

УДК 621.541.1+621.1.011

## Экспериментальное исследование самостабилизации частоты вращения одноцилиндрового пневматического поршневого двигателя

С.О. Шкарупа, Э.К. Аракелян

**Шкарупа Сергей Олегович** — зав. лабораторией Государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (г. Королев Московской области) «Технологический университет», e-mail: aviacerega@mail.ru

**Аракелян Эдик Койрунович** — доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами НИУ «МЭИ», e-mail: Edik\_arakelyan@inbox.ru

Одно из передовых направлений развития современной энергетики — автономная от сети генерация электрической энергии. Его перспективность определяется тем, что в экономических условиях рыночных отношений в России использование исключительно централизованных электрических сетей и генерирующих мощностей становится невозможным. Распространение генерации электрической энергии автономно от сети при применении известных тепловых двигателей сдерживается невозможностью обеспечения высокой точности стабилизации частоты электрического напряжения (на уровне  $50 \pm 0,2$  Гц) без применения дорогостоящего оборудования.

В статье рассмотрено решение этой проблемы путем применения генерирующей установки с поршневой расширительной машиной, работающей в режиме самостабилизации частоты вращения (ССЧВ). Данное явление исследовано на примере пневматического поршневого двигателя. Воздух рассматривается как моделирующее рабочее тело. Натурным рабочим телом реальной когенерационной установки будет являться водяной пар.

К особенностям работы поршневого двигателя с ССЧВ относится постоянство расхода рабочего тела независимо от мощности нагрузки, что является положительным качеством при его работе в режиме когенерации. Это исключает применение регулируемой байпасной линии или отдельного котла и обеспечивает нормальную работу системы теплоснабжения при снижении электрической нагрузки.

Основная цель работы — сопоставление экспериментальных данных о работе генерирующей установки с теоретическими, полученными на упрощенной динамической модели поршневого двигателя в переходных процессах. Показано, что такая модель достаточно точно для использования в инженерной практике описывает реальный поршневой двигатель. Последнее обстоятельство позволило, благодаря простоте динамической модели, впервые получить инженерную аналитическую формулу для перерегулирования поршневых двигателей с ССЧВ при ступенчатом изменении нагрузки.

В результате исследования стало возможным достоверно определить отклонение частоты вращения поршневого двигателя с ССЧВ при ступенчатом изменении нагрузки. Эта величина однозначно определяет отклонение частоты электрического напряжения, вырабатываемого электромашинным генератором, приводимым таким двигателем.

Авторами созданы предпосылки для определения области рационального применения поршневых двигателей с ССЧВ в когенерационных системах энергоснабжения.

*Ключевые слова:* самостабилизация частоты вращения, переходный процесс, поршневая расширительная машина, когенерация, ступенчатое изменение нагрузки, перерегулирование.

## Experimentally Studying a Single-Cylinder Pneumatic Piston Engine Operating in a Rotation Frequency Self-Stabilizing Mode

S.O. Shkarupa, E.K. Arakelyan

**Shkarupa Sergey O.** — Head of the Laboratory of State Budgetary Educational Institution of Higher Education (Korolev, Moscow region) University of Technology, e-mail: aviacerega@mail.ru

**Arakelyan Edik K.** — Dr.Sci. (Techn.), professor of Automated Control Systems for Thermal Processes Dept., MPEI, e-mail: Edik\_arakelyan@inbox.ru

Generation of electricity by standalone sources is one of leading-edge avenues in the development of modern power engineering. Good-looking prospects of developments in this field are stemming from the fact that the use of nothing else but centralized power grids and generating capacities in Russia becomes impossible under the conditions of market economy in the country. Wide use of stand-alone generation of electricity on the basis of well-known heat engines is held back by impossibility to ensure highly accurate stabilization of voltage frequency (at a  $50 \pm 0.2$  Hz level) unless expensive equipment is used.

