



Нижегородский государственный технический университет
им. Р. Е. Алексеева

Образовательно-научный институт электроэнергетики
Кафедра «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника»



РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВКОЙ НА ОСНОВЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Липужин Иван Алексеевич к.т.н., доцент, с.н.с. НИЛ АГЭК
Шувалова Юлия Николаевна, магистрант 1 года обучения, ИНЭЛ



Актуальность

- ✓ Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации
- ✓ Энергетическая стратегия Российской Федерации до 2035 г.
- ✓ План «Развития водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 г.»
- ✓ Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации



Расширение использования водорода.



Источник: IC EnergyNet

Объединение нескольких ТЭ на параллельную работу позволяет:

- использовать преимущества одиночных установок (высокая эффективность (до 70%), модульность и стационарность и т.д.);
- снизить влияние негативных факторов (недостаточно большой срок службы (50 тыс.ч), низкая эффективность при малых нагрузках (до 30%)).

Требуется создание интеллектуальных систем управления (СУ), учитывающих особенности ТЭ.

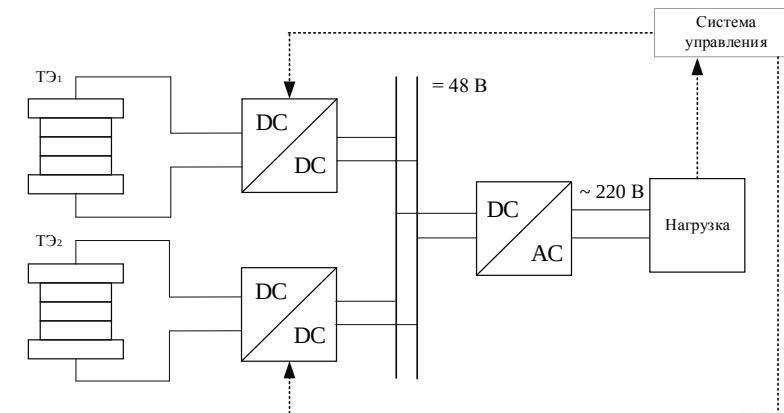


Рис. 1. Схема энергоустановки



Цель и задачи

Объект исследования - энергоустановка с двумя одинаковыми ТЭ с полимерной протонообменной мембраной (ПОМТЭ) номинальной мощностью 1 кВт.

Цель – разработка и исследование алгоритма системы управления, который обеспечивает наибольшую энергетическую эффективность работы энергоустановки.

Задачи:

- разработка математической модели работы энергоустановки;
- исследование различных сценариев работы энергоустановки;
- исследование влияния параметров ТЭ на работу энергоустановки;
- разработка алгоритмов управления для энергоустановок, состоящих из двух одинаковых ПОМТЭ;
- разработка имитационной модели энергоустановки;
- исследование эффективности разработанных алгоритмов в *Simulink*-модели.



Разработка математической модели

1. Проведения экспериментальных исследований на лабораторном стенде для получения исходных данных для расчета – ВАХ и расхода водорода.

