

УДК 004.942

ВИРТУАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД «УПРАВЛЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА» КАК ИНСТРУМЕНТ ПРАКТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ КОРАБЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИОвчаренко Е.А.¹, студент гр. 521223, IV курс,Корзников М.Э.¹, студент гр. 521223, IV курсНаучный руководитель: Коновалова А.И.¹, старший преподаватель кафедры
судовой электроэнергетики и автоматики¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
Институт судостроения и морской арктической техники (Севмашвтуз)
филиала САФУ в г. Северодвинске
г. Северодвинск

В современное время кораблестроение и судостроение стремительно развиваются. Внедряются новые технологии, оборудование и системы. Новые образцы морской техники сочетают в себе огромное количество электрического оборудования, большую часть которого составляют электрические двигатели, играющие роль привода для различных устройств и механизмов.

Поэтому вопрос подготовки высококвалифицированных специалистов в области корабельной электроэнергетики остается актуальным. Для этого, кроме теоретических, необходимы практические занятия. Существующая лабораторная база имеет свойство устаревать как физически, так и морально. Также лабораторные стенды не позволяют студентам высших технических учебных заведений получать практические навыки и знания вне стен образовательной организации.

Исходя из этого, остро встает вопрос о создании виртуальных лабораторных стендов, работа на которых будет возможна только лишь при наличии компьютерной техники. Создание таких стендов позволит обучающимся вузов самостоятельно углублять свои знания, а также проводить исследования.

В настоящее время в судовых и корабельных электроэнергетических системах активно применяют потребители постоянного тока, в том числе, и электрические двигатели.

Несмотря на большое многообразие существующих электрических двигателей, в корабельных электроприводах используются электродвигатели как переменного, так и постоянного тока. Для привода судовых механизмов широко используют двигатели постоянного тока, мощность которых достигает до 200 кВт [1]. Электропривод постоянного тока традиционно применяется в рулевых машинах, якорно-швартовых устройствах, системах динамического позиционирования и гребных электрических установках.

Поэтому создание виртуального лабораторного стенда «Управление двигателем постоянного тока» является актуальным вопросом. Это позволит обучающимся самостоятельно, независимо от нахождения в лаборатории, изучать характеристики двигателя постоянного тока, принцип его работы, причинно-следственные связи, влияющие на режимы работы электрической машины. Виртуальные лабораторные стенды выступают эффективным инструментом компенсации дефицита физического лабораторного оборудования.

Разработка виртуального стенда «Управление двигателем постоянного тока» велась в среде моделирования Matlab Simulink. Данное программное обеспечение является довольно распространенным инструментом разработки, а также визуализации научных исследований.

Структурная схема виртуального стенда представлена на рисунке 1.