The article considers an approach to solving this problem by using a generating set equipped with an expansion piston (reciprocating) engine operating in the rotation frequency self-stabilization mode (RFSS). This phenomenon is studied by taking a pneumatic piston engine as an

example. Air is considered as a modeling working fluid. Steam will be used as an actual working fluid in a real cogeneration plant. One of distinctive features pertinent to operation of a piston engine with RFSS is that the working fluid flowrate remains constant irrespective of the load power, which is a positive feature during its operation in a cogeneration mode. This feature eliminates the need to use an adjustable bypass line or a separate boiler and ensures normal operation of the heat supply system when the electrical load decreases.

The main objective of the study is to compare the experimental data on the generating set operation with the theoretical data (the latter were obtained on a piston engine's simplified dynamic model in transient modes). It has been shown that this model describes the real piston engine with accuracy sufficient for engineering purposes. Owing to this circumstance, taken in combination with simplicity of the dynamic model, it became possible to derive for the first time an engineering analytical formula for the overshoot of piston engines with RFSS at a step-wise variation of load. The study results opened the possibility to reliably determine how the rotation frequency of a piston engine with RFSS deviates in response to a step-like change of load. This quantity uniquely determines deviation of the frequency of voltage generated by the electrical generator driven by such engine.

The authors have created prerequisites for determining the advisable application field of piston engines with RFSS in cogeneration power supply systems.

*Key words:* self-stabilization of rotation frequency, transient, reciprocating expansion engine, cogeneration, step-like load change, overshoot.

## Введение

Поршневые двигатели, применяемые для привода синхронных генераторов в автономных электроустановках, обычно снабжены регуляторами скорости. Это объясняется тем, что в процессе работы двигателя его нагрузка не остается постоянной, а изменяется в весьма широких пределах. При нарушении равновесия между развиваемым крутящим моментом и моментом внешнего сопротивления частота вращения коленчатого вала также изменяется. Для сохранения заданной частоты вращения необходимо в соответствии с изменением внешнего момента сопротивления увеличить или уменьшить количество топлива или рабочего тела, подаваемого в цилиндры двигателя, чтобы восстановить равенство между его крутящим моментом и моментом внешнего сопротивления.

Другой подход к решению этой задачи заключается в том, чтобы оставляя постоянным расход рабочего тела или топлива, изменять эффективность его использования с целью поддержания постоянной частоты вращения. Один из вариантов реализации этой идеи предложен в [1]. Для двигателя внутреннего сгорания (ДВС) она была экспериментально подтверждена и заключалась в подаче на искровую свечу зажигания ДВС через равные промежутки времени импульсов высокого напряжения без связи с коленчатым валом. Такой двигатель устойчиво работал при изменении нагрузки и поддерживал частоту вращения коленчатого вала соответствующей частоте следования импульсов высокого напряжения. Это явление было названо автором [1] самостабилизацией частоты вращения. Описание механизма ССЧВ на примере поршневой расширительной машины с использованием экспериментальных данных приведено далее.

Применение ССЧВ наиболее актуально для паропоршневых двигателей (высокооборотных паровых машин) в режиме когенерации, где отсутствие необходимости регулирования расхода рабочего тела, проходящего через паропоршневой двигатель (ППД), является положительным качеством, так как при клас-

сическом регулировании мощности ППД изменением расхода рабочего тела возникает необходимость байпасной линии или же дополнительного котла для обеспечения необходимого количества теплоты на нужды отопления и горячего водоснабжения. В настоящее время ППД находят широкое применение за рубежом [2], в то время как в России они пока еще не вышли из стадии опытно-конструкторских работ.