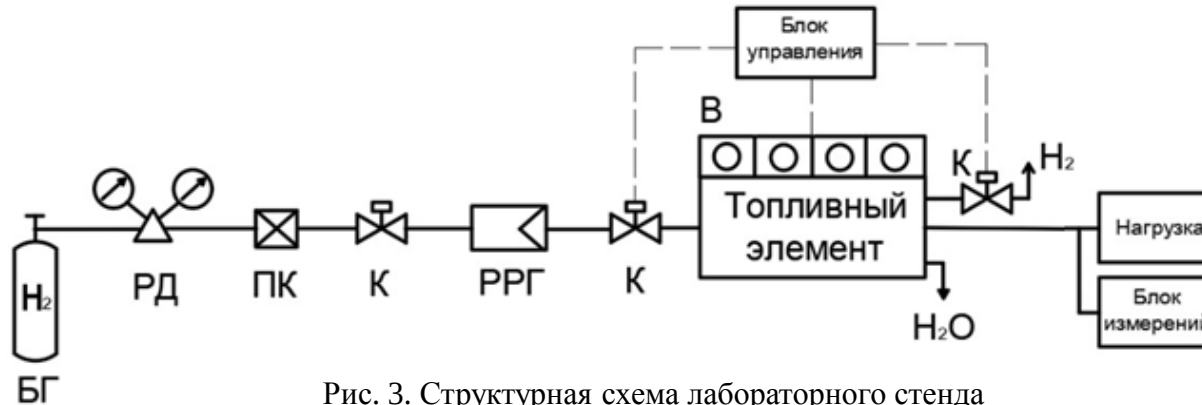


Рис. 3. Структурная схема лабораторного стенда

Таблица 1 – Технические параметры лабораторного стенда

Параметр	Значение
Тип газа	H ₂ (99,99 %)
Объем газового баллона	40 л
Давление в газовом баллоне	5 бар
Давление на входе ТЭ	0,6-0,8 бар
Расход водорода	12 л/мин.
Напряжение питания собственных нужд	24 В
Номинальная мощность вентиляторов ТЭ	4×100 Вт
Номинальное напряжение ТЭ	57 В
Выходная мощность ТЭ	1 кВт

БГ – газовый баллон с водородом
РД – регулятор давления
ПК – предохранительный клапан
К – электромагнитные клапаны
В – вентиляторы
РРГ – регулятор расхода газа

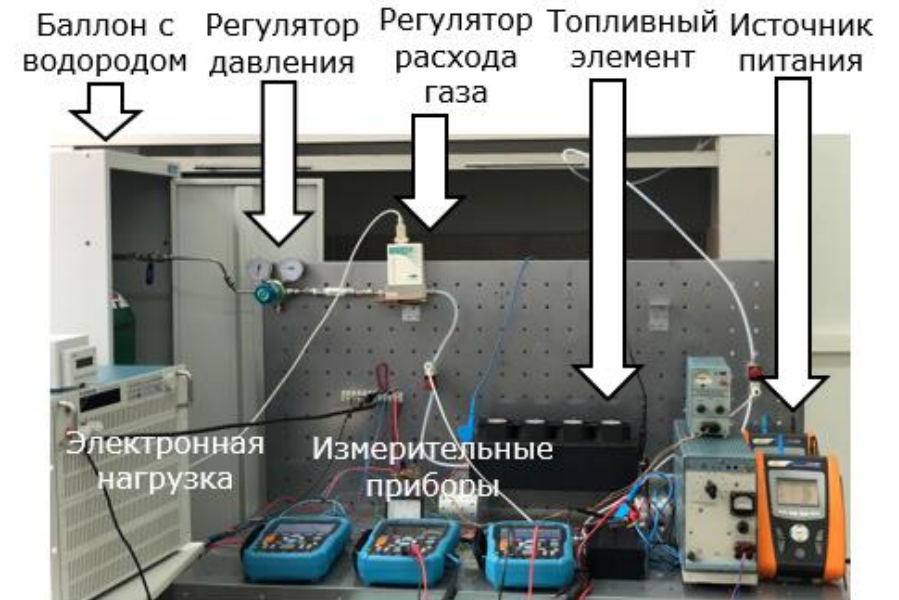


Рис. 2. Внешний вид лабораторного стенда



Разработка математической модели

2. Проведение расчетов на основе экспериментально полученных данных. Расчет КПД энергоустановки

- Определение количества потребленного водорода с помощью уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$n_i = (P \cdot V) / (R \cdot T),$$

где n_i – количество вещества в моль; P – давление; V - объем использованного водорода; R - газовая постоянная; T - температура.

- Определение суммарной энергии, которая была запасена в поступившем на входе каждого ТЭ водороде:

$$Q = \sum_{i=1}^k (n_i \cdot 286),$$

где k – количество ТЭ.

