

УДК 621.436

К.Е. ДОЛГАНОВ<sup>1</sup>, Ю.А. ПОСТОЛ<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный транспортный университет, Украина<sup>2</sup>Таврическая государственная агротехническая академия, Украина

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МИНИДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

Описана экспериментальная система автоматического регулирования для минидвигателя Стирлинга модели УДС-1. Приведены результаты исследований этой системы.

**двигатель Стирлинга, система регулирования, регулятор температуры, регулятор частоты вращения, характеристики переходных процессов**

### Введение

В работе [1] описана установка с минидвигателем Стирлинга (ДС) модели УДС-1, агрегатируемым с электрическим генератором постоянного тока, а в работе [2] рассмотрены статические характеристики этого двигателя без системы автоматического регулирования. Для этого двигателя разработана экспериментальная электронная система автоматического регулирования (САР) и составлена динамическая математическая модель для вычислительных исследований на ЭВМ статических и динамических свойств этой САР. Особенности САР и результаты ее исследований рассматриваются в настоящей работе.

### 1. Экспериментальная САР

В САР входят две несвязанные системы регулирования: система автоматического регулирования максимальной температуры  $T_{n \max}$  наружной стенки нагревателя (САРТ), которая должна на всех режимах работы поддерживать температуру  $T_{n \max}$  на уровне 930...950 К, чтобы обеспечивался максимальный КПД двигателя, и система автоматического регулирования частоты вращения  $n$  вала двигателя (САРЧ), которая должна поддерживать с высокой точностью заданную частоту вращения независимо от изменения нагрузки со стороны электрического

генератора в случае применения генератора переменного тока.

ДС модели УДС-1 негерметичный, он развивает очень небольшую эффективную мощность 7...8 Вт. Но в САРТ и САРЧ применены электронные микропроцессорные регуляторы, питаемые током от самостоятельного источника, они энергию двигателя не используют. Это позволило применить для исследования САР в качестве регулируемого объекта даже такой маломощный ДС, как УДС-1.

В электронных регуляторах, примененных в САРТ и САРЧ, используется релейный принцип регулирования, при котором величины регулируемого параметра поддерживаются с заданной точностью независимо от изменения возмущающих воздействий. Т.е. регуляторы являются астатическими.

В ДС модели УДС-1 температура стенки нагревателя регулируется изменением подачи газового топлива в камеру сгорания, а частота вращения – изменением величины дополнительного “мертвого” объема, выполненного в виде цилиндра с подвижным поршнем.

САРТ стенки нагревателя собрана на основе микропроцессорного программируемого измерителя-регулятора температуры типа ТРМ 12 – Ріс с хромель-алюмелиевым датчиком температуры с использованием узлов и деталей, выпускаемых промышленностью стран СНГ. Схема эксперименталь-

ной САРЧ показана на рис. 1. От термопары 3 сигнал поступает в цифровой фильтр 4, где сглаживаются случайные импульсные помехи, сигнал фильтруется в единицах измеряемой величины и передается в логическое устройство – ПИД – регулятор 5.

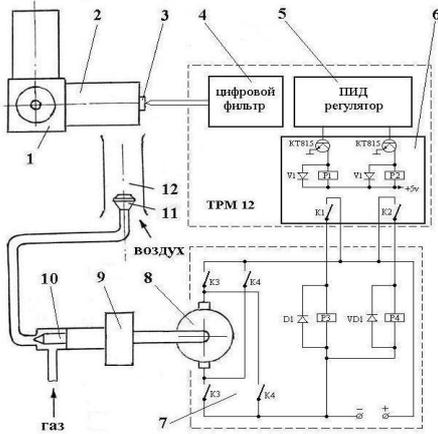


Рис. 1. Схема экспериментальной САРЧ ДС

В нем текущий сигнал сравнивается с заданными верхним и нижним пределами регулирования температуры. В случае отклонения текущего значения от заданных пределов подается сигнал на выходное устройство 6, которое с помощью двух реле Р1 и Р2 управляет исполнительным устройством 7, а последнее в свою очередь реверсивным электродвигателем 8. Электродвигатель через планетарный редуктор 9 перемещает иглу дозатора газа 10, уменьшая или увеличивая подачу газа через газовую горелку 11 в камеру сгорания 12. К ПИД-регулятору через адаптер сети модели АС-2 можно подключить ПЭВМ для записи результатов измерений.

