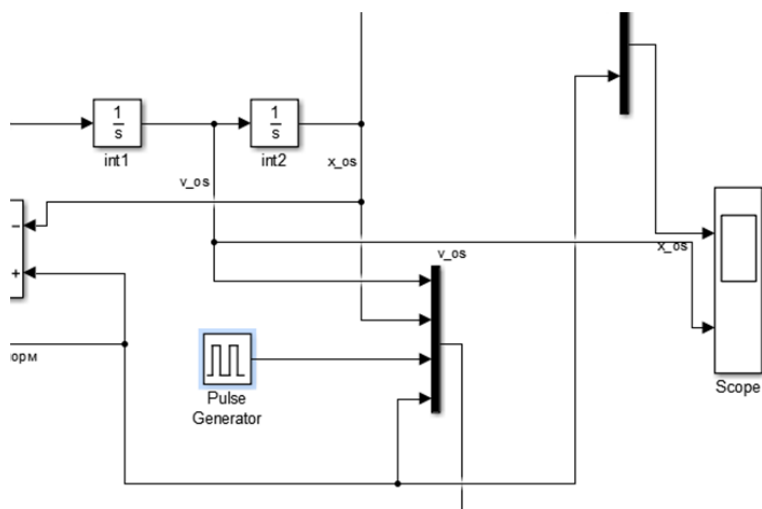


Рис. 1.20. Схема с генератором прямоугольных импульсов в задатчике силы

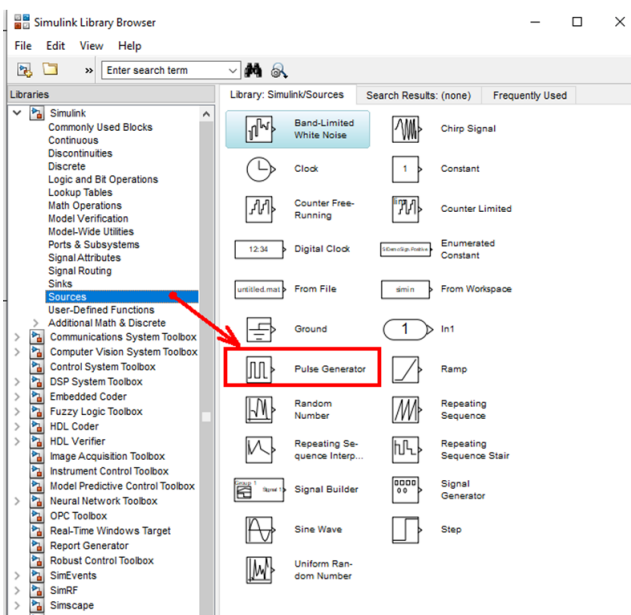


Рис. 1.21. Генератор прямоугольных импульсов

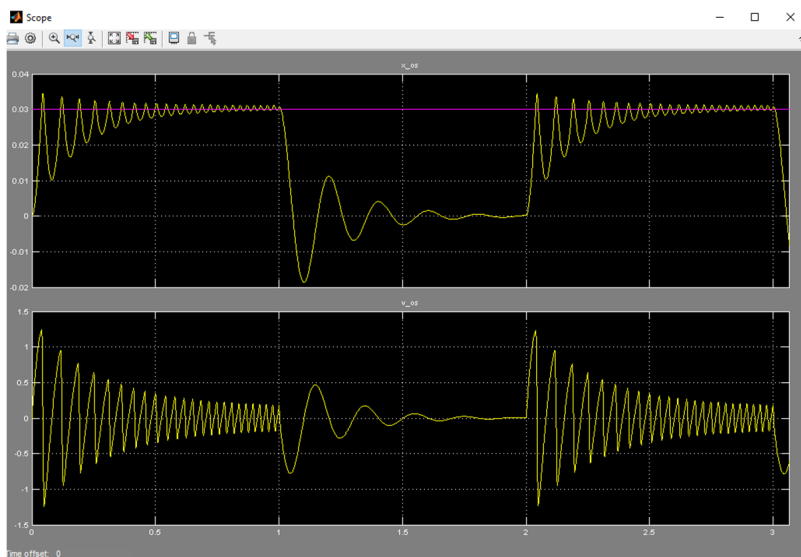


Рис. 1.22. Процессы движения якоря при периодическом режиме работы привода

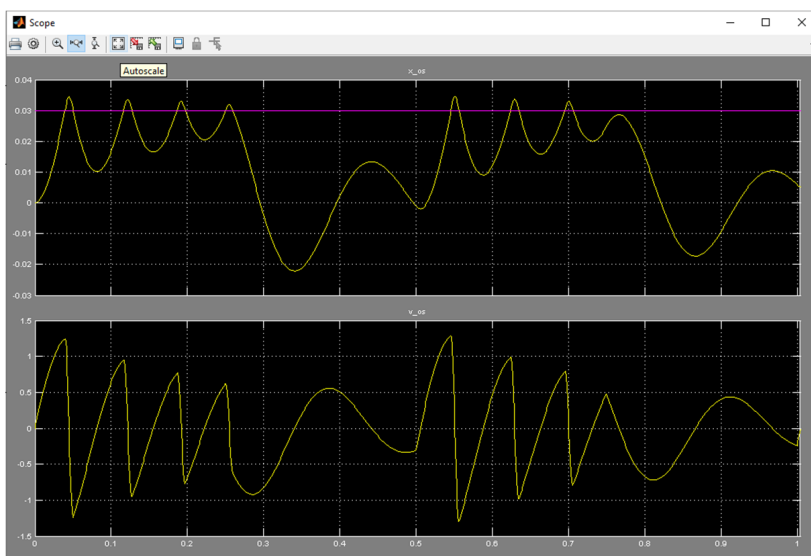


Рис. 1.23. Процессы движения якоря в периодическом режиме работы привода с периодом, равным 0,5 с

Результаты изображены на рис. 1.22. Заметно, что частота колебаний якоря при возврате якоря имеет более низкую частоту, что объясняется меньшим коэффициентом демпфирования $mu1$ по сравнению с $mu2$. Из диаграмм также видно, что заданный цикл определяет четкое срабатывание привода с возвратом в исходное состояние.

Если изменить период срабатывания на 0,5 с, то видно, что якорь привода не успевает установиться в исходном положении. И весь цикл находится в движении (рис. 1.23).

Исследование процесса с использованием математической модели

1. Разобраться с описанным выше примером и провести данные действия с заданием по варианту в соответствии с табл. 1.1.

2. Промоделировать три задачи:

- с $P1 = \text{const}$ из четвертого столбца;
- с прямоугольной силой амплитудой $P2$ и периодом $T2$, заполнением периода $m2$;
- с прямоугольной силой амплитудой $P2$ и периодом $T3$, заполнением периода $m3$.

Форма отчета

Оформить отчет в виде описания полученных результатов и экранных копий по пунктам:

- расчетная модель и ее словесное описание;
- численное задание на расчет (данные табл. 1.1). Задать ход $h = 0,03$ м;
- результаты моделирования в виде графиков перемещения, скорости, силы;
- анализ результатов.

Вариант исходных данных для расчета определяется по первой букве фамилии студента.