- Определение выработанной электроэнергии:

$$W = \sum_{i=1}^k (U_{iTЭ} \cdot I_{iTЭ} \cdot \Delta t \cdot 3600) / 60,$$

где $P_{iTЭ} = U_{iTЭ} \cdot I_{iTЭ}$ – мощность на выходе отдельного ТЭ; Δt - интервал времени в минутах, за который определялась выработка электроэнергии; k – количество ТЭ.

- Расчет КПД мультистека:

$$\eta_{TЭ} = W / Q$$



Разработка алгоритма управления энергоустановкой, состоящих из двух одинаковых ПОМТЭ №1

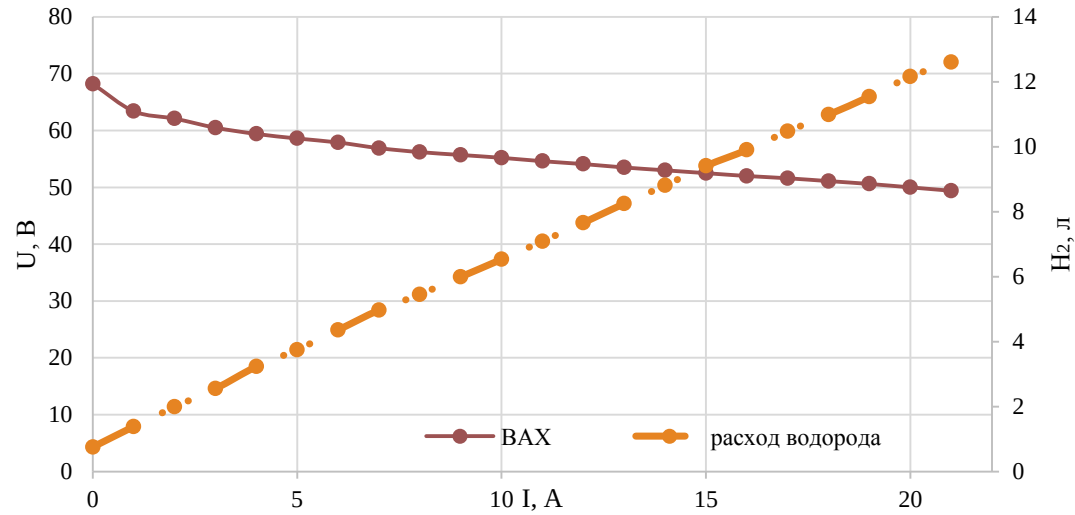


Рис. 4. BAX и расход водорода ПОМТЭ №1

Таблица 2– результаты математического моделирования (частично) для мультистека

Загрузка ТЭ, Вт		Суммарный расход водорода, л
№1	№2	
P _{нагр} = 500 Вт		
500	0	7,26
250	250	7,6
P _{нагр} = 1000 Вт		
1000	0	12,95
500	500	13,15
P _{нагр} = 1500 Вт		
1000	500	18,84
750	750	18,74
P _{нагр} = 1900 Вт		
1000	900	23,36
950	950	23,362

