

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ

Д.И. Денисов

den.denicov.vip@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Двигатели Стирлинга служат альтернативой двигателям внутреннего сгорания в случаях, когда необходимы утилизация подводимой от внешнего источника теплоты (в частности, солнечной энергии) и обеспечение длительной работы без обслуживания. Объектом исследования являлся свободнопоршневой двигатель Стирлинга, нагрузкой которого служит электрогенератор. Исследована система автоматического регулирования частоты генерируемого тока электрогенератором с двигателем Стирлинга. С использованием программного комплекса SimInTech рассчитан переходный процесс наброса полной нагрузки на электрогенератор. Определены оптимальные значения коэффициентов пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-закона регулирования, обеспечивающие требования ГОСТ Р 55231–2012 к предельным значениям продолжительности переходного процесса и перерегулирования.

Ключевые слова: тепловой двигатель, двигатель с внешним подводом теплоты, двигатель Стирлинга, электрогенератор, система регулирования, ПИД-регулятор

Введение. Тепловые двигатели — это основной тип теплоэнергетических установок мировой и отечественной энергетики, они преобразуют тепловую энергию в механическую работу [1, 2]. При этом в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) утилизируется теплота сгорания топлива, подаваемого в цилиндры. Альтернативой ДВС являются двигатели с внешним подводом теплоты (ДВПТ), или двигатели Стирлинга, в которых используется теплота от внешних источников энергии [3, 4].

Двигатели Стирлинга — перспективные и уникальные агрегаты, имеющие ряд преимуществ перед установками с ДВС. Основное преимущество таких двигателей — возможность использования широкого спектра энергоносителей (нефтяных и альтернативных топлив, солнечной энергии, теплоты от других типов энергетических установок). К другим преимуществам двигателей Стирлинга относятся высокая эффективность термодинамического цикла этих двигателей, их хорошие экологические качества, возможность производить электроэнергию на месте в необходимом объеме без использования единого центра и общей сети, низкая шумность работы и др. [5–7]. Область применения двигателей Стирлинга очень обширна — от космической техники до подводных лодок и когенерационных установок.

Исследования двигателя Стирлинга проводятся как за рубежом, так и в отечественных исследовательских организациях [8–10]. При этом важно корректно организовать регулирование параметров двигателей Стирлинга [11, 12]. Цель настоящей статьи — исследование двигателя с внешним подводом теплоты и его системы автоматического регулирования (САР).

Объект исследования. В качестве объекта исследования выбран электрогенератор, в котором в качестве первичного двигателя использован двигатель Стирлинга. Это свободнопоршневой двигатель Стирлинга типа SCA-5 мощностью 5 кВт. Он используется Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства (англ. *National Aeronautics and Space Administration*, сокр. NASA) для проведения научных исследований в области космического энергоснабжения. Преимущество этого двигателя космического назначения — рекордный ресурс непрерывной работы без обслуживания. Политика в области космических исследований США по программе SP-100 представлена в работах [8, 9]. Для энергоснабжения летательных аппаратов использован ядерный реактор с утилизацией отводимой теплоты в свободнопоршневом двигателе Стирлинга мощностью 30...40 кВт. Энергоустановка мощностью 25 кВт разработана в 1990-х годах по программе SP-100 (рис. 1). Эта установка состояла из двух двигателей мощностью 12,5 кВт, соединенных оппозитно горячими блоками для гашения вибраций. NASA начала новый проект по разработке двигателя Стирлинга мощностью 5 кВт, нагрузкой которого служит электрогенератор (рис. 2) [10]. Его технические характеристики представлены ниже.

Технические характеристики двигателя мощностью 5 кВт

Мощность (номинальная электрическая), кВт	5
Рабочее тело	Гелий
Давление (максимальное), МПа	15
Частота (резонансная), Гц	50
Ход поршня (номинальный), мм	22
Ход поршня (при перегрузке до 6кВт), мм	24
Ресурс, ч	44 000

Конструктивная схема этого двигателя показана на рис. 3. Этот образец представляет собой двигатель Стирлинга свободнопоршневого типа, где поршень и вытеснитель совершают движение в одном цилиндре вдоль одной оси без механической связи между ними. Рабочий поршень двигателя обеспечивает преобразование механической энергии, полученной от линейного движения, в электрическую энергию. За счет колебаний рабочего тела внутри цилиндра создается взаимное движение вытеснителя и рабочего поршня.