САРЧ коленчатого вала ДС собрана на базе счетчика импульсов СИ-8, в схему которого внесены изменения, необходимые для регулирования частоты вращения коленчатого вала ДС с использованием индуктивного датчика частоты вращения, установленного напротив зубчатого колеса, закрепленного на коленчатом валу ДС.

Схема экспериментальной САРЧ показана на рис. 2. Импульсы напряжения из датчика 3 передаются в усилитель-формирователь импульсов 8, а из него в счетчик импульсов 9, в котором с помощью

генератора временных импульсов 7 они преобразуются в сигналы, пропорциональные частоте вращения коленчатого вала двигателя, и передаются в устройство сравнения 10, где текущие значения сигналов сравниваются с заданными пределами регулирования и формируется сигнал управления выходными устройствами 11 и 12. Если частота вращения

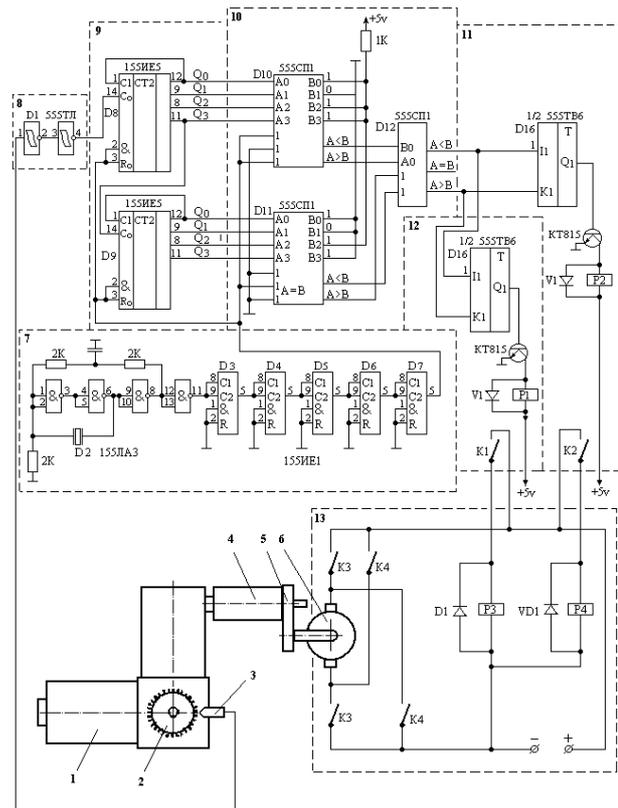


Рис. 2. Схема экспериментальной САРЧ ДС

отклоняется от заданных пределов, то сигнал из выходных устройств 11 и 12 поступает в исполнительный механизм 13, который с помощью реверсивного электродвигателя 6 и редуктора 7 перемещает поршень в цилиндре с дополнительным “мертвым” объемом в нужном направлении до тех пор, пока текущее значение частоты вращения не окажется в пределах заданного допуска.

## 2. Результаты исследований

На рис. 3 показана опытная всережимная скоростная характеристика ДС модели УДС-1 с разработанной САР. На ней показана зависимость эффек-

тивной мощности  $P_e$  от частоты вращения  $n$ . Видно, что регулятор частоты вращения обеспечивает получение астатических регуляторных веток 1, 2, 3. Во время снятия этих характеристик САРЧ автоматически поддерживала заданную температуру  $T_n = (918 \dots 920)$  К.