Таблица 1.1

Исходные данные для расчета

Вариант	Масса якоря	Система якоря		Ограничитель		Амплитуда силы	Амплитуда силы	Период	Заполнение периода	Период	Заполнение периода
	m	$k1$	$mu1$	$k2$	$mu2$	$P1$	$P2$	$T2$	$m2 \%$	$T3$	$m3 \%$
А – Б	1	2e3	10	2e5	1	80	100	2	10	0,5	80
В – Д	2	2e3	10	2e5	1	80	100	2	50	0,5	20
Е – З	5	2e3	10	2e5	1	80	100	2	80	0,5	10
И – К	10	2e3	10	2e5	1	80	100	2	10	0,5	80
Л – Н	1	2e3	10	2e5	1	100	100	2	50	0,5	20
О – Р	2	2e3	10	2e5	1	100	100	2	80	0,5	10
С – У	5	2e3	10	2e5	1	100	100	2	10	0,5	80
Ф	10	2e3	10	2e5	1	100	100	2	50	0,5	20
Ч	1	2e3	10	2e5	1	150	100	2	80	0,5	10
Ц	2	2e3	10	2e5	1	150	100	2	10	0,5	80
Ч	5	2e3	10	2e5	1	150	100	2	50	0,5	20
Ш – Щ	10	2e3	10	2e5	1	150	100	2	80	0,5	10
Э – Я	10	1e3	10	2e5	1	100	100	2	10	0,5	80

Выводы

Отчет должен содержать выводы в виде заключения, в котором должны быть описаны результаты с последующим их анализом.

Алгоритм создания математической модели

Для выполнения указанного электромагнитного расчета в системе будем использовать задачу Магнитостатическое поле.

Рассмотрим очень кратко ряд действий, необходимых для создания модели.

1. Создание задачи

Открыть окно **Создать задачу** (рис. 2.2).

Задать **Имя файла задачи** (рис. 2.3).

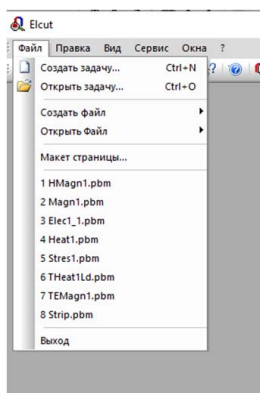


Рис. 2.2. Меню создания задачи

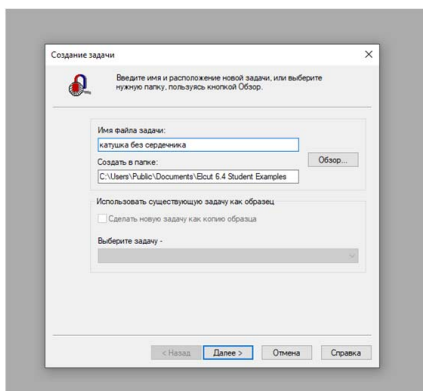


Рис. 2.3. Окно создания задачи

Выбрать тип задачи, как на картинке, единицы длины — сантиметры, класс модели — осесимметричная (рис. 2.4).

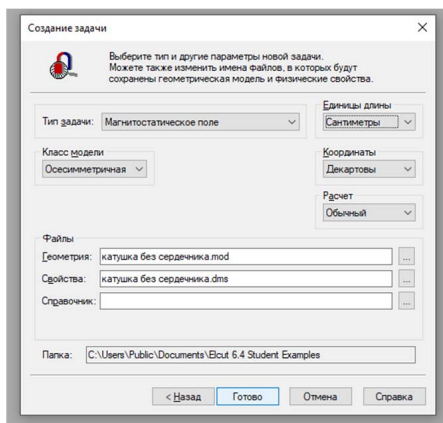


Рис. 2.4. Параметры окна создания задачи Магнитостатическое поле

2. Создание геометрии

Нарисовать на поле геометрии сечение катушки (верхнюю часть) с витками, используя инструменты рисования и понимая, что ось симметрии z лежит горизонтально, ее положительное направление вправо и она очерчена коричневой линией (рис. 2.5).

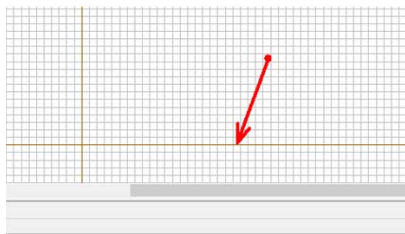


Рис. 2.5. Окно создания задачи

Отрисовку ребер надо производить инструментом **Вставки вершин и ребер** (рис. 2.6).

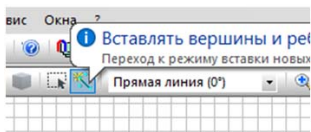


Рис. 2.6. Инструмент отрисовки ребер

Для понимания координат нахождения пера и проверки корректности геометрии можно контролировать себя по координатам его положения, расположенным справа внизу экрана (рис. 2.7).

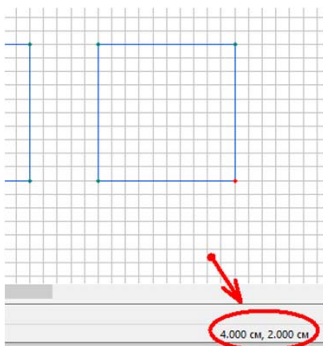


Рис. 2.7. Координаты пера

Двойное нажатие коротким кликом на ребра показывает координаты точек начала и конца, а также длину ребра и тип метки ребра (в будущем это понадобится для задания нулевого потенциала у контура) (рис. 2.8).

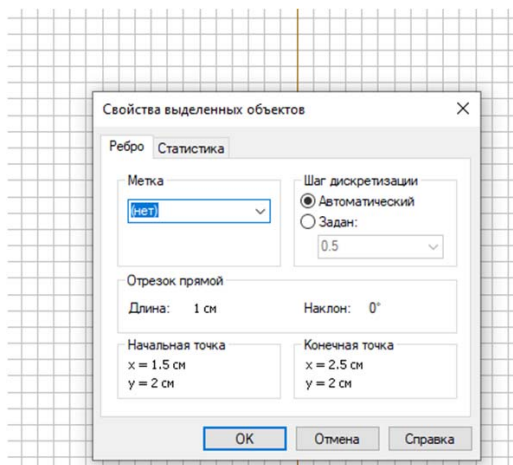


Рис. 2.8. Окно свойства выделенного объекта

Пример отрисовки одновитковой катушки (рис. 2.9).

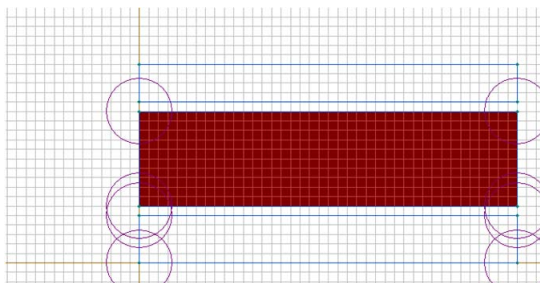


Рис. 2.9. Геометрия расчетной области (область катушки подсвечена, магнитные части не подсвечены)

Полученная по рис. 2.9 геометрия соответствует полностью втянутому якорю в область катушки на h (ход), что соответствует положению якоря относительно катушки $x = 0$, и при выходе якоря из катушки вправо x будет расти. Однако в механической системе x увеличивается в обратном направлении (см. рис. 1.2) от $x = 0$

при полном выбеге якоря вправо до $x = h$ при полном втягивании, как на рис. 2.9. Этот факт надо будет учесть в полной модели электромагнитной и механической систем в четвертой лабораторной работе (рис. 4.1).

3. Задание свойств областей для расчета

Построим сначала внешний контур, включающий катушку. Контур должен выбираться так, чтобы магнитное поле, пересекающее контур, было малым по сравнению с полем около областей катушки, то есть на удалении от катушки. Например, так, как показано на рис. 2.10 (внешняя линия).