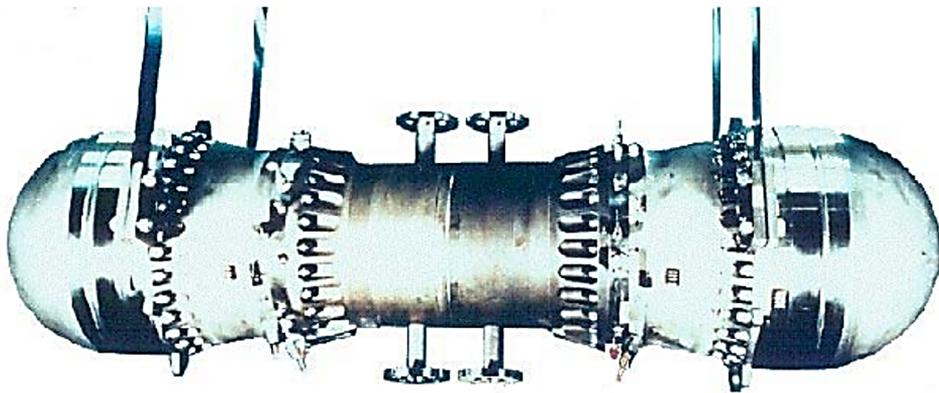


Рис. 1. Общий вид двигателя Стирлинга типа SPDE мощностью 25 кВт

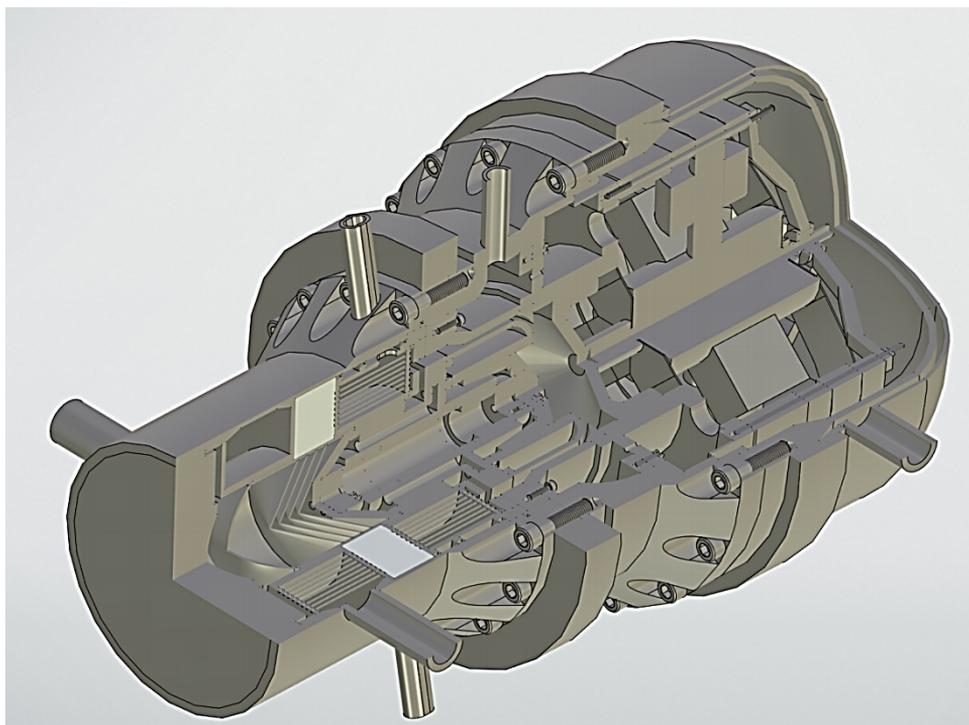


Рис. 2. Разрез двигателя Стирлинга мощностью 5 кВт

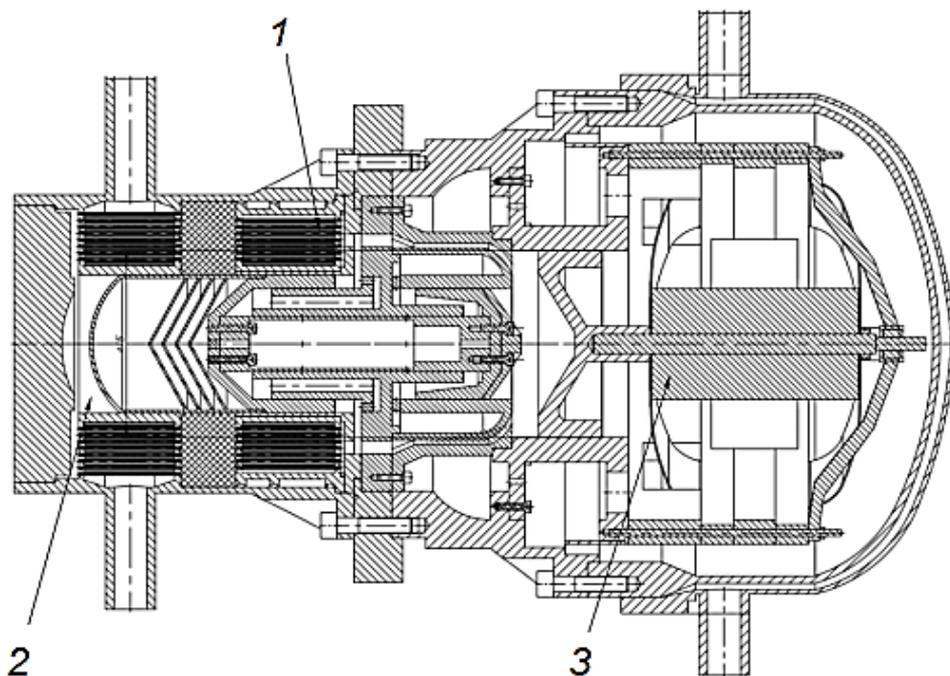


Рис. 3. Конструктивная схема двигателя Стирлинга мощностью 5 кВт:

1 — теплообменные трубки; 2 — объем вытеснения; 3 — линейный генератор

Горячий блок состоит из трех теплообменников: головки нагревателя, регенератора и охладителя. Головка нагревателя и охладитель конструктивно похожи и представляют собой кожухотрубные теплообменники, каждый из которых состоит из 1800 трубок малого диаметра (внутренний диаметр 0,89 мм, внешний 1,65 мм). Концы каждой трубы приварены к трубным доскам электронно-лучевой сваркой. Корпус нагревателя, корпус охладителя и трубы изготовлены из материала марки Inconel 718. Регенератор выполнен из пористой металлической матрицы с пористостью 80 % (плотность 20 %), припаянной к внутреннему и внешнему металлическому вкладышу. Матрица представляет собой спеченную структуру из металлических волокон диаметром 0,022 мм. Матрица изготовлена из нержавеющей стали марки 316; внутренний и внешний вкладыши — из материала марки Inconel 718. В качестве регулирующего устройства для разработанной САР используется электромагнитный клапан с малым проходным сечением. Клапан предполагается установить в канал, соединяющий полость сжатия с холодильником. На рис. 4 представлена схема двигателя с САР.