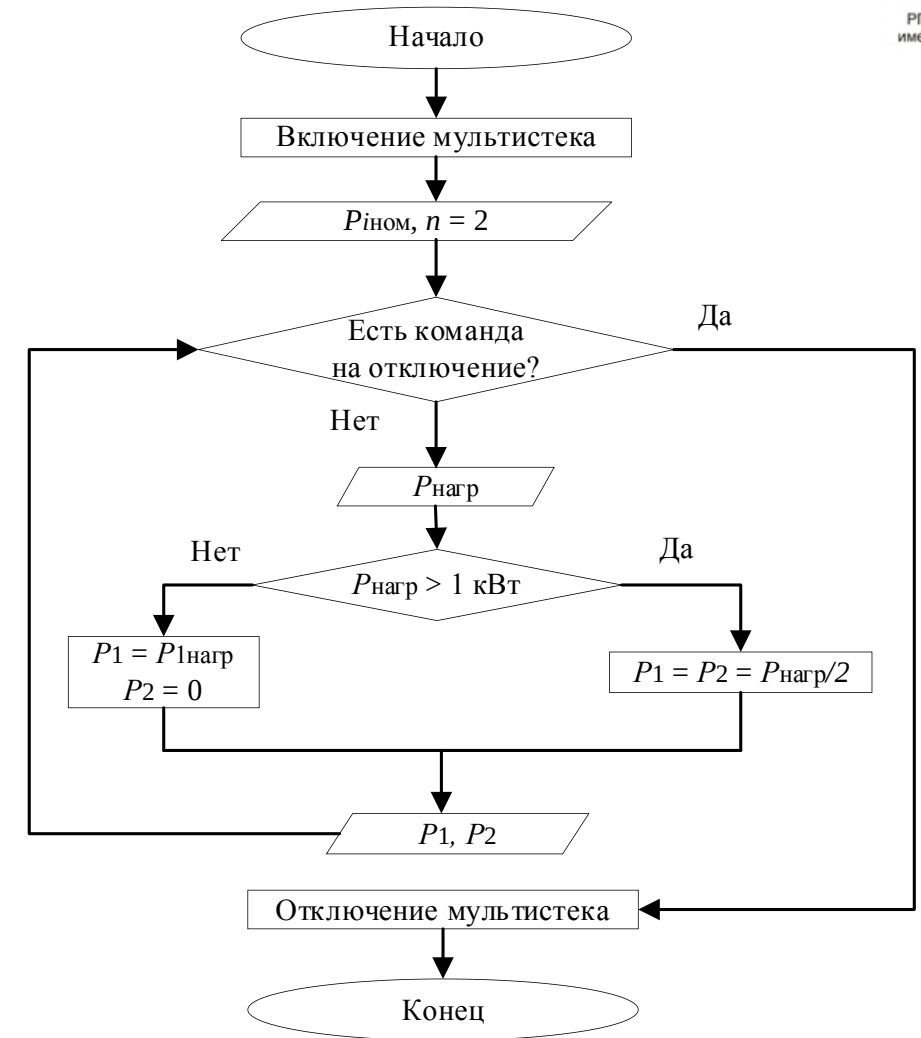


Рис. 5. Блок-схема алгоритма работы мультистека: $P_{iном}$ – номинальная мощность i -го ТЭ; n – количество ТЭ; $P_{нагр}$ – мощность нагрузки; P_1 – фактическая загрузка 1-го ТЭ; P_2 – фактическая загрузка 2-го ТЭ