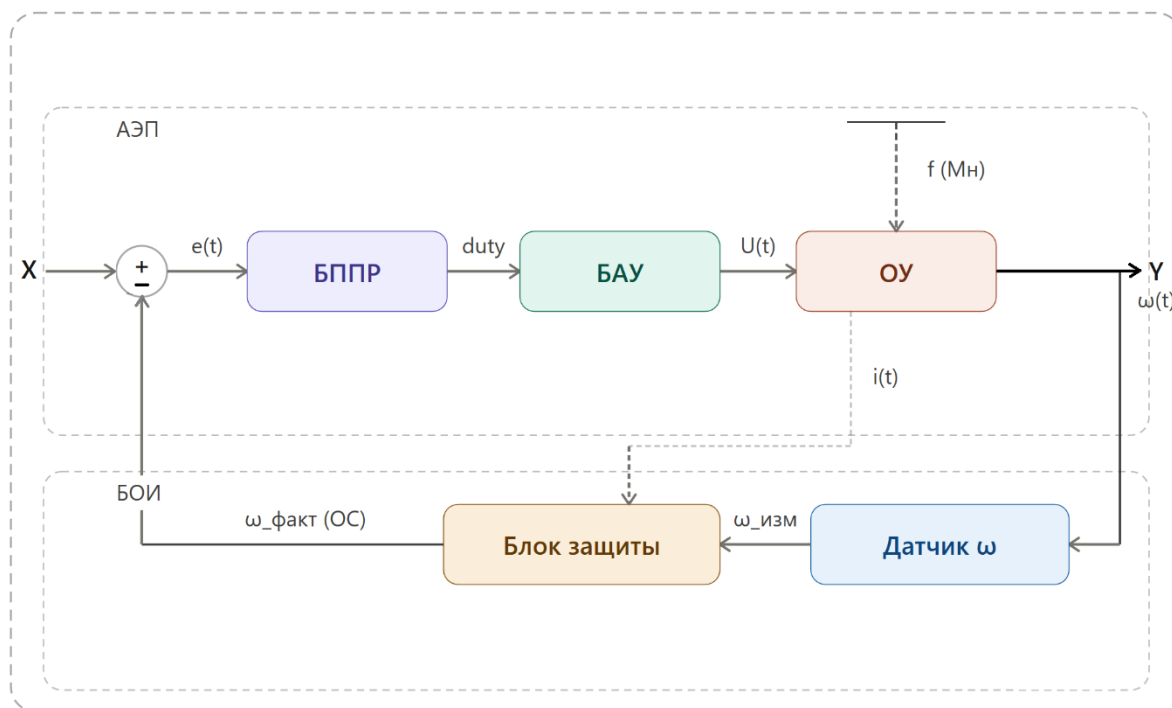


Рис. 1. Структурная схема виртуального лабораторного стенда

Блок построения программы регулирования (БППР) отвечает за реализацию закона управления, по ошибке $e(t)$ вычисляет желаемый коэффициент заполнения ШИМ ($duty$). Блок автоматического управления (БАУ) включает в себя элементы силовой электроники – ШИМ-модулятор и H-мост, а также преобразует сигнал от БППР в напряжение на якоре двигателя $U(t)$. Объектом управления (ОУ) выступает двигатель постоянного тока. Внешнее возмущение представляет собой момент нагрузки на валу M_n . Датчик скорости (ω) измеряет угловую скорость ротора. Блок защиты выполняет роль ограничителя тока якоря и момента нагрузки. Через блок обработки информации (БОИ) сигнал обратной связи поступает на сумматор.

Первым этапом в разработке стенда стало создание его математической модели, которая представлена на рисунке 2.

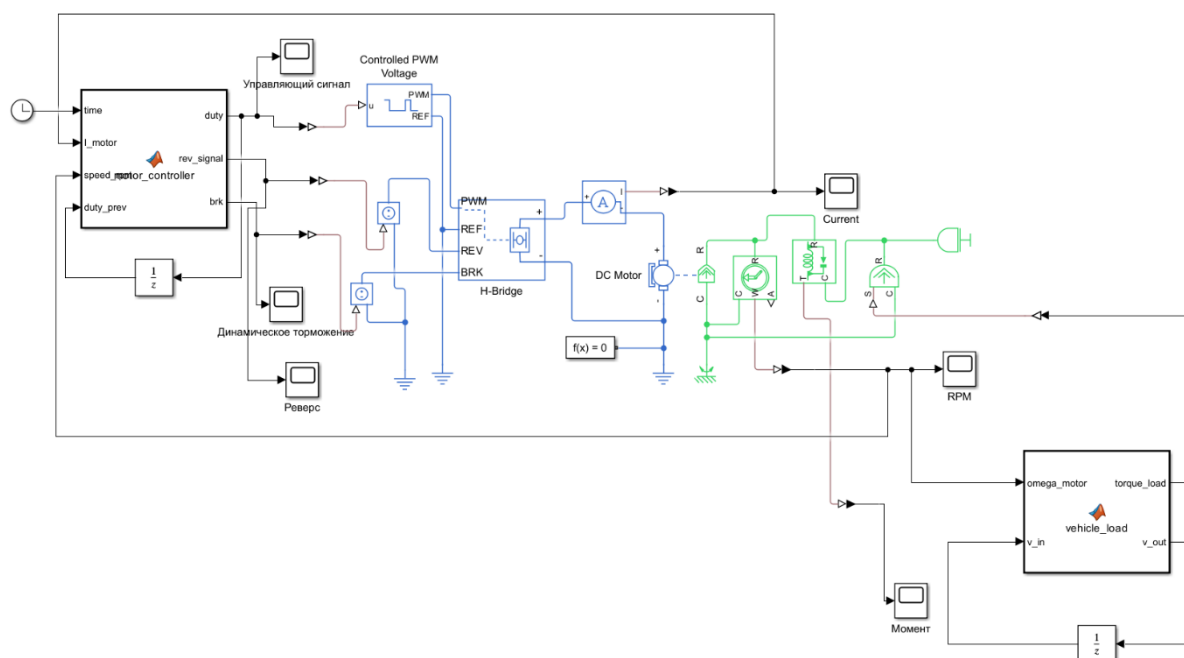


Рис. 2. Математическая модель виртуального стенда «Управление двигателем постоянного тока», созданная в среде Matlab Simulink