Еще одним преимуществом ССЧВ, как будет показано ниже, является возможность обеспечить высокую точность стабилизации частоты вращения при изменении нагрузки по сравнению с другими способами регулирования тепловых двигателей. Например, согласно ГОСТ 13822—82 [3], дизель-генераторы в установленном режиме должны обеспечивать точность поддержания частоты  $\pm 1\%$ , а при сбросах/набросах нагрузки отклонение частоты должно составлять не более  $\pm 6\%$ . Современное оборудование, например станки с числовым программным управлением (ЧПУ), не может надежно работать при таком низком качестве электроэнергии. Для ППД обеспечение точности частоты вращения путем регулирования расхода рабочего тела является еще более сложной задачей, поскольку перестановочное усилие клапана, регулирующего подачу рабочего тела, на порядок выше перестановочного усилия рейки топливного насоса дизеля. Поэтому применение ССЧВ является актуальным.

Упрощенная динамическая модель двигателя, обладающего ССЧВ, рассмотрена в [4]. Используя ее автору удалось определить условия устойчивости.

В представленной работе выполнено аналитическое описание переходного процесса упрощенной динамической модели двигателя, обладающего ССЧВ, при ступенчатом изменении нагрузки [5]. Основной целью работы является сопоставление экспериментальных данных, полученных на реальном двигателе с ССЧВ с поведением упомянутой динамической модели в переходном процессе. Другой задачей является аналитическое определение величины перерегулирования при ступенчатом изменении нагрузки.

### Описание экспериментальной установки

Для исследования ССЧВ ПРМ, в том числе переходных процессов при ступенчатом изменении нагрузки, была спроектирована, изготовлена и введена в работу экспериментальная установка. Она состоит из следующих частей: ПРМ, нагрузочного устройства, компрессора с сопутствующей арматурой, а также системы управления режимами ПРМ и регистрации данных. Схема установки показана на рис. 1, ее внешний вид — на рис. 2

Основу экспериментальной установки составляет ПРМ, работающая на сжатом воздухе. Она состоит из кривошипно-шатунного механизма (КШМ) серийного ДВС 16, его измененного газораспределительного механизма (на схеме не показан), золотникового устройства 4, приводимого сервоэлектродвигателем 9. В качестве исходного двигателя для ПРМ взят бензиновый четырехтактный двухцилиндровый двигатель УД-2 рабочим объемом 600 см<sup>3</sup>. Это дало перспективу исследования ССЧВ для двухцилиндровой ПРМ. Однако данная работа проводилась на одноцилиндровом отсеке, для чего один из двух цилиндров был разгерметизирован. Распределительный вал газораспреде-

лительного механизма исходного двигателя заменен на вал, обеспечивающий одновременное открытие и закрытие впускных и выпускных клапанов цилиндра таким образом, чтобы они оба работали как выпускные. Для обеспечения впуска использовано золотниковое устройство с вращающимся золотником цилиндрического типа, имеющим две диаметрально противоположные щели (за один оборот золотника происходит два впуска рабочего тела).

Нагрузочное устройство включает в себя: асинхронный электрогенератор 15 и блоки активной нагрузки с лампами накаливания 1, 3. Асинхронный электрогенератор работает автономно от электрической сети, для чего к нему подключен блок конденсаторов 14 через пакетный выключатель 13. Блоки ламп накаливания 1, 3 подключаются пакетными выключателями 12 и 2 соответственно.

Система управления режимами ПРМ и регистрации данных (СУРиРД) состоит из серводвигателя 9, сервопреобразователя 10, программируемого логического контроллера 18, инкрементального энкодера 17 и ЭВМ 11. СУРиРД помимо регистрации данных обеспечивает работу золотника ПРМ в двух режимах:

- синхронизации с коленчатым валом. В этом режиме происходит открытие впускных щелей золотни-