Simulink-модель энергоустановки №1

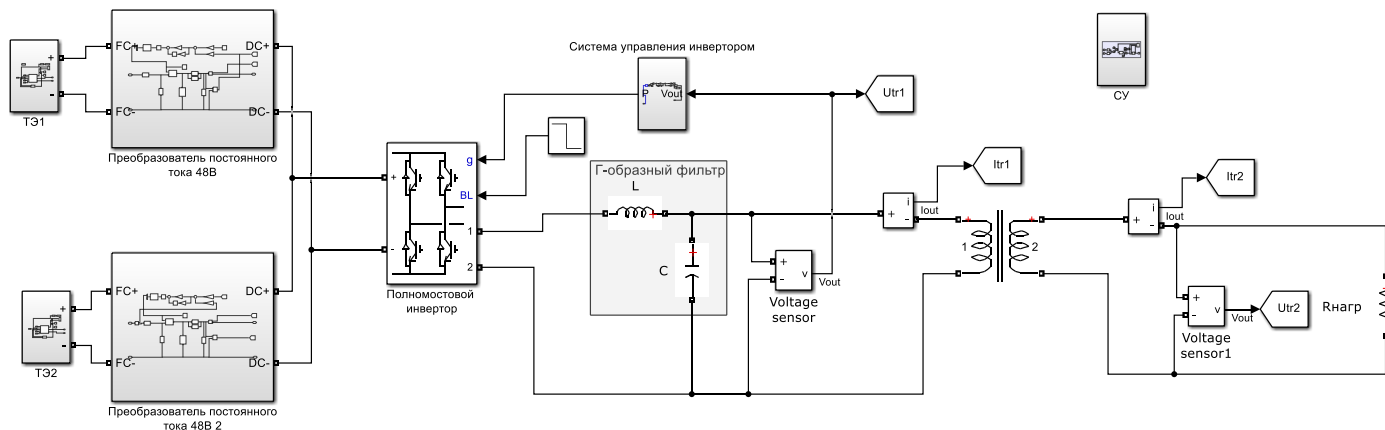


Рис. 6. Simulink-модель мультистека

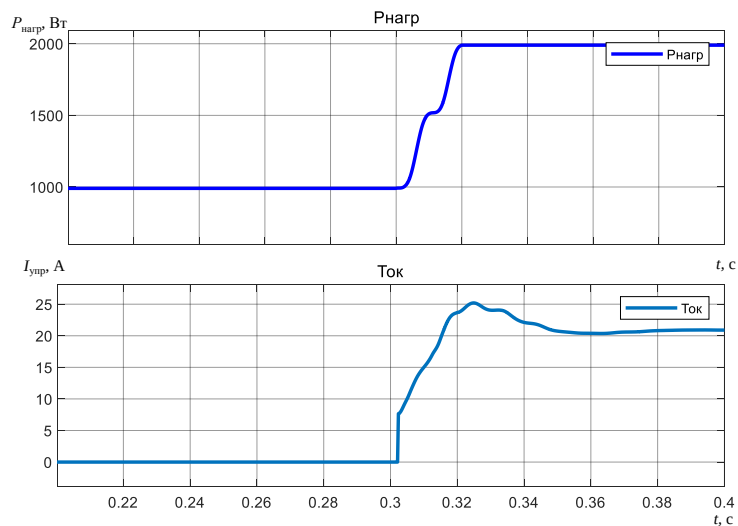


Рис. 7. Сигнал управления, подаваемый на преобразователи постоянного тока ТЭ: $P_{\text{нагр}}$ – мощность нагрузки; $I_{\text{упр}}$ – сила тока, подаваемая на преобразователь постоянного тока второго ТЭ