Программируемый блок, в котором написан алгоритм управления (ПИД-регулятор) реализован за счет элемента Function. Блок, преобразующий входной числовой сигнал в последовательность ШИМ-импульсов, представляет собой элемент Controlled PWM Voltage. Визуализация графиков переходных процессов достигается путем получения осциллограмм в блоках Scope. Силовой каскад, который позволяет менять полярность напряжения на двигателе для осуществления реверса и управлять его скоростью через широтно-импульсную модуляцию, реализован через блок H-Bridge. В качестве измерительной аппаратуры используется блок Current Sensor, который определяет ток в цепи двигателя. В качестве модели двигателя постоянного тока применяется блок DC Motor. Роль точки жесткой фиксации, относительно которой измеряется вращение вала, играет блок Mechanical Rotational Reference. В качестве датчика, который измеряет угловую скорость и угол поворота вала двигателя, используется блок Ideal Rotational Motion Sensor. Механическую нагрузки имитирует блок Vehicle Load. Роль элемента, задающего параметры численного метода решения дифференциальных уравнений всей физической системы, выполняет блок Solver Configuration. Идеальным измерителем крутящего момента, преобразующим механическую энергию вращения в физический сигнал, в данной модели является блок Ideal Torque Sensor. В качестве вращающегося тела с заданной массой (моментом инерции) применяется фундаментальный блок для моделирования динамики Inertia.

Для того, чтобы использование лабораторного стенда было независимым от дополнительного программного обеспечения, было принято решение разработать именно браузерную версию виртуального стенда.

Интерфейс стенда разделен на две функциональные зоны: панель управления (левая часть) и область графиков (правая часть); он представлен на рисунке 3.

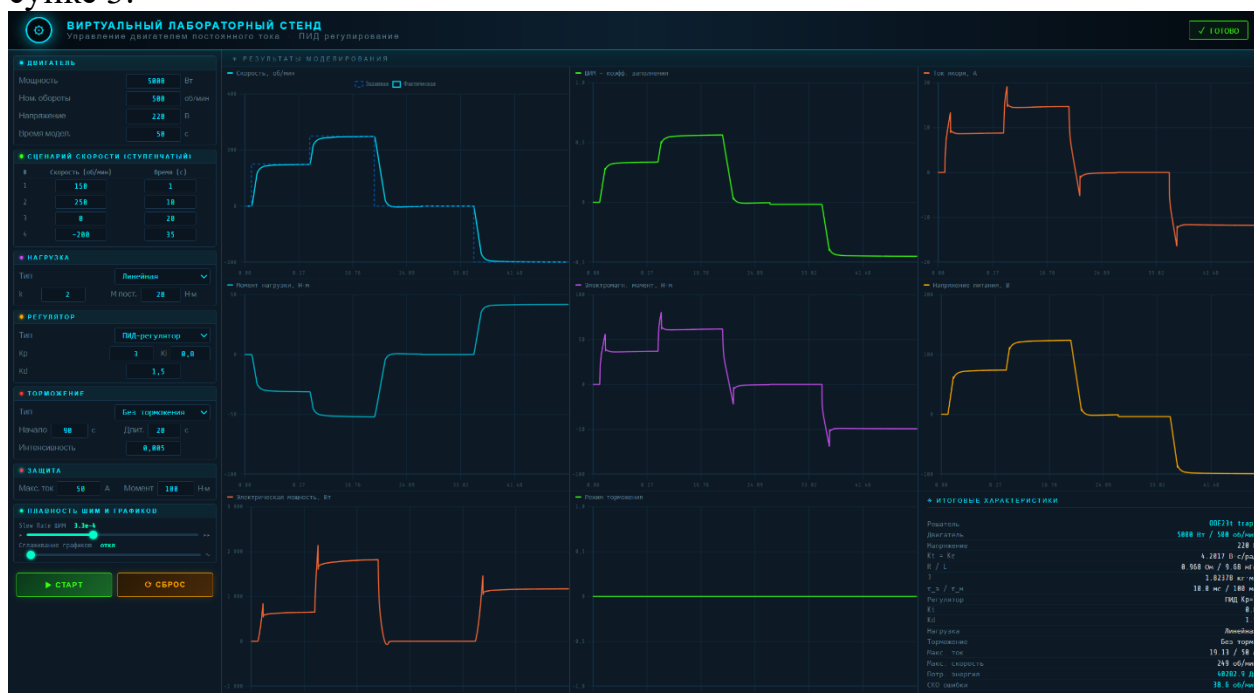


Рис. 3. Интерфейс разработанного виртуального стенда

Панель управления содержит семь секций настройки эксперимента: «Двигатель», «Сценарий скорости (ступенчатый)», «Нагрузка», «Регулятор», «Торможение», «Защита», «Плавность ШИМ и графиков» (рисунок 4).