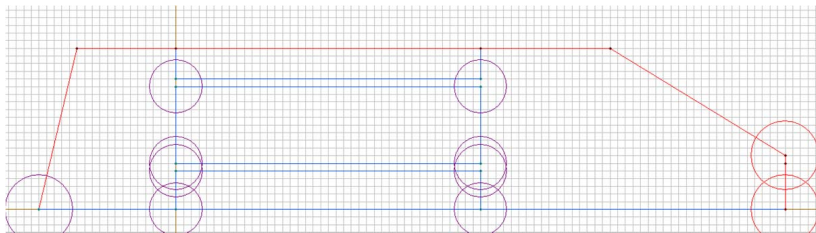


Рис. 2.10. Внешний контур, включающий геометрию витков катушки

В нашей модели должно быть четыре области — воздух, катушка, якорь, индуктор, то есть необходимо выделить эти области и задать их свойства. Для этого правой клавишей мыши нужно щелкнуть на **Метки блоков** и выбрать **Создать метку** (рис. 2.11).

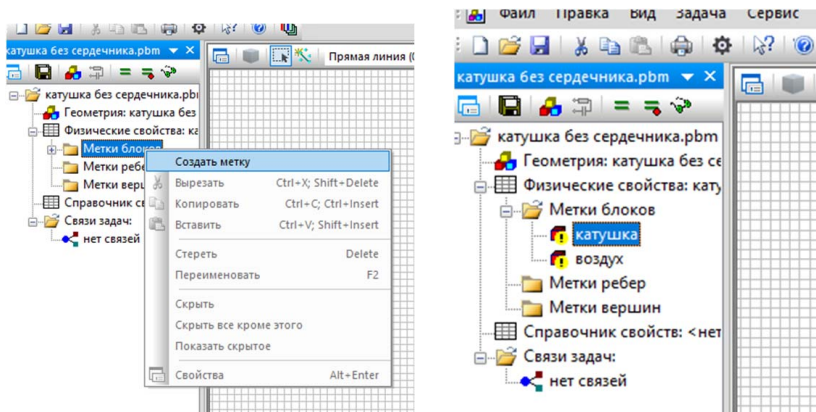


Рис. 2.11. Создание областей расчета

Затем надо описать свойства области воздух (рис. 2.12).

Рис. 2.12. Описание свойств области воздух

Затем описать свойства области катушки (задать ток в катушке 10 000 А); описать свойства области якоря и индуктора (магнитная относительная проницаемость материала, равная 1000) (рис. 2.13).

Рис. 2.13. Описание свойств области катушки и индуктора

Контур, содержащий область расчета, задается в метках ребер правой клавишей мыши (рис. 2.14).

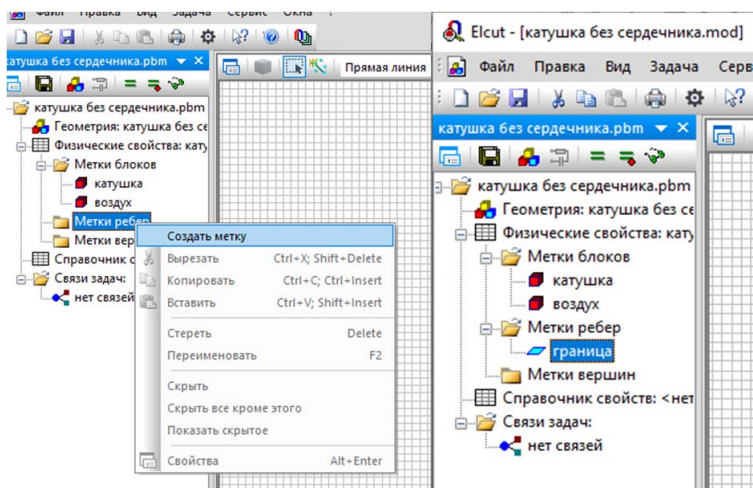


Рис. 2.14. Создание метки ребра – граница

Необходимо задать магнитный потенциал, равный 0, что означает отсутствие поля на контуре (рис. 2.15).

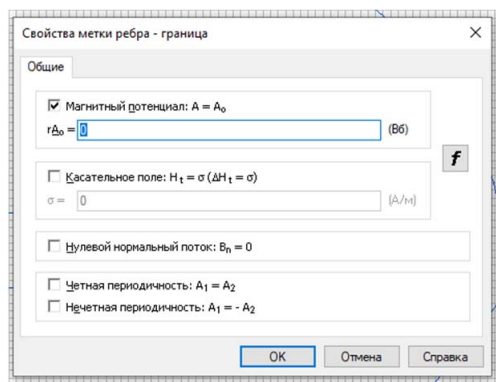


Рис. 2.15. Задание свойства внешнего контура

Далее описания свойств областей и контура нужно привязать к реальным областям и контуру на чертеже геометрии расчетной области.

Для этого левой клавишей мыши щелкаем на область воздуха, а потом правой клавишей в выпадающем меню – на **Свойства**, задаем **воздух** (рис. 2.16).

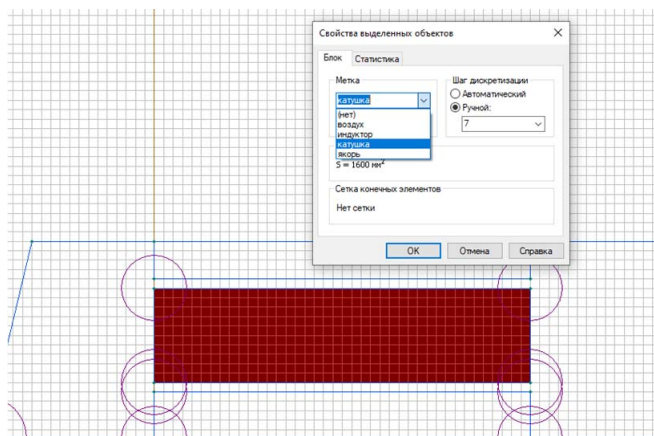


Рис. 2.16. Окно создания задачи

Аналогично поступить с областью катушки и привязать к ней свойства — **Катушка**.

Для выделения внешнего контура надо зажать клавишу Ctrl и левой клавишей все ребра контура (они подсвечиваются красным). И далее правой клавишей задать **Свойства выделенного объекта** с меткой 0 (рис. 2.17).

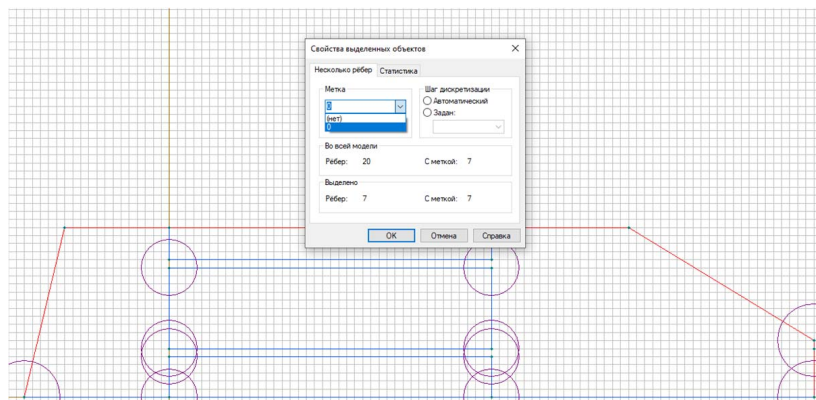


Рис. 2.17. Окно создания задачи

Построить сетку расчета во всех блоках, кликнув на поле геометрии правой клавишей и выбрав **Во всех блоках** (рис. 2.18).