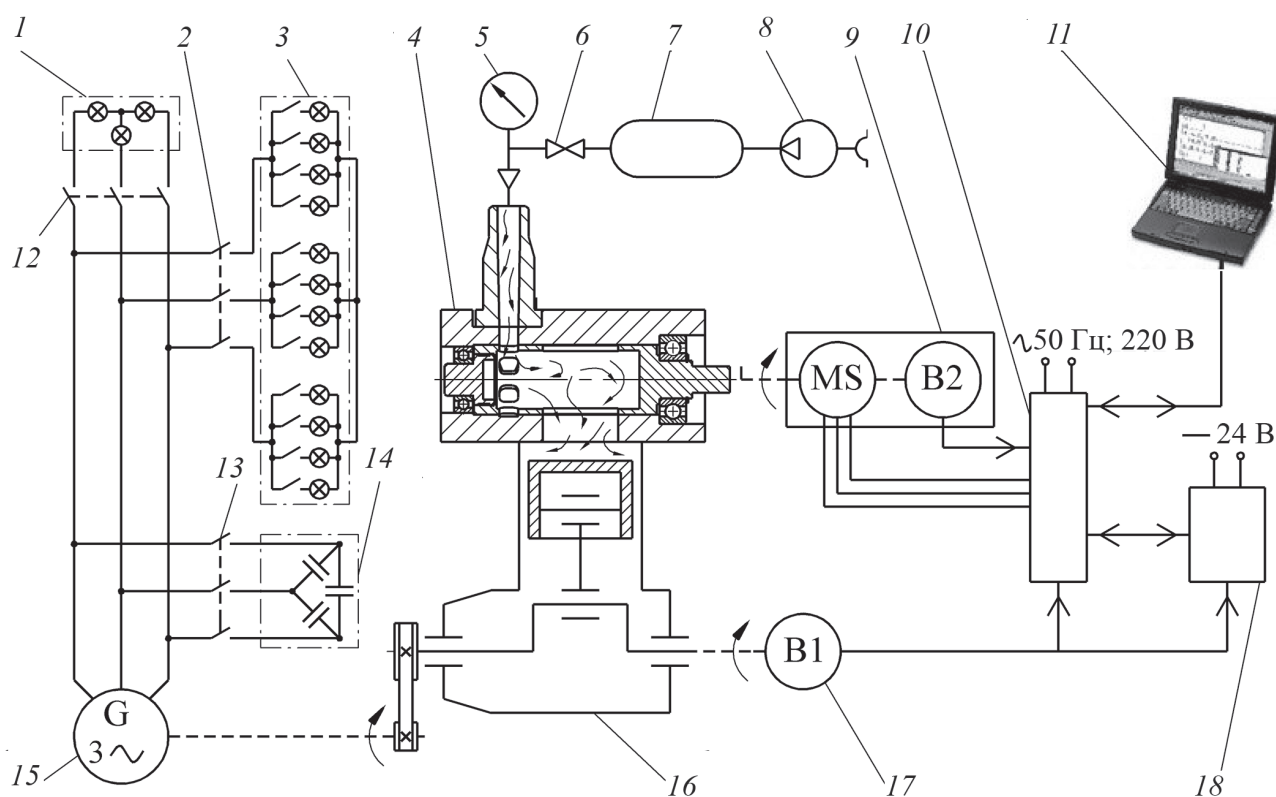


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с поршневой расширительной машиной с самостабилизацией частоты вращения: 1, 3 — блоки ламп накаливания; 2, 12, 13 — пакетные выключатели; 4 — золотниковое устройство; 5 — манометр; 6 — пусковой кран; 7 — ресивер; 8 — компрессор; 9 — серводвигатель; 10 — сервопреобразователь; 11 — ЭВМ; 14 — блок конденсаторов; 15 — асинхронный электрогенератор; 16 — кривошипно-шатунный механизм; 17 — инкрементальный энкодер; 18 — программируемый логический контроллер