• ДВИГАТЕЛЬ

Мощность Вт

Ном. обороты об/мин

Напряжение В

Время модел. с

• СЦЕНАРИЙ СКОРОСТИ (СТУПЕНЧАТЫЙ)

#	Скорость (об/мин)	Время (с)
1	150	1
2	250	10
3	0	20
4	-200	35

• НАГРУЗКА

Тип

k М пост. Нм

• РЕГУЛЯТОР

Тип

Kp Ki

Kd

• ТОРМОЖЕНИЕ

Тип

Начало с Длит. с

Интенсивность

• ЗАЩИТА

Макс. ток А Момент Нм

• ПЛАВНОСТЬ ШИМ И ГРАФИКОВ

Slew Rate ШИМ

Сглаживание графиков

Рис. 4. Панель управления виртуальным стендом

В секции «Двигатель» указываются паспортные данные двигателя постоянного тока: мощность (Вт), номинальные обороты (об/мин), напряжение (В). Также здесь указывается время моделирования (в секундах).

Скорость (об/мин) и момент времени (с), в который эта скорость достигается, задаются в секции «Сценарий скорости (ступенчатый)».

Секция «Нагрузка» включает в себя следующие параметры: тип нагрузки (линейная, постоянная, квадратичная, импульсная, ступенчатая, без нагрузки), коэффициент k – влияющий на величину момента, а также постоянный момент (М пост), который задается при постоянной нагрузке.

В секции «Регулятор» задается тип (П-, ПИ- или ПИД-регулятор), пропорциональный коэффициент k_p , интегральный коэффициент k_i , дифференциальный коэффициент k_d .

Параметры торможения задаются в одноименной секции, а именно: тип (динамическое, рекуперативное, комбинированное, без торможения), время начала и длительности (в секундах), интенсивность торможения.

В секции «Защита» устанавливаются максимальный ток в цепи двигателя (А), а также максимальный момент (Н·м).

Секция «Плавность ШИМ и графиков» позволяет регулировать скорость нарастания ШИМ-сигнала, а также визуализацию полученных в результате моделирования графиков характеристик.

Результаты моделирования представляют собой графики характеристик: скорость (об/мин), коэффициент заполнения ШИМ, ток якоря (А), момент нагрузки (Н·м), электромагнитный момент (Н·м), напряжение питания (В), электрическая мощность (Вт), режим торможения. А также в отдельном окне выведены итоговые характеристики. Данная часть браузерной версии виртуального стенда представлена на рисунке 5.



Рис. 5. Результаты моделирования

График скорости (об/мин) отображает заданную (пунктиром) и фактическую (сплошной линией) частоты вращения якоря. По форме переходного процесса можно оценить время разгона, наличие перерегулирования и статическую ошибку.

График ШИМ (коэффициент заполнения) показывает управляющий сигнал регулятора в диапазоне $[-1; +1]$. Значение $+1$ соответствует полному напряжению питания в прямом направлении, -1 – в обратном.

График тока якоря (А) критически важен для оценки нагрева и защиты обмотки. Пиковые броски тока при пуске и реверсе ограничиваются параметром «Максимальный ток».

Момент нагрузки ($H \cdot m$) отражает реактивный момент, противодействующий вращению. Вид кривой определяется выбранным типом нагрузки: линейная зависимость от скорости моделирует вязкое трение, квадратичная – гидродинамическое сопротивление гребного винта, импульсная – периодические ударные нагрузки.

Электромагнитный момент ($H \cdot m$) является первичным источником движущего момента. В установившемся режиме электромагнитный момент уравновешивает момент нагрузки и вязкое трение.

Напряжение питания (V) воспроизводит выходное напряжение инвертора. При торможении рекуперативного типа напряжение принимает отрицательные значения, что соответствует возврату энергии в источник.

Электрическая мощность ($Вт$): положительные значения соответствуют потреблению энергии двигателем, отрицательные — рекуперативному торможению с возвратом энергии. Площадь под кривой (численное интегрирование методом трапеций) дает потребленную за цикл энергию в Дж.

Режим торможения отображает активность и тип тормозного воздействия в дискретном формате: 0 – торможение не активно, 1 – динамическое, 2 – рекуперативное, 3 – комбинированное.

Таким образом, результатом работы стало создание браузерной версии виртуального лабораторного стенда «Управление двигателем постоянного тока». Данный стенд является важным инструментом для подготовки морских инженеров-электриков и при изучении таких дисциплин, как «Теоретические основы электротехники», «Электрические машины и аппараты» и «Электропривод и электродвижение судов». Стенд целесообразно применять как на учебных занятиях, так и в рамках самостоятельной работы студентов.

Список литературы:

1. Бурков, А.Ф. Судовые электроприводы: Учебник. – СПб.: Издательство «Лань», 2021. – 372 с.: ил. – (Учебники для вузов. Специальная литература).