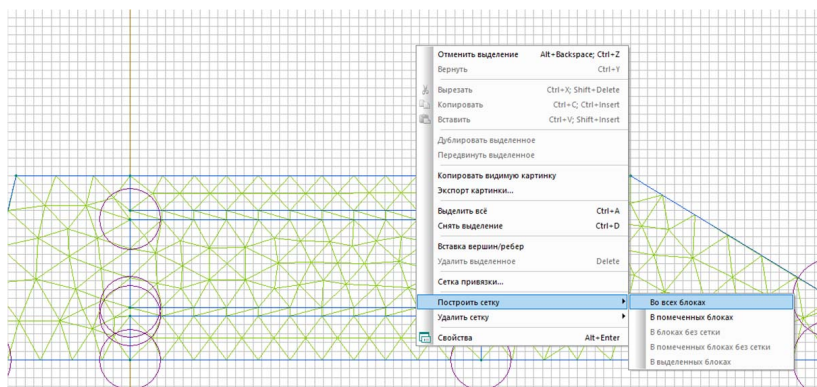


Рис. 2.18. Окно создания задачи

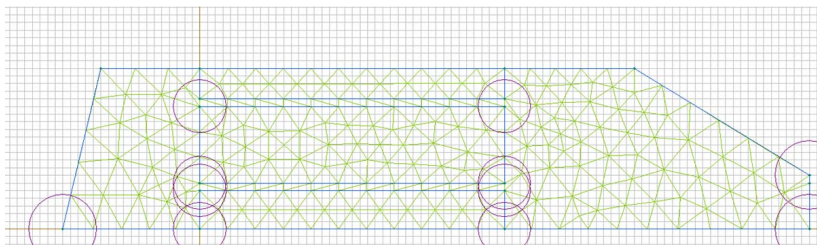


Рис. 2.19. Построенная сетка

Если при построении сетки выдается ошибка о превышении числа узлов, что может быть в свободно распространяемой версии ПО (максимальное число узлов ограничено 255), то необходимо уменьшить число узлов (рис. 2.20).

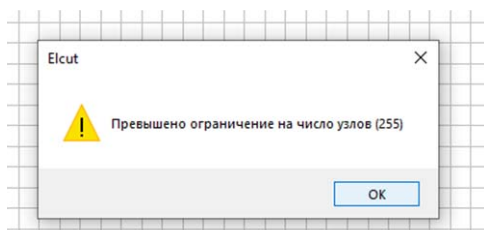


Рис. 2.20. Ошибка при создании сетки

Для этого надо отметить область всей схемы или только отдельных частей, где надо менее точно провести расчет и увеличить рас-

стояние между узлами расчета (поле **Шаг дискретизации – Задан**), при этом уменьшится количество узлов во всей модели (рис. 2.21).

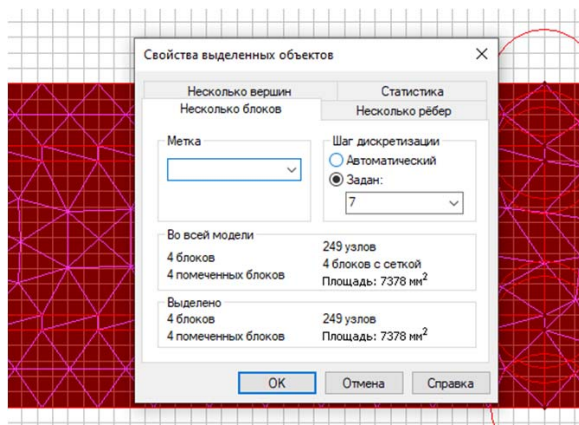


Рис. 2.21. Задание дискретизации узлов сетки

Сильно уменьшать число узлов не рекомендуется, так как это влияет на точность расчетов. Следует стремиться к максимальному числу узлов, равному 255.

4. Расчет

После построения сетки можно запустить систему на расчет, нажав на пиктограмму (рис. 2.22).

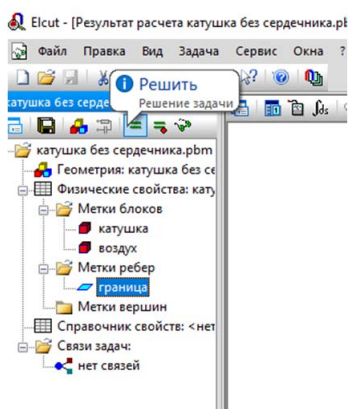


Рис. 2.22. Кнопка начала расчета

Результат получить в виде силовых линий магнитного поля (рис. 2.23).

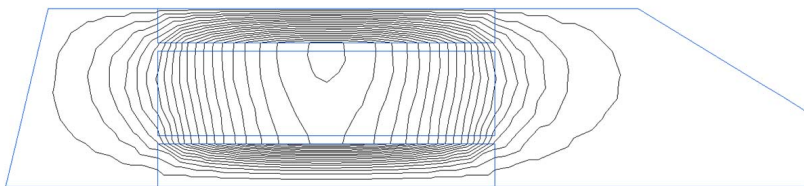


Рис. 2.23. Картина магнитных силовых линий поля

Для получения цветной картины распределения индукции нужно навести курсор на поле расчета, кликнуть правую клавишу и выбрать **Свойства картины поля** (рис. 2.24).

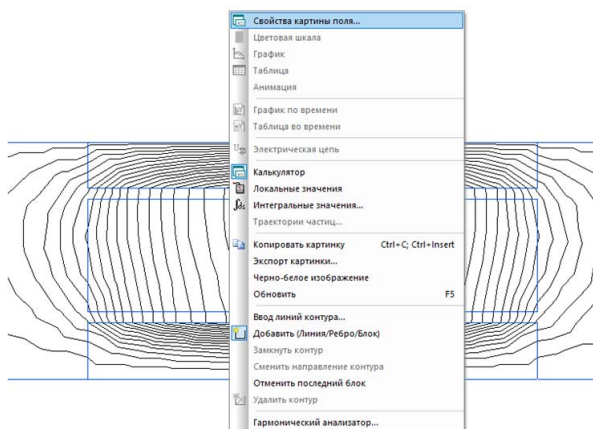


Рис. 2.24. Вывод картины индукции поля

Далее галочку в поле **Цветная карта** и кнопку в **Индукция** (рис. 2.25).

В результате получим цветную карту поля с распределением индукции (рис. 2.26).

Нажав далее правую клавишу и выбрав цветовую шкалу, выберем шкалу индукции для понимания того, какой цвет соответствует какому числовому значению индукции (рис. 2.27).

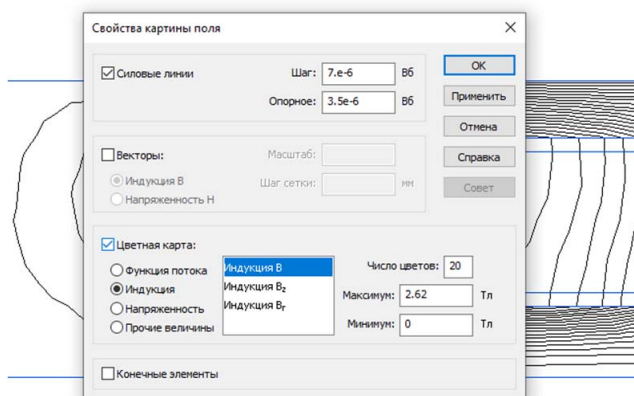


Рис. 2.25. Окно создания задачи

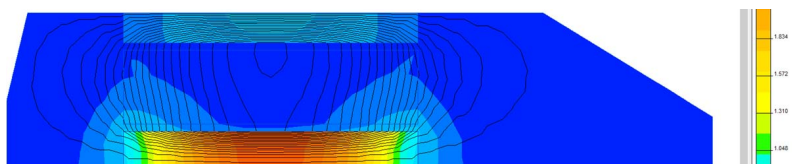


Рис. 2.26. Цветная картина поля

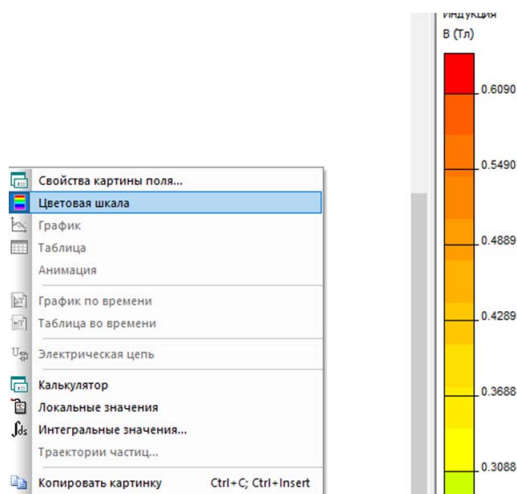


Рис. 2.27. Цифровая шкала индукции

5. Расчет параметров

Для определения магнитных параметров модели можно воспользоваться интегральным калькулятором (рис. 2.28).