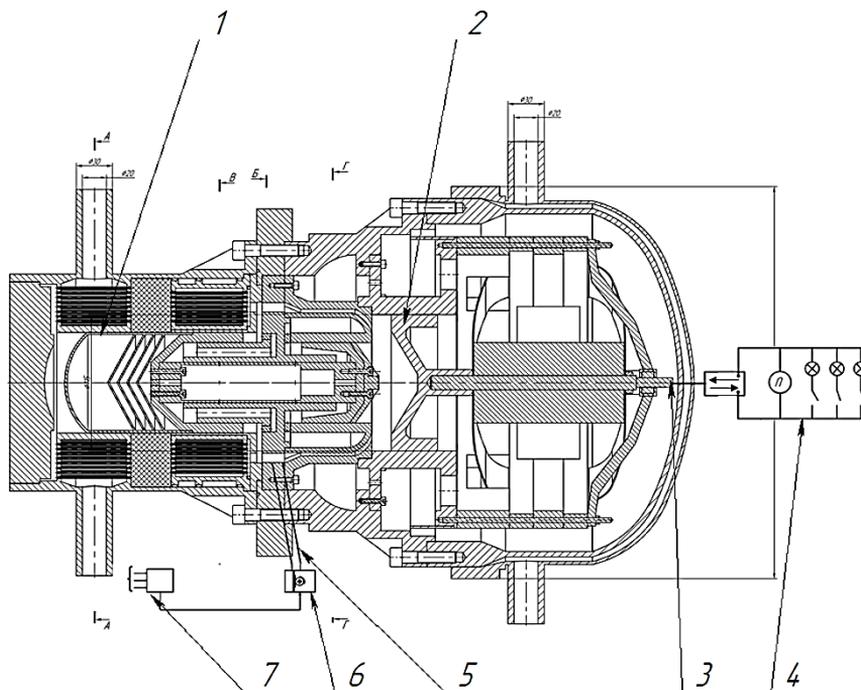


Рис. 4. Двигатель Стирлинга с системой автоматического регулирования:

1 — вытеснитель; 2 — поршень; 3 — вал электрогенератора; 4 — датчик вала электрогенератора; 5 — шток регулирующего клапана; 6 — регулирующий клапан; 7 — блок управления

В качестве регулирующего органа использован электромагнитный клапан типа VB 350. Этот клапан имеет небольшое проходное сечение канала и обладает высоким быстродействием, что обеспечивает требования к САР первого класса точности по ГОСТ Р 55231–2012. Внешний вид и устройство этого клапана показаны на рис. 5 и 6. Его характеристики представлены ниже.

Характеристики регулировочного клапана VB 350

Тип и торговая марка	60.17000.00 PA
Габаритные размеры, мм	93×162
Вес, кг	0,92
Материал	Латунь
Вход	3/8, наружная резьба
Выход	3/8, внутренняя резьба
Давление, МПа	35
Производительность, л/мин	40
Байпас	1/2, внутренняя резьба
Температура, °С	90



Рис. 5. Электромагнитный клапан типа VB 350 CAP двигателя Стирлинга

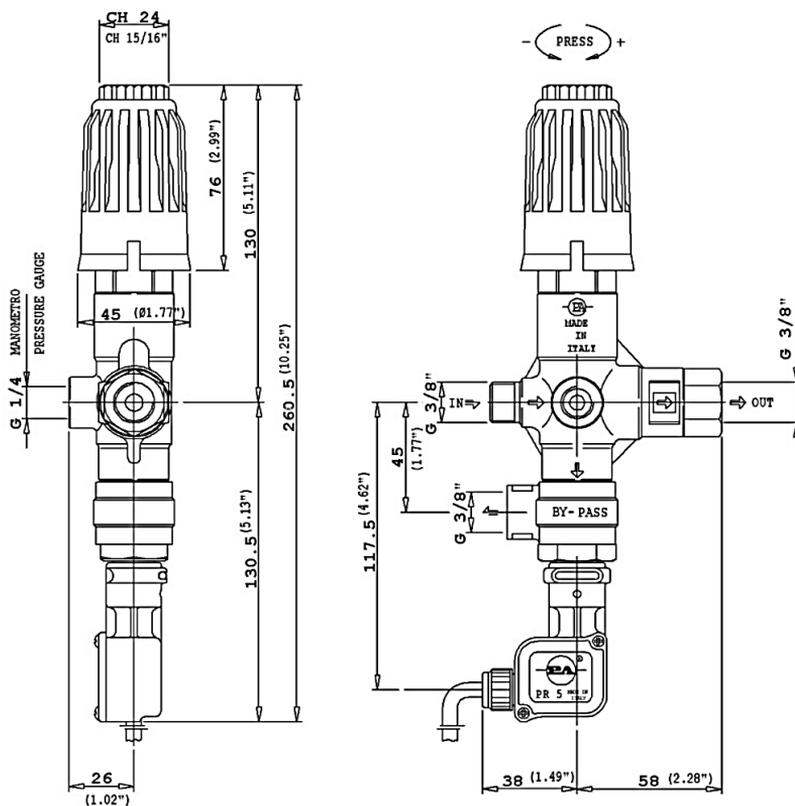


Рис. 6. Устройство электромагнитного клапана типа VB 350 CAP двигателя Стирлинга

Расчетные исследования САР двигателя Стирлинга. После утверждения контролируемого (частота генерируемого тока) и регулируемого (гидродинамическое давление) параметров в программном комплексе SimInTech [13] была сгенерирована расчетная схема САР (рис. 9). В качестве регулятора выбран пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор. Входная частота вращения вала электрогенератора составляет 50 Гц.