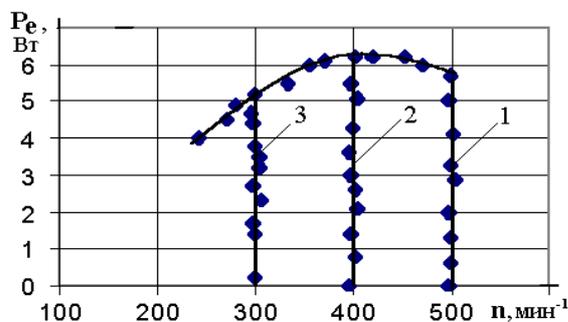


Рис. 3. Опытная всережимная скоростная характеристика ДС модели УДС-1 с электронным регулятором частоты вращения

На рис. 4 и 5 показаны переходные процессы после мгновенного сброса и наброса 100% нагрузки, которая в условиях опытов равнялась 6,3 Вт. На-

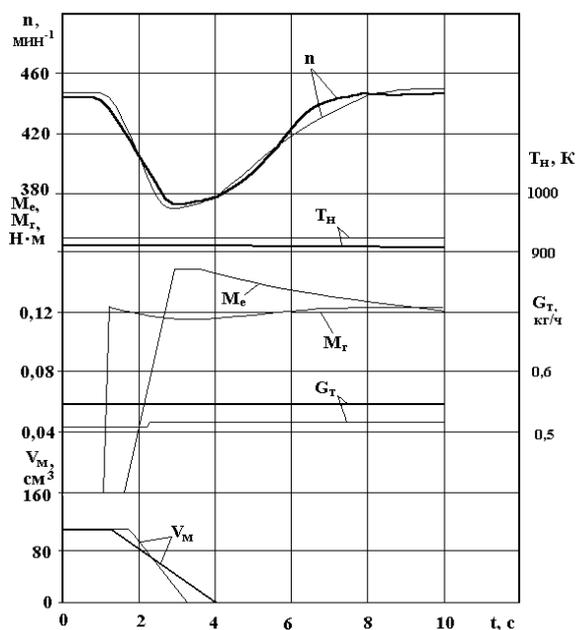


Рис. 4. Переходные процессы в САР ДС модели УДС-1 после наброса 100% нагрузки  $N_{нг}$  от 0 до 6,3 Вт

грузка изменялась путем выключения или включения реостатов, присоединенных к электрогенератору. На рисунках толстыми линиями показаны опытные кривые, записанные на ПЭВМ, а тонкими – кривые, рассчитанные на математической модели.

На них обозначено:  $n$  – частота вращения коленчатого вала ДС;  $T_n$  – температура наружной стенки нагревателя;  $M_e$ ,  $M_r$  – эффективный крутящий момент и момент сопротивления электрогенератора;  $G_T$  – часовой расход газового топлива;  $V_M$  – величина дополнительного “мертвого” объема. САРЧ была направлена на поддержание частоты вращения  $n = 450 \text{ мин}^{-1}$  с точностью  $\pm 3,0 \text{ мин}^{-1}$ , а САРЧ на поддержание температуры  $T_n = 920$  К.

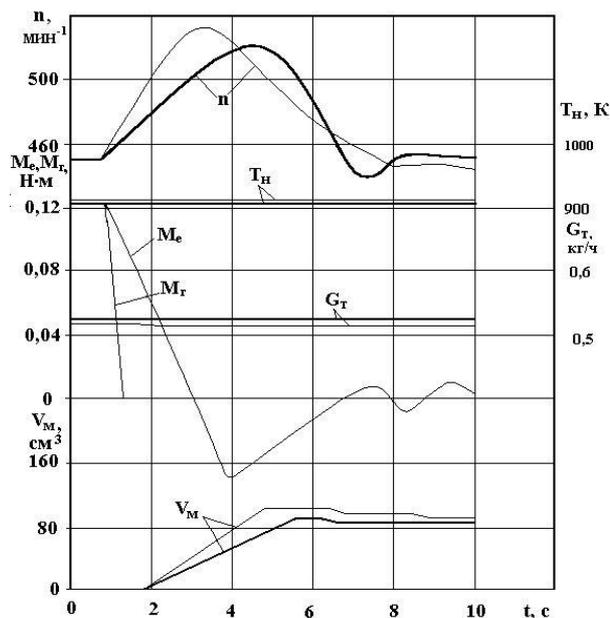


Рис. 5. Переходные процессы в САР ДС модели УДС-1 после сброса 100 % нагрузки  $N_{нг}$  от 6,3 до 0

Как видно из рис. 4 и 5, переходные процессы происходят с одним забросом частоты вращения. Это говорит о хорошем качестве работы САРЧ. Заброс частоты вращения после сброса нагрузки равен 17,3%, длительность переходного процесса 7 с, а после наброса нагрузки соответственно 15,4% и 7 с. Эти показатели близки к показателям регуляторов 4-го класса точности по ГОСТ 10511-83 [3]: заброс не более 15%, длительность переходных процессов не более 10 с.