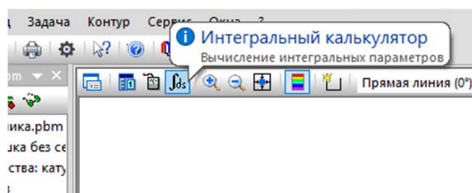


Рис. 2.28. Запуск интегрального калькулятора

Для дальнейших исследований нужно определить механическую (пондеромоторную) силу $P(i, x)$ и энергию $W(x)$.

Силу P можно определить непосредственным выделением интересующей области, в нашем случае — силы, действующей на якорь. Для этого кликаем на область якоря и открываем интегральный калькулятор.

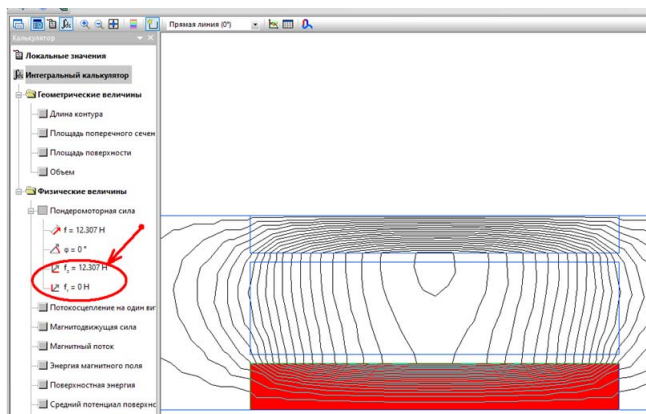


Рис. 2.29. Расчет силы

В разделе **Пондеромоторная сила** смотрим направление силы, знак проекции f_x и ее значение. Например, по рисунку $f_x = 12,307$ Н (рис. 2.29). Значит, сила направлена вправо по оси и направлена на втягивание якоря в катушку. Следует отметить, что поскольку с магнитной точки зрения конструкция в данном положении якоря симметрична, как и симметричны поля по картине магнитных си-

ловых линий, то более точно сила должна быть равна в данном случае нулю: $f_z = 0$ Н. Это различие с расчетным определяется малым числом узлов, разрешенных для обсчета (менее 255).

Выбираем **Мастер индуктивностей**, а в нем опцию — **Исходя из запасенной энергии** (рис. 2.30) для определения энергии W в магнитном поле.

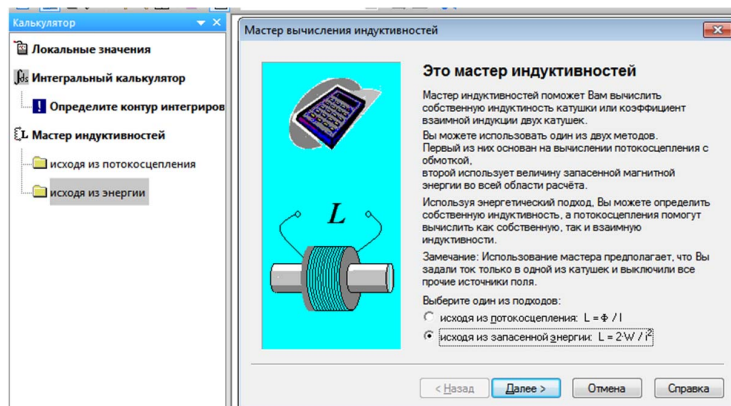


Рис. 2.30. Мастер индуктивности

Далее нажимаем кнопку **Вычислить**. Ток в витке — 9600 А (это общий ток в одновитковой обмотке катушки), число витков — 1 (рис. 2.31).

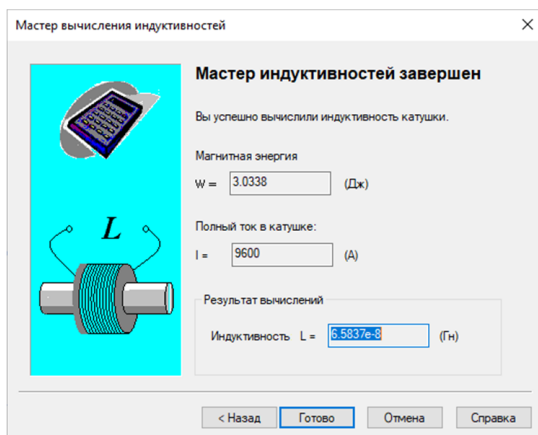


Рис. 2.31. Расчет индуктивности

Итак, получаем W и L катушки (рис. 2.32).

Таким образом, зная теперь, как рассчитать P , можно проделать эти действия для других положений якоря, сдвигая его вправо на четыре одинаковых шага по $\Delta l = 20$ мм, то есть на полный выбег якоря, и повторяя эти действия на изменяемый ток 3200, 6400, 9600 А.

Для смещения якоря надо в файле **Геометрия** выделить якорь кликом левой и затем правой клавишами мыши. Это приведет к выделению его области и входу в меню. Далее нажать на **Передвинуть выделенное** по оси z вправо на 20 мм (рис. 2.32).

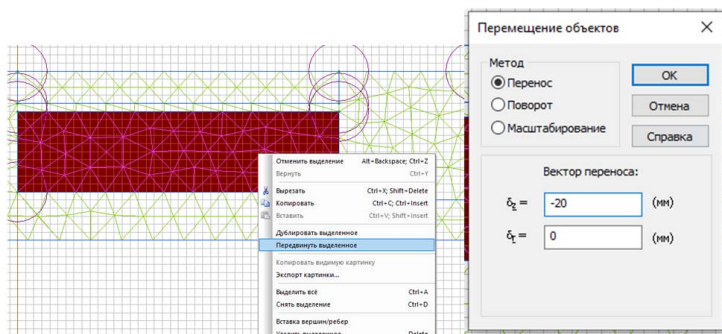


Рис. 2.32. Операция передвижения якоря

Далее повторить операции с перерасчетом модели и определением силы P и магнитной энергии W (рис. 2.33).

X, мм	P, Н	W, Дж	i	f
0	12,112	3,0354	9600	
20	7,4948	2,4303	9600	
40	13,807	1,417	9600	
60	6,9	0,81196	9600	
80	0,8861	0,65171	9600	
0	5,3833	1,3491	6400	
20	3,331	1,0801	6400	
40	6,1363	0,6298	6400	
60	3,0667	0,36087	6400	
80	0,39382	0,28965	6400	
0	1,3458	0,33726	3200	
20	0,83276	0,27004	3200	
40	1,5341	0,15745	3200	
60	0,76667	0,09022	3200	
80	0,09846	0,07241	3200	

Рис. 2.33. Расчет параметров модели привода

Исследование процесса с использованием математической модели

Установить ПО ELCUT. Разобраться с описанным выше примером и провести данные действия с заданием по варианту в соответствии с табл. 2.3 и рис. 2.1.