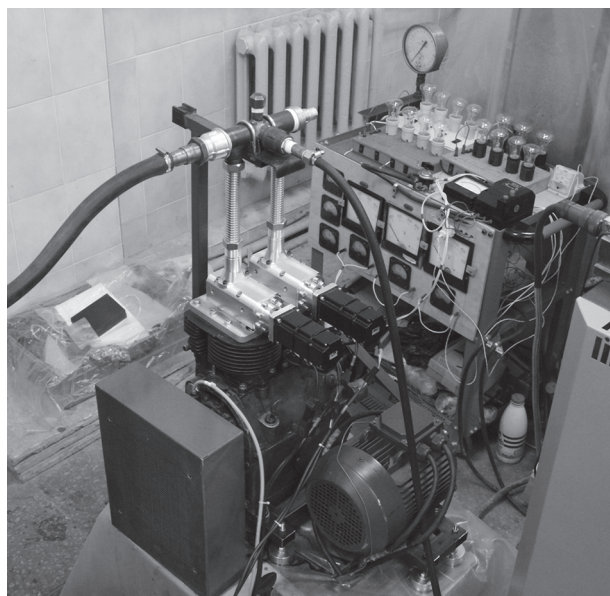


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки

ка в заданном положении КШМ. При этом коленчатый вал вращается в 2 раза быстрее, чем золотник, который имеет две впускных щели. Такой режим обеспечивает работу ПРМ как классической паровой машины, где коленчатый вал связан с золотником механически;

- постоянной частоты вращения. В этом режиме золотник вращается с постоянной частотой без связи с коленчатым валом, но за счет ССЧВ ПРМ устойчиво работает с частотой вращения коленчатого вала, соответствующей частоте вращения золотника.

Установка работает следующим образом. Для запуска ПРМ с помощью СУРиД устанавливается заданный угол предварения впуска, после чего золотник ПРМ автоматически переходит в режим синхронизации с коленчатым валом, затем оператор установки (далее оператор) по сигнальной лампе выставляет КШМ в заданное пусковое положение. После этого оператор резко открывает пусковой кран 6. Сжатый воздух, полученный от компрессора 8, через ресивер 7 и открытый пусковой кран 6 проходит в золотниковое устройство 4 и затем в цилиндр. В результате происходит запуск ПРМ. Далее оператор регулирует вручную с помощью крана 6 давление воздуха таким образом, чтобы частота вращения коленчатого вала была несколько выше номинальной частоты ССЧВ, затем переводит золотник ПРМ в режим постоянной частоты вращения. Под номинальной частотой ССЧВ будем понимать частоту следования импульсов рабочего тела. В данной установке эта частота в 2 раза превышала частоту вращения золотника, в связи с тем что он имел две щели. В экспериментах, рассмотренных далее, номинальная частота ССЧВ равна 900 импульсов в минуту. После перевода золотника ПРМ в режим постоянной частоты вращения возможны эксперименты по изучению ССЧВ при ступенчатом изменении нагрузки в виде включения и выключения блоков ламп накаливания. При этом дан-

ные об угловом положении золотника и коленчатого вала определялись через каждые 125 мкс с помощью СУРиД и записывались в память ЭВМ с целью дальнейшей математической обработки. Инкрементальный энкодер 17 позволял определять угловое положение коленчатого вала с дискретностью 5 угловых минут, а инкрементальный энкодер сервоэлектродвигателя 9, приводящего золотник, — 2 угловые минуты.

### Основные результаты экспериментальных исследований

Для анализа переходных процессов при ССЧВ ПРМ проведены эксперименты по определению изменения средней частоты вращения каждого оборота коленчатого вала и изменения величины предварения впуска каждого оборота по времени при изменении нагрузки. Результат одного из таких экспериментов приведен на рис. 3. Средняя частота вращения (далее — частота вращения) каждого оборота коленчатого вала отображена в виде точки; для лучшей наглядности эти точки соединены отрезками прямых. Предварение впуска оборота определялось как угол между положением коленчатого вала в момент открытия щели золотника и положением коленчатого вала, соответствующим верхней мертвой точке (ВМТ) КШМ. Предварение впуска принято считать положительным, если щель золотника открывается раньше, чем КШМ дойдет до ВМТ, в противном случае предварение считается отрицательным. В данных экспериментах оно было отрицательным.