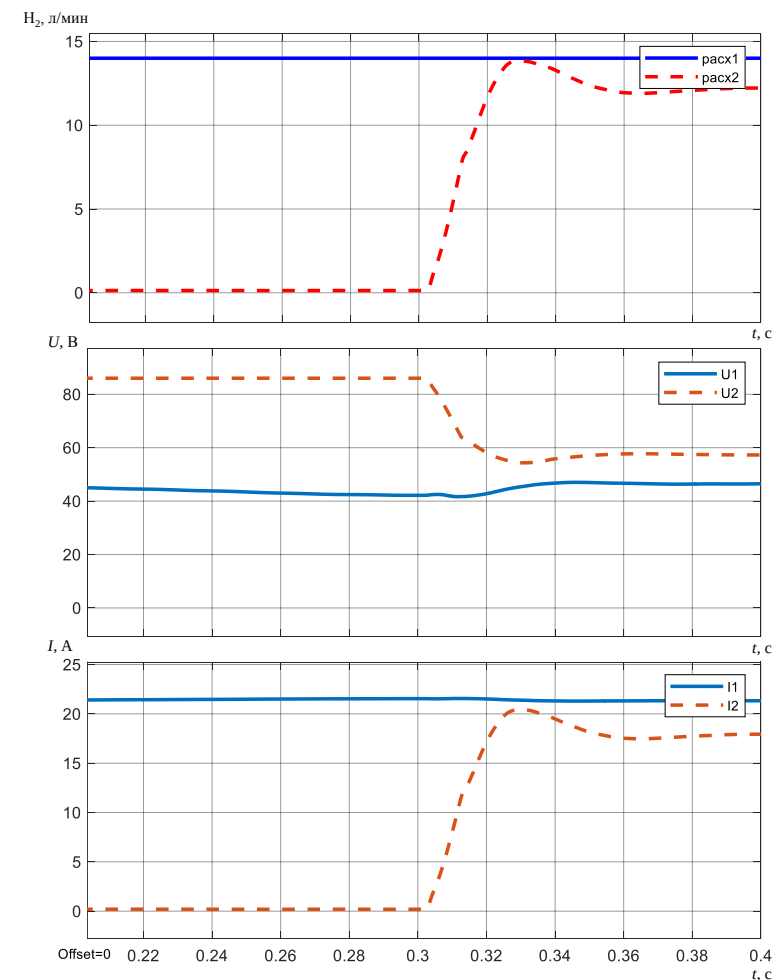


Рис. 8. Выходные напряжения и токи ТЭ при изменении мощности нагрузки с 1000 Вт до 2000 Вт: а) – при использовании алгоритма минимизации расхода водорода; б) – при использовании алгоритма продления срока эксплуатации; U_1 , U_2 – напряжение на выходе первого и второго ТЭ; I_1 , I_2 – сила тока на выходе первого и второго ТЭ



Разработка алгоритма управления энергоустановкой, состоящих из двух одинаковых ПОМТЭ №2

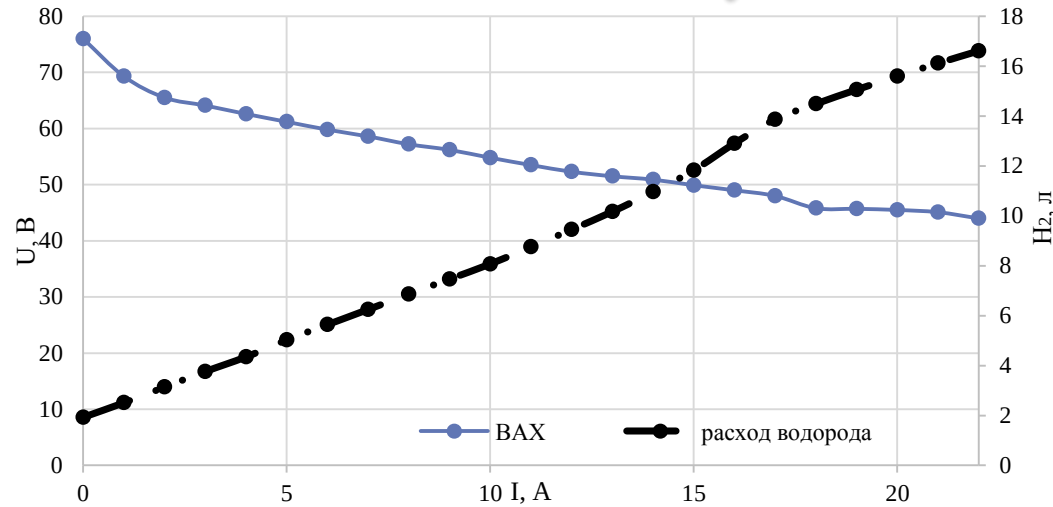


Рис. 9. BAX и расход водорода ПОМТЭ №2

Таблица 3— результаты математического моделирования (частично) для мультистека

Загрузка ТЭ, Вт		Суммарный расход водорода, л
№1	№2	
Р _{нагр} = 500 Вт		
500	0	9,41
250	250	8,47
Р _{нагр} = 1000 Вт		
1000	0	19,25
500	500	14,87
Р _{нагр} = 1500 Вт		
1000	500	24,72
750	750	23,26
Р _{нагр} = 1900 Вт		
1000	900	32,18
950	950	32,12