Форма отчета

Результаты вычислений оформить в отчет в виде описания полученных результатов и экранных копий по пунктам:

- описание задачи и данных для расчета в соответствии с табл. 2.3;
- геометрия задачи (первое положение якоря $x = 0$);
- свойства областей и ребер;
- результаты расчета в виде линий поля и цветной картинки индукции (первое положение якоря $x = 0$);
- заполненные таблицы P , W (по аналогии с табл. 2.1, 2.2).

Привести файлы задачи следующих типов (геометрии, описания свойств областей и самой задачи).

Таблица 2.1

Механическая сила действия на якорь, Н

Ток	Положение якоря, мм				
	0	20	40	60	80
3200	1,3458	0,83276	1,5341	0,76667	0,098456
6400	5,3833	3,331	6,1363	3,0667	0,39382
9600	12,112	7,4948	13,807	6,9	0,8861

Таблица 2.2

Энергия магнитного поля, Дж

Ток	Положение якоря, мм				
	0	20	40	60	80
3200	0,33726	0,27004	0,15745	0,090218	0,072413
6400	1,3491	1,0801	0,6298	0,36087	0,28965
9600	3,0354	2,4303	1,417	0,81196	0,65171

Таблица 2.3

Размеры конструкции

Вариант	Длина якоря и катуш- ки	Диаметры катушки		Диаметр сердечни- ка внутр.	Диа- метр якоря	Ток, А
	а, мм	D , мм	D^* , мм	$D_{я}$, мм	d , мм	I
А – Б	80	64	24	68	20	5000, 7500, 10 000
В – Д	100	64	24	68	20	5000, 7500, 10 000
Е – З	120	64	24	68	20	5000, 7500, 10 000
И – К	150	64	24	68	20	5000, 7500, 10 000
Л – Н	80	70	24	76	20	5000, 7500, 10 000
О – Р	100	70	24	76	20	5000, 7500, 10 000
С – У	120	70	24	76	20	5000, 7500, 10 000
Ф	150	70	24	76	20	5000, 7500, 10 000
Х	80	75	24	80	20	5000, 7500, 10 000
Ц	100	75	24	80	20	5000, 7500, 10 000
Ч	120	75	24	80	20	5000, 7500, 10 000
Ш – Щ	150	75	24	80	20	5000, 7500, 10 000
Э – Я	80	70	24	80	20	5000, 7500, 10 000

* Внешний диаметр сердечника равен $D_{я} + 20$ мм.

Выводы

Отчет должен содержать выводы по работе в виде заключения с описанием результатов и последующим их анализом.

Лабораторная работа 3

Создание модели основных характеристик электромагнитного линейного привода в Simulink

Цель работы — описание математической модели электромагнитной части манипулятора $P(i, x)$.

Используемое оборудование и материалы. Для выполнения работы необходимо программное обеспечение, указанное во введении.

Методические рекомендации по проведению занятия

Дальнейший план работы состоит в задании в Simulink параметров из табл. 2.1, 2.2. Эти зависимости требуются для совместного решения задачи динамики привода в общем случае. Первое уравнение, описывающее динамику, отражает связь механической и электрической систем, второе — магнитной и электрической. Далее эти уравнения требуется задать в Simulink.

Алгоритм создания математической модели

Функция $P(i, x)$ описана таблично, и для такого вида представления в Simulink есть блок 2-D Lookup Table в подбиблиотеке Lookup Tables (рис. 3.1).

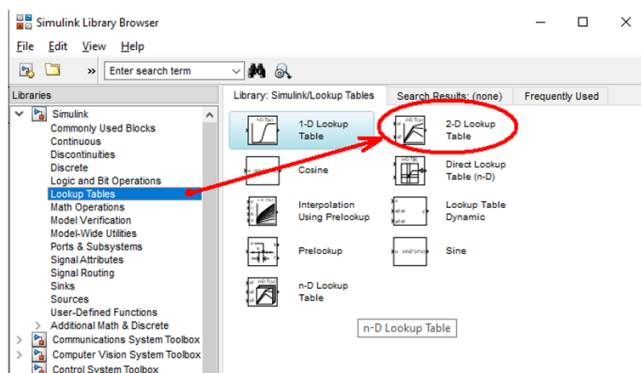


Рис. 3.1. Блок 2-D Lookup Table

Этот блок имеет две входные переменные и внутри имеет табличную структуру. Верхний ввод для переменных описывает дви-

жение по строкам таблицы, нижний – переменную, которая описывает движение по столбцам. Примем, что первый ввод блока будет для тока i , а второй – для перемещения x .

Для заполнения таблицы можно кликнуть двойным кликом на блок и нажать на кнопку Edit table (рис. 3.2).

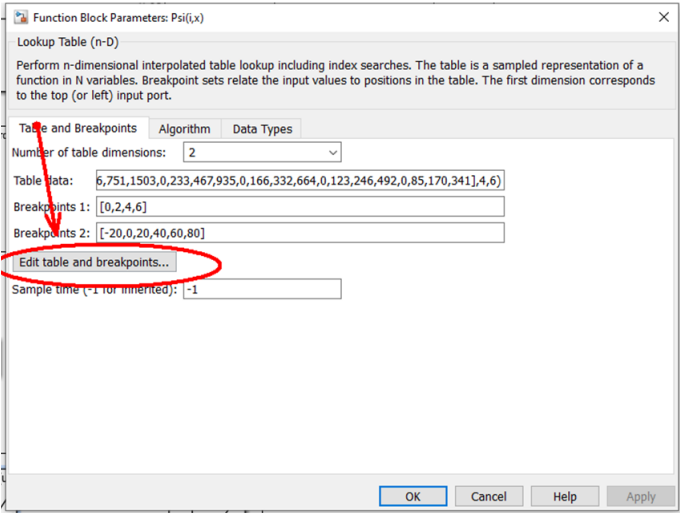


Рис. 3.2. Кнопка редактирования таблицы блока 2-D Lookup Table

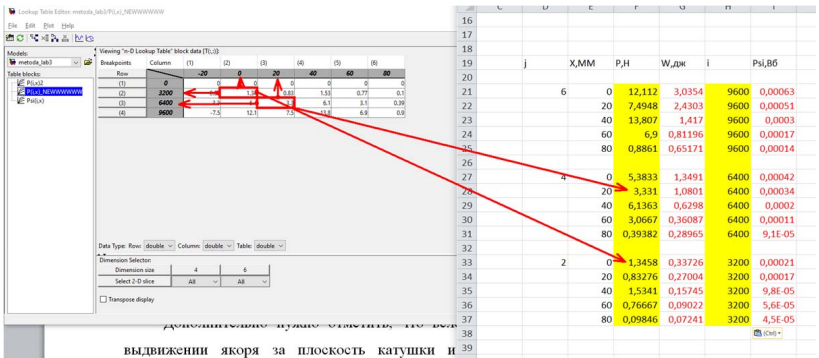


Рис. 3.3. Редактирование таблицы $P(i, x)$ блоков таблицы 2-D Lookup Table

Затем последовательно надо заполнить соответствующие ячейки (на рис. 3.3 показано в цветовой гамме).