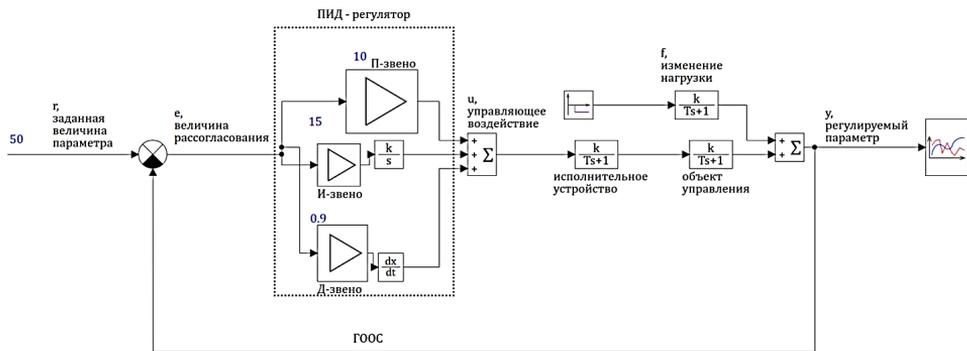


Рис. 9. Расчетная модель САР, сгенерированная в программном комплексе SimInTech

На систему подается ступенчатый сигнал, приводящий к переходному процессу наброса полной нагрузки на электрогенератор. Далее проведен подбор значений коэффициентов пропорциональной K_P , интегральной K_I и дифференциальной K_D -составляющих ПИД-закона регулирования. Путем анализа графиков полученных переходных процессов проведен выбор значений этих коэффициентов, обеспечивающих требования ГОСТ Р 55231–2012 к предельным значениям показателей качества процесса регулирования САР первого класса точности. Эти предельные значения составили: предельная продолжительность переходного процесса $t_{\text{пред}} = 2$ с, предельное значение перерегулирования $\sigma_{\text{пред}} = 5\%$ [14]. Сочетания значений коэффициентов K_P , K_I и K_D -ПИД-регулятора и полученные значения t и σ приведены в таблице ниже. Среди рассмотренных значений K_P , K_I и K_D -приемлемыми оказались первые три сочетания значений этих коэффициентов (первые три строки таблицы). На рис. 10 показаны переходные процессы, полученные с использованием программного комплекса SimInTech для этих значений коэффициентов.

Сочетания значений коэффициентов $K_{п}$, $K_{и}$ -и $K_{д}$ -ПИД-регулятора и показатели качества процесса регулирования — продолжительности переходного t и перерегулирования σ

Коэффициент $K_{п}$	Коэффициент $K_{и}$	Коэффициент $K_{д}$	t , с	σ , %
12	30,8	1,11	1,1	0,72
6	12,8	3,33	1,6	0,94
8	15,6	1,28	1,4	1,26
18	33	1,1	2,4	1
10	15	1,1	2,5	1,26
15	28	1,1	2,6	1,08
10	15	3,33	3,1	1,48
10	15	1,67	3,2	1,34
5	10	1,67	4,4	1,76
15	15	1,11	4,6	1,3
5	5	1,11	4,7	1,7
15	15	1,67	4,7	1,36
15	15	3,33	4,9	1,26
5	10	1,11	5	1,64
10	10	1,11	5	1,3
10	10	1,67	5,1	1,4
10	10	3,33	5,2	1,5
5	10	3,33	5,4	1,94
5	5	1,67	5,4	1,84

Заключение. По результатам исследования можно сформулировать следующие выводы.

1. Двигатели с внешним подводом теплоты (двигатели Стирлинга) являются альтернативой двигателям внутреннего сгорания в случаях, когда необходима утилизация солнечной энергии или теплоты от других типов энергетических установок и когда необходимо обеспечить длительную работу двигателей без обслуживания.

2. В качестве объекта исследования выбран свободнопоршневой двигатель Стирлинга типа SCA-5 мощностью 5 кВт, нагрузкой которого служит электрогенератор. Он используется NASA для проведения научных исследований в области космического энергоснабжения.

3. Предложена, разработана и рассчитана САР двигателя Стирлинга, обеспечивающая требования первого класса точности по ГОСТ Р 55231–2012.