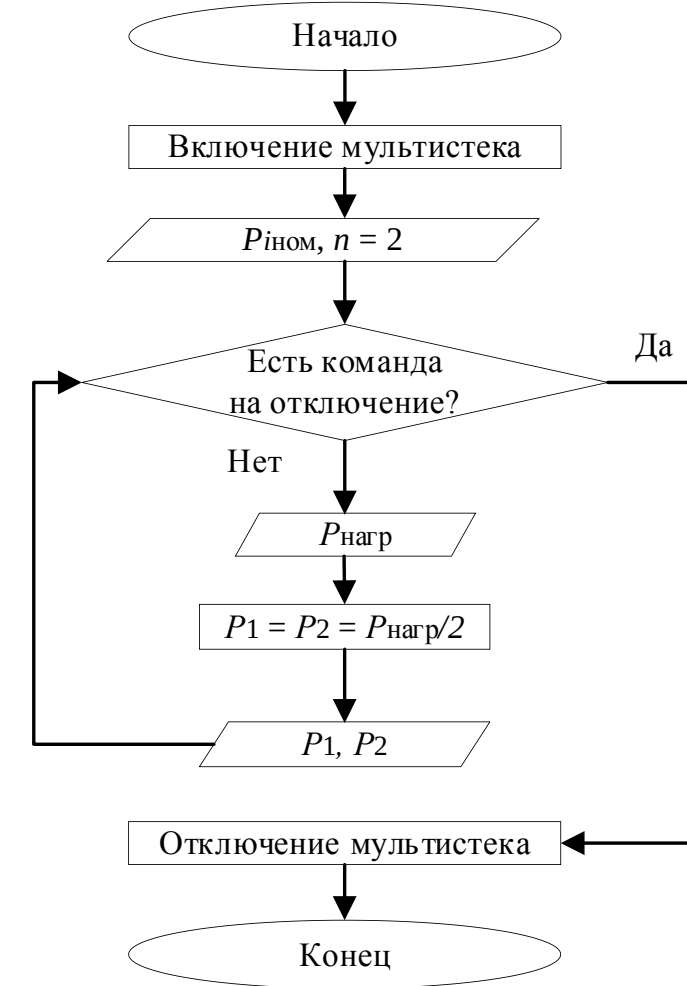


Рис. 10. Блок-схема алгоритма работы мультистека: $P_{ином}$ – номинальная мощность i -го ТЭ; n – количество ТЭ; $P_{нагр}$ – мощность нагрузки; P_1 – фактическая загрузка 1-го ТЭ; P_2 – фактическая загрузка 2-го ТЭ



Simulink-модель энергоустановки №2

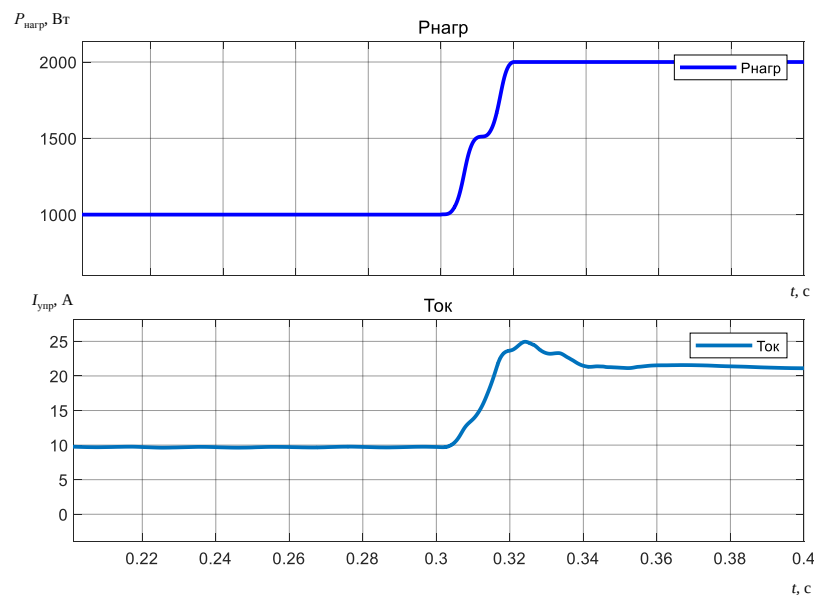


Рис. 12. Сигнал управления, подаваемый на преобразователи постоянного тока ТЭ: $P_{\text{нагр}}$ – мощность нагрузки; $I_{\text{упр}}$ – сила тока, подаваемая на преобразователь постоянного тока второго ТЭ