Дополнительно нужно отметить, что вследствие симметрии поля при выдвигании якоря за плоскость катушки и втягивании в катушку на одинаковое смещение x и $-x$ соответственно сила $P(x) = -P(-x)$. Это доопределение данных отражено в таблицах этих функций (см. выделенные столбики для $x = 20$ мм, $x = -20$ мм) (рис. 3.4).

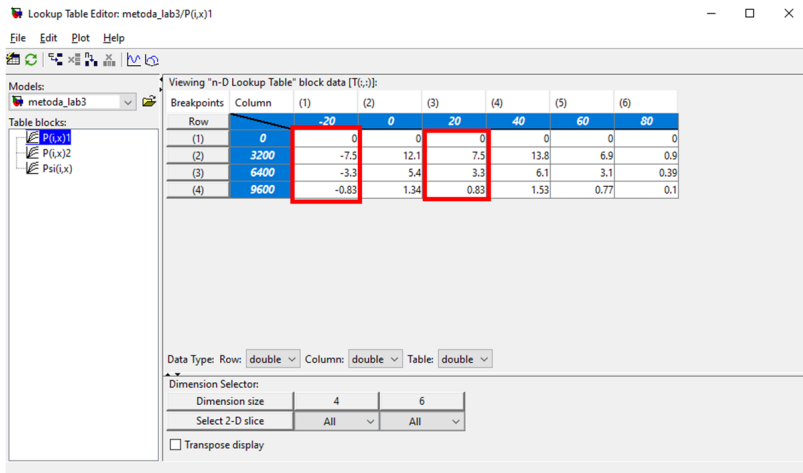


Рис. 3.4. К пояснению доопределения данных в таблице при $x > 0$

Таким образом, после заполнения таблиц получается блок, отражающий электромеханическую модель магнита $P(i, x)$ (рис. 3.5). Аналогично составляется модель для описания функции энергии $W(i, x)$.

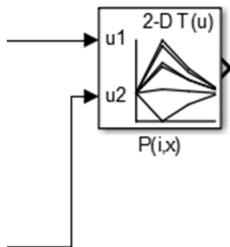


Рис. 3.5. Блок Simulink с данными $P(i, x)$

Исследование процесса с использованием математической модели

По полученным в лабораторной работе 2 таблицам подготовить модели функции $P(i, x)$, $W(i, x)$ в Simulink.

Форма отчета

1. Результаты оформить в отчет в виде экранных копий с таблицами аналогично рис. 3.3 для $P(i, x)$ (без красных выделений и стрелок).
2. Привести файл Simulink с моделями функций.

Выводы

Отчет должен содержать выводы по работе в виде заключения с описанием результатов и последующим их анализом.

Лабораторная работа 4

Создание электромеханической модели электромагнитного линейного привода в Simulink

Цель работы — описание математической модели электромагнитной части привода в Matlab/Simulink.

Используемое оборудование и материалы. Для выполнения работы необходимо программное обеспечение, указанное во введении.

Методические рекомендации по проведению занятия

Моделирование электромагнитного привода по плану проведения работы требует объединенного решения уравнений, описывающих электромагнитную и механическую системы. Таким образом, построение модели системы электропривода состоит в объединении моделей, полученных в первой и третьей лабораторных работах.

Алгоритм создания математической модели

На поле Simulink расположить взятые из первой лабораторной работы блоки, отражающие механическую модель привода, и блок механической силы $P(i, x)$ из третьей лабораторной (рис. 4.1). Для упрощения построения системы упростим питание электромагнитного привода. Будем считать, что у нас имеется схема управления током. В реальности эту функцию выполняет полупроводниковый преобразователь с регулятором тока. Попробуем посмотреть реакцию работы системы на изменение тока в обмотке. Для начала зададим в обмотке постоянный ток $i = 9600$ А или МДС (магнитодвижущая сила) $F = iw$. Следует отметить, что большого значения тока в реальности чаще всего не требуется, так как это ток однофазной обмотки $w = 1$. В реальности обмотка наматывается мелким проводом и задается некоторое число витков, например, $w = 1000$ витков. Тогда для такого же действия (магнитного поля) необходим ток $i = F / w = 9600 / 1000 = 9,6$ А. Увеличение числа витков уменьшает ток и нагрузку на полупроводниковые приборы регулятора, однако при прочих условиях увеличивает реакцию (затягивает динамику) изменения тока в магните.

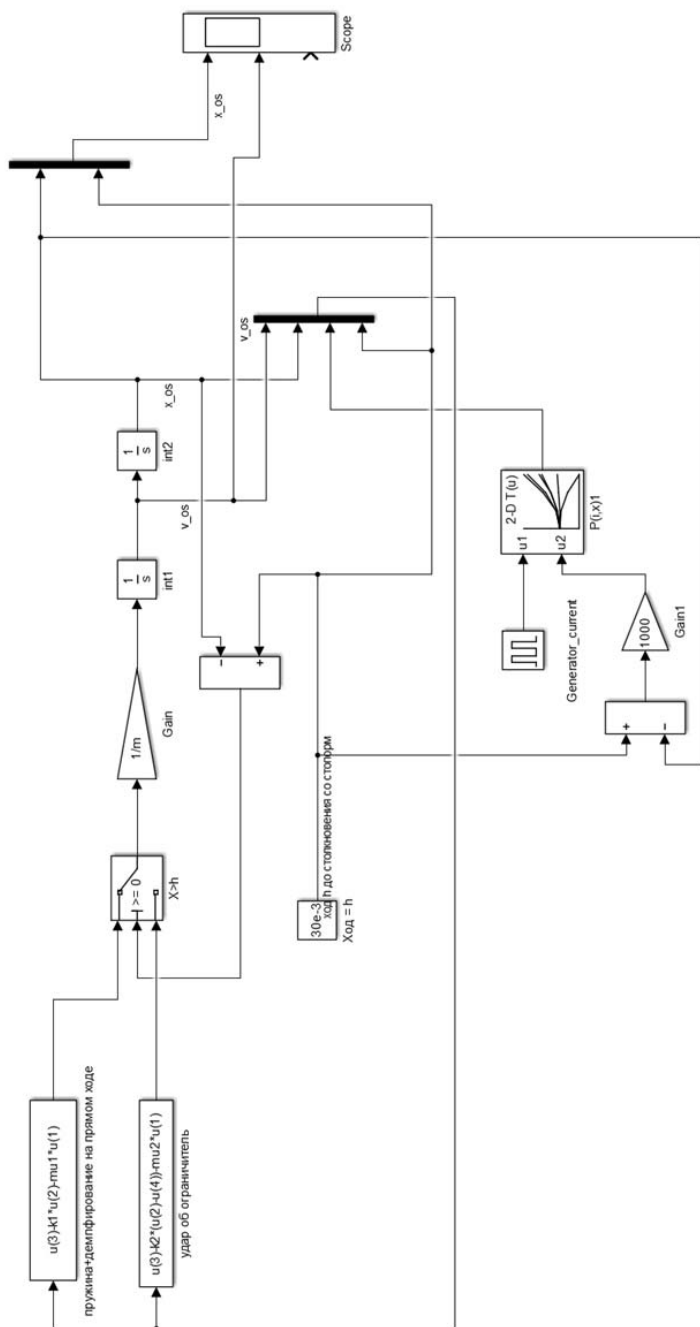


Рис. 4.1. Расчетная схема для расчета динамики линейного электромагнитного привода

Дополнительно в модель надо добавить блоки, которые согласуют модель привода с механической системой.

Это блок умножения на 1000 — Gain, так как расчет положения x делается Simulink в системе СИ, в метрах, а данные x в функцию $P(i, x)$ входят в миллиметрах.