Видно также, что “мертвый” объем  $V_M$  начинает изменяться с запаздыванием 0,5 ... 0,6 с. Это говорит о запаздывании начала перемещения поршня в “мертвом” объеме.

Анализ, выполненный на математической модели, показал, что забросы частоты вращения можно

уменьшить увеличением скорости перемещения поршня в “мертвом” объеме и уменьшением времени запаздывания начала его перемещения.

Особый интерес представляет увеличение скорости поршня, т.к. на него можно влиять изменением передаточного числа от электромотора к штоку поршня. В математической модели это выражено коэффициентом КР передачи между напряжением питания электродвигателя и скоростью поршня в “мертвом” объеме. Чем больше КР, тем больше скорость поршня и скорость изменения “мертвого” объема.

На рис. 6 показаны расчетные переходные процессы после сброса нагрузки при разных значениях КР. Видно, что увеличение КР приводит к уменьшению заброса частоты вращения от  $115 \text{ мин}^{-1}$  (25,5%) при  $\text{КР} = 8 \text{ мм/(с·В)}$  до  $49 \text{ мин}^{-1}$  (10,8%) при  $\text{КР} = 40 \text{ мм/(с·В)}$ . Длительность переходного процесса сокращается с 8 до 6 с. Скорость изменения “мертвого” объема при этом составляет  $37,5$  и  $150 \text{ см}^3/\text{с}$ . Эффект от увеличения КР быстро уменьшается по мере того, как КР становится больше.

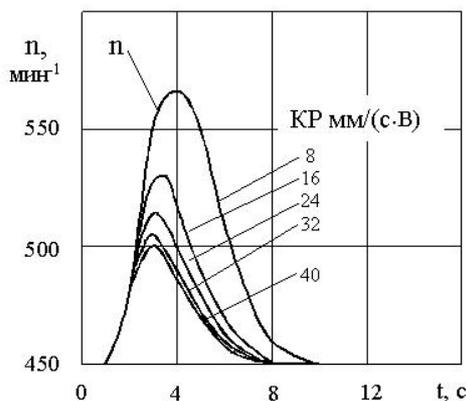


Рис. 6. Влияние коэффициента КР на переходные процессы после сброса нагрузки от  $N_{\text{шт}} = 6,1 \text{ Вт}$  до 0

Аналогичная картина имеет место после наброса нагрузки при тех же условиях — по мере увеличения КР заброс (просадка) частоты вращения и длительность переходного процесса уменьшаются.

Уменьшение запаздывания перемещения поршня приводит к подобным результатам.

Расчеты показали, что при скорости изменения “мертвого” объема не менее  $100 \text{ см}^3/\text{с}$  и запаздывании не более 0,1 с обеспечивается удовлетворение требований ГОСТ 10511-83 к регуляторам 3-го класса точности: заброс частоты вращения не более 10%, длительность переходного процесса не более 5 с.

Но дальнейшие исследования САР на ДС модели УДС-1 не имеют смысла, потому что этот ДС не годится для практического применения из-за его негерметичности.

## Заключение

Экспериментальная САР работоспособна, на ее основе можно разрабатывать опытную САР. Но для дальнейших исследований нужно использовать полноценный герметичный ДС небольшой мощности.

## Литература

1. Постол Ю.А. Разработка системы автоматического управления миниатюрного электрического агрегата с приводом от двигателя Стирлинга // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. — Х.: НАУ “ХАІ”. — 2001. — Вип. 26. Двигуни та енергоустановки — С. 267 — 268.
2. Долганов К.Е., Постол Ю.А. Характеристики миниатюрного двигателя Стирлинга модели УДС-1 // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. — Х.: НАУ “ХАІ”. — 2001. — Вип. 30. Двигуни та енергоустановки — С. 28 — 30.
3. ГОСТ 10511-83. Системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) судовых, тепловых и промышленных дизелей. Общие технические требования. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 15 с.

Поступила в редакцию 25.05.2004

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.П. Сахно, Национальный транспортный университет, Киев.