Запуск ПРМ осуществлялся при работе золотника в режиме синхронизации с коленчатым валом и предварении впуска  $-45^\circ$ , после чего оператором устанавливалась частота вращения ПРМ  $920 \dots 940 \text{ мин}^{-1}$  за счет подбора давления на ее входе. На рис. 3 этот процесс отображен в левой части графика, он происходил до 4575,1 мс. На 4575,1 мс был осуществлен перевод золотника в режим постоянной частоты вращения. В этот момент частота вращения коленчатого вала составляла  $932,82 \text{ мин}^{-1}$ . Далее ПРМ стремилась поддерживать частоту вращения постоянной, равной номинальной ( $900 \text{ мин}^{-1}$ ), используя ССЧВ. Переход с  $932,82$  до  $900 \text{ мин}^{-1}$ , а также переход предварения впуска с  $-45^\circ$  до  $-48^\circ$  осуществлялся в течение 2126,1 мс через затухающий колебательный процесс. Можно отметить, что в этом и последующих установившихся режимах, которые наступали после переходных процессов, отклонение частоты от номинальной составляло не более 0,18 %. С 8310,5 мс оператор плавно уменьшил давление до 6 ати, что привело к изменению предварения впуска до  $-42,5^\circ$ , при этом частота вращения почти не менялась ( $\pm 0,5 \%$ ) и по достижении давления 6 ати вышла на установившийся режим.

На 16 578 мс была ступенчато наброшена нагрузка в виде включения блока ламп накаливания мощностью 180 Вт. Это привело к переходному процессу по частоте вращения с перерегулированием 3,06 % и временем