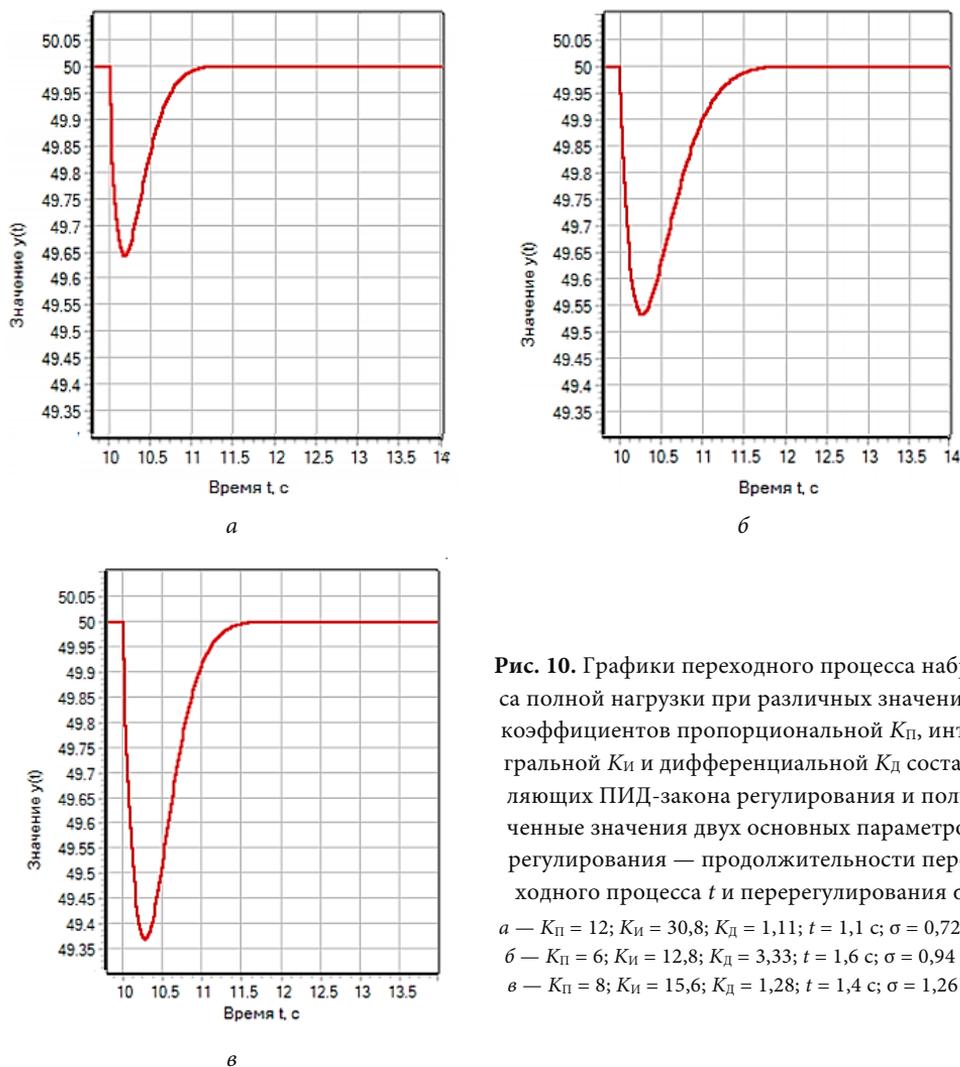


Рис. 10. Графики переходного процесса наброса полной нагрузки при различных значениях коэффициентов пропорциональной K_P , интегральной K_I и дифференциальной K_D составляющих ПИД-закона регулирования и полученные значения двух основных параметров регулирования — продолжительности переходного процесса t и перерегулирования σ :
а — $K_P = 12$; $K_I = 30,8$; $K_D = 1,11$; $t = 1,1$ с; $\sigma = 0,72$ %;
б — $K_P = 6$; $K_I = 12,8$; $K_D = 3,33$; $t = 1,6$ с; $\sigma = 0,94$ %;
в — $K_P = 8$; $K_I = 15,6$; $K_D = 1,28$; $t = 1,4$ с; $\sigma = 1,26$ %

4. Проведенные с использованием программного комплекса SimInTech расчетные исследования переходного процесса наброса полной нагрузки на электрогенератор позволили определить оптимальные значения коэффициентов пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-закона регулирования.