При расчете модели привода $P(i, x)$ в ELCUT предполагалось, что перемещение якоря x положительное и направлено от полностью втянутого якоря ($x = 0$) в сторону полного его выбега ($x = h$). Однако в механической системе по рис. 4.1 направление оси x противоположное, от точки полного выбега до полностью втянутого якоря. Таким образом, нужен блок для согласования координат движения якоря в магнитной системе (функция $P(i, x)$) и в механической системе. Для этого необходимо пересчитать перемещение якоря x в $h - x$, для передачи измененного x в $P(i, x)$. Блок вычитания $h - x$ выполняет эту функцию.

Результаты расчетов для перемещения и скорости якоря для двух случаев — постоянного тока 9600 А и прямоугольного импульса тока с амплитудой 9600 А, периодом $T = 5$ с, заполнением импульса 50 % — приведены на рис. 4.2. По диаграммам виден затухающий колебательный режим, стремящийся к уровню смещения $x = 0,008$ м = 8 мм. Как видно из рис. 4.2, управления приводом с периодом 5 с и заполнением 50 % достаточно для четкого перемещения якоря из состояния покоя до установившегося и обратно. Это в конечном счете определяет быстродействие привода. Если уменьшить период до $T = 1$ с и провести моделирование (рис. 4.3), то по диаграммам становится видно, что не успевает привод дойти до установившегося значения $x = 0,008$ м = 8 мм, как происходят процессы переключения в обратном направлении.

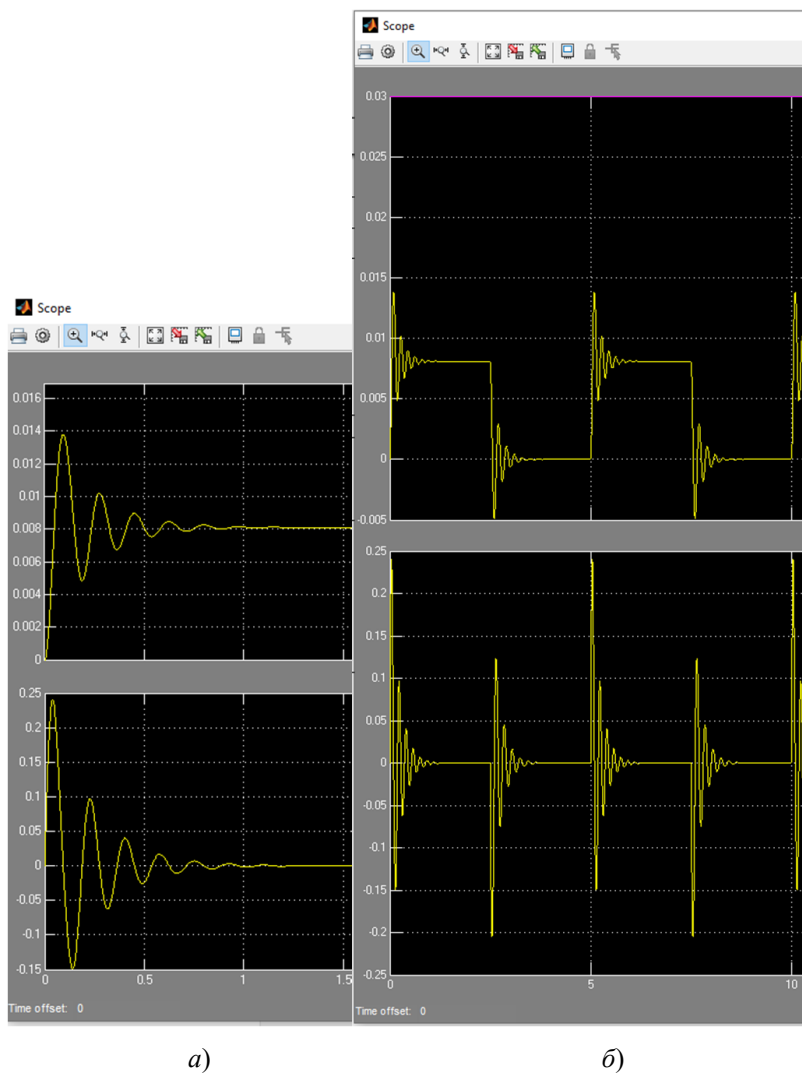


Рис. 4.2. Диаграммы перемещения и скорости: *a* – для постоянного тока 9600 А; *б* – для прямоугольного импульса тока с амплитудой 9600 А, периодом $T = 5$ с, заполнением импульса 50 %



Рис. 4.3. Диаграммы перемещения и скорости для прямоугольного импульса тока с амплитудой 9600 А, периодом $T = 1$ с, заполнением импульса 50 %

Исследование процесса с использованием математической модели

1. Собрать систему для моделирования магнитного привода по рис. 4.1.
2. Задать на расчет (моделирование) параметры в соответствии с табл. 4.1:
 - постоянного тока I_1 ;
 - прямоугольного импульса тока с амплитудой I_2 , периодом T_2 , заполнением импульса m_2 .

Форма отчета

Результаты моделирования оформить в отчет в виде экранных копий по пунктам:

- таблицы, аналогично рис. 3.4 для $P(i, x)$ расчетной схемы;
- диаграммы перемещения, скорости якоря и тока в обмотке в обоих режимах.

Указать данные на расчет из табл. 4.1.

Предоставить файл Simulink задачи с моделью.

Таблица 4.1

Источники тока на моделирование

Вариант	Амплитуда тока, А	Амплитуда тока, А	Период, с	Заполнение периода, %
	I_1	I_2	T_2	m_2
А – Б	6000	6000	1	5
В – Д	7000	7000	2	10
Е – З	8000	8000	5	20
И – К	9000	9000	1	50
Л – Н	6000	6000	2	5
О – Р	7000	7000	5	10
С – У	8000	8000	1	20
Ф	9000	9000	2	50
Х	6000	6000	5	5
Ц	7000	7000	1	10
Ч	8000	8000	2	20
Ш – Щ	9000	9000	5	50
Э – Я	5000	5000	2	10

Выводы

Отчет должен содержать выводы по работе в виде заключения с описанием результатов и последующим их анализом.

Рекомендуемая литература

1. ELCUT : Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов : Версия 6.6 : Руководство пользователя. — Санкт-Петербург : Тор, 2023. — 290 с. — URL: elcut.ru/downloads/manual_r.pdf (дата обращения: 14.09.2023). — ISBN 978-5-0060-6583-3.
2. Мамонтов, Д. В. [Лабораторные работы № 1–4] // ELCUT : Новый подход к моделированию полей : [сайт]. — URL: elcut.ru/publications/mamontov.pdf (дата обращения: 11.02.2025).

Содержание

Введение	3
Лабораторная работа 1. Моделирование механической системы линейного привода (Simulink)	5
Лабораторная работа 2. Моделирование электромагнитной системы линейного привода (ELCUT)	25
Лабораторная работа 3. Создание модели основных характеристик электромагнитного линейного привода в Simulink	42
Лабораторная работа 4. Создание электромеханической модели электромагнитного линейного привода в Simulink	46
Рекомендуемая литература	52

Учебное издание

Позднов Максим Владимирович

ГИБКИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ

Лабораторный практикум

Редактор О.П. Корабельникова

Технический редактор Н.П. Крюкова

Компьютерная верстка: Л.В. Сызганцева

Дизайн обложки: И.И. Шишкина

*При оформлении пособия использована
иллюстрация от pikisuperstar на сайте ru.freepik.com*

Подписано в печать 20.03.2025. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 3,13.

Тираж 100 экз. Заказ № 1-11-23.

Издательство Тольяттинского государственного университета

445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,

тел. 8 (8482) 44-91-47, www.tltsu.ru