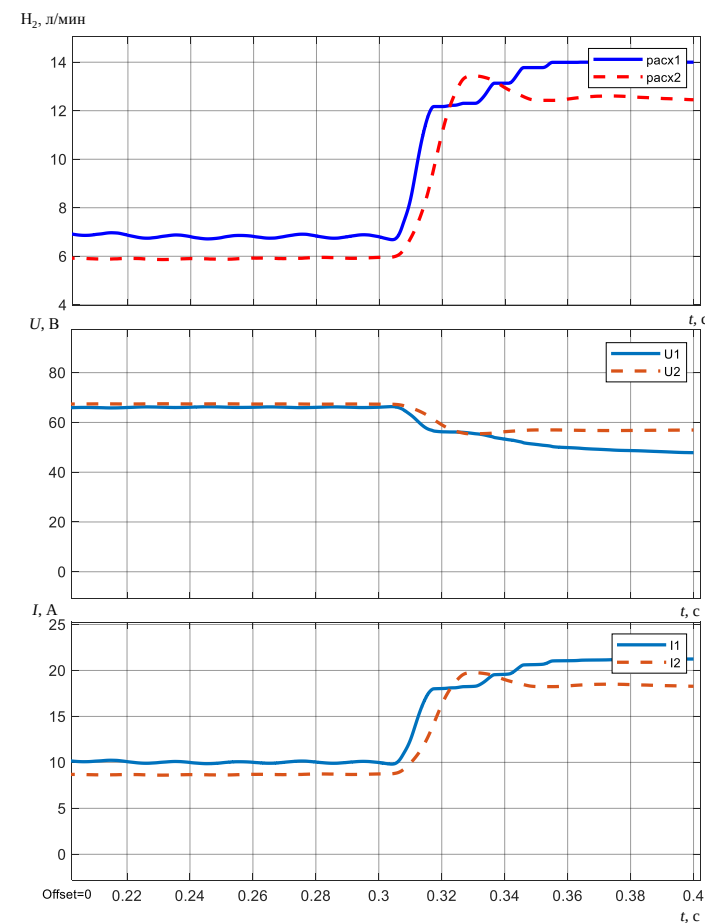


Рис. 13. Выходные напряжения и токи ТЭ при изменении мощности нагрузки с 1000 Вт до 2000 Вт: а) – при использовании алгоритма минимизации расхода водорода; б) – при использовании алгоритма продления срока эксплуатации; U_1 , U_2 – напряжение на выходе первого и второго ТЭ; I_1 , I_2 – сила тока на выходе первого и второго ТЭ



Заключение

- Разработана математическая модель работы энергоустановки.
- Исследовано влияние электрических характеристик ТЭ на работу энергоустановки. **Алгоритм работы энергоустановки, обеспечивающий наибольшую эффективность зависит от характеристик ТЭ.**
- Разработаны алгоритмы управления для двух мультитеков, которые состоят из двух одинаковых ПОМТЭ с одинаковыми характеристиками.
- Для отработки алгоритмов управления разработана имитационная компьютерная модель мультитека в программе *Matlab R2020b/Simulink*.
- Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование *Simulink*-модели мультитека, переход от адаптивного управления к нейроуправлению и тестировании разработанных алгоритмов на лабораторном стенде.

Исследование выполнено в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2022-0005).



Спасибо за внимание!

Шувалова Юлия Николаевна, магистрант 1-го года обучения

e-mail: yulia.shuvalova2017@yandex.ru

тел.: 8 (999) 077-16-48