Литература

- [1] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. и др. *Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV. Двигатели внутреннего сгорания*. Москва, Машиностроение, 2013, 784 с.
- [2] Рыжов В.А., Ионин В.Е. Перспективные направления по совершенствованию рабочего процесса среднеоборотных дизелей. *Двигателестроение*, 2025, № 1, с. 3–13.
- [3] Уокер Г. *Двигатели Стирлинга*. Москва, Машиностроение, 1985, 408 с.
- [4] Ридер Г.Т., Хупер Ч. *Двигатели Стирлинга*. Москва, Мир, 1986, 464 с.
- [5] Кириллов Н.Г. Производство двигателя Стирлинга — новая отрасль в машиностроении XXI века. *Турбины и дизели*, 2010, № 2, с. 2–5.
- [6] Халифе Х., Смирнов С.В., Меркулов В.И., Борисов Ю.А. Перспективы использования свободнопоршневого двигателя Стирлинга для генерации электроэнергии в космосе. *Двигателестроение*, 2024, № 2, с. 56–68.
- [7] Столяров С.П., Маунг Йе, Столяров А.С. Базовое уравнение математической модели элемента внутреннего контура двигателя Стирлинга с учетом процесса теплообмена. *Двигателестроение*, 2024, № 2, с. 69–74.
- [8] Dhar M. *Stirling Space Engine Program. Final Report — Vol. 1*. NASA/CR-1999-209164/VOL1, 1999.
- [9] Brandhorst H.W., Kirby R.L., Chapman P.A. *Progress in Developing a New 5 Kilowatt Free-Piston Stirling Space Converter*. Session CT-402, Space Technology & Applications International Forum, 2008.
- [10] Chapman P.A., Walter T.J., Brandhorst H.W., Kirby R.L. Design and Fabrication of a 5-kWe Free-Piston Stirling Power Conversion System. *Paper AIAA-2008-5658, 6th International Energy Conversion Engineering Conference*, Cleveland, OH, 2008. <https://doi.org/10.2514/6.2008-5658>
- [11] Зенкин В.А., Лисовский Г.Е., Марков В.А., Трифионов В.Л., Гусев П.Г. Система регулирования частоты вращения вала двигателя Стирлинга. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2024, № 2, с. 39–49.
- [12] Столяров С.П. К вопросу о системе регулирования двигателя Стирлинга изменением мертвого объема рабочего контура. *Двигателестроение*, 2004, № 1, с. 15–17.
- [13] Карташов Б.А., Шабаетов Е.А., Козлов О.С., Щекатуров А.М. *Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: Практикум по моделированию систем автоматического регулирования*. Москва, ДМК Пресс, 2017, 424 с.
- [14] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. *Топливная аппаратура и системы управления дизелей*. Москва, Изд-во «Легион-Автодата», 2005, 344 с.

Поступила в редакцию 15.05.2025

Денисов Данила Игоревич — магистрант кафедры «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Денисов Д.И. Система регулирования двигателя с внешним подводом теплоты. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 05 (100). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/pmc/ejrknx/1065.html>

ENGINE CONTROL SYSTEM WITH EXTERNAL HEAT SUPPLY

D.I. Denisov

den.denicov.vip@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Stirling engines are an alternative to internal combustion engines in cases where it is necessary to utilize heat supplied from an external source, in particular solar energy, and ensure long-term maintenance-free operation. The object of the study was a Stirling free-piston engine powered by a linear electric generator. The system of automatic control of the frequency of the generated current by an electric generator with a Stirling motor is investigated. Using the SimInTech software package, the transient process of applying a full load to an electric generator is calculated. The optimal values of the coefficients of the proportional, integral and differential components of the PID regulation law have been determined, ensuring the requirements of GOST R 55231–2012 for the limiting values of the duration of the transition process and overshoot.

Keywords: heat engine, engine with external heat supply, Stirling engine, electric generator, control system, PID controller

Received 15.05.2025

Denisov D.I. — Master's student of Department of Combined Engines and Alternative Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Denisov D.I. Engine control system with external heat supply. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 05 (100). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/pmc/ejrknx/1065.html>