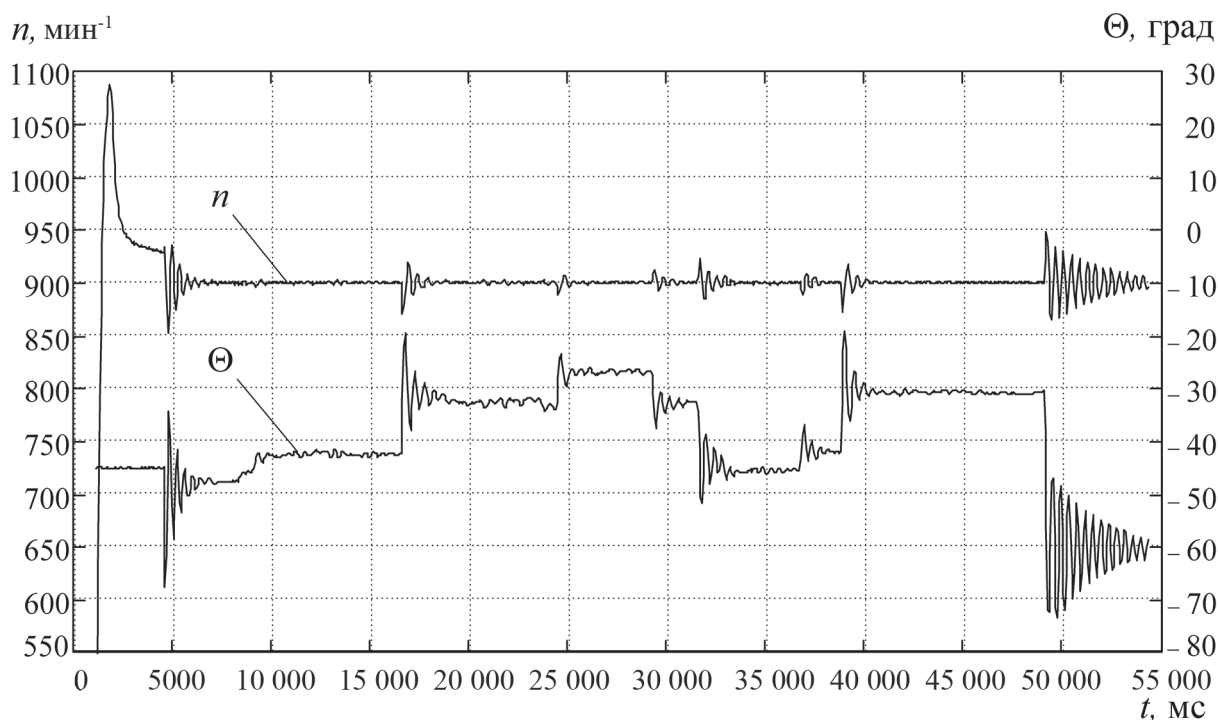


Рис. 3. Изменение частоты вращения  $n$  и предварения впуска  $\Theta$  по времени  $t$  при ступенчатом сбросе/набросе нагрузки

переходного процесса 2061 мс, после чего предварение впуска установилось равным  $-32^\circ$ .

Далее на 24 378 мс была ступенчато наброшена дополнительная нагрузка в виде включения блока ламп накаливания мощностью 75 Вт. Это привело к переходному процессу по частоте вращения с перерегулированием 1,32 % и временем переходного процесса 1195 мс, в результате предварение впуска установилось равным  $-27^\circ$ .

После этого на 29 240 мс была ступенчато сброшена нагрузка в виде выключения блока ламп накаливания мощностью 75 Вт. Это привело к переходному процессу по частоте вращения с перерегулированием 1,29 % и временем переходного процесса 1599 мс, после чего предварение впуска установилось равным  $-32,5^\circ$ .

Далее также происходили сбросы и набросы различных нагрузок. При этом процессы протекали аналогично описанным. Отметим, что мощность ПРМ при тех же условиях, что и в описанном эксперименте, но при предварении впуска, которое обеспечивает максимальный крутящий момент, ориентировочно составляла 530 Вт.

Как видно из приведенного описания эксперимента, точность поддержания частоты вращения в установившемся режиме является удовлетворительной,  $\pm 0,18$  %. Что касается перерегулирования при ступенчатом сбросе/набросе нагрузки, то необходимо рассмотреть способы его уменьшения. Часть из них рассмотрена далее.

Покажем механизм работы ССЧВ с использованием представленных экспериментальных данных на отрезке времени с 16 400 до 17 800 мс. Отметим, что работа

ПРМ при ССЧВ происходит на той части регулировочной характеристики, где крутящий момент растет с ростом величины предварения впуска. Как было сказано ранее, на указанном отрезке времени произошел наброс нагрузки 180 Вт. Изменение частоты вращения и предварения впуска показано на рис. 4.

На первом обороте, который начался на 16 570 мс, произошел ступенчатый наброс нагрузки, в результате чего уменьшилась частота вращения до  $872,42$  мин $^{-1}$ . Поскольку частота вращения золотника постоянна это повлекло за собой увеличение предварения впуска на  $9,5^\circ$  (с  $-42,383^\circ$  до  $-31,95^\circ$ ). Вследствие увеличения крутящего момента из-за роста угла предварения впуска на следующем обороте происходит прекращение падения частоты вращения и начало ее увеличения до  $875,23$  мин $^{-1}$ . Поскольку частота вращения коленчатого вала по-прежнему меньше частоты вращения золотника происходит дальнейший рост предварения впуска до  $-22,3^\circ$  и, как следствие, крутящего момента. В результате частота вращения увеличивается до  $894,09$  мин $^{-1}$ . Но поскольку она все еще меньше частоты вращения золотника происходит дальнейший рост предварения впуска до  $-19,68^\circ$ , что в свою очередь влечет за собой рост крутящего момента. Следствием этого является рост частоты вращения выше номинальной до  $909,92$  мин $^{-1}$ . Поскольку частота вращения коленчатого вала стала выше частоты вращения золотника, то предварение впуска уменьшилось до величины  $-23,129^\circ$ . Дальнейшее изменение частоты вращения и предварения впуска носит затухающий колебательный характер. Устойчивость такого процесса описана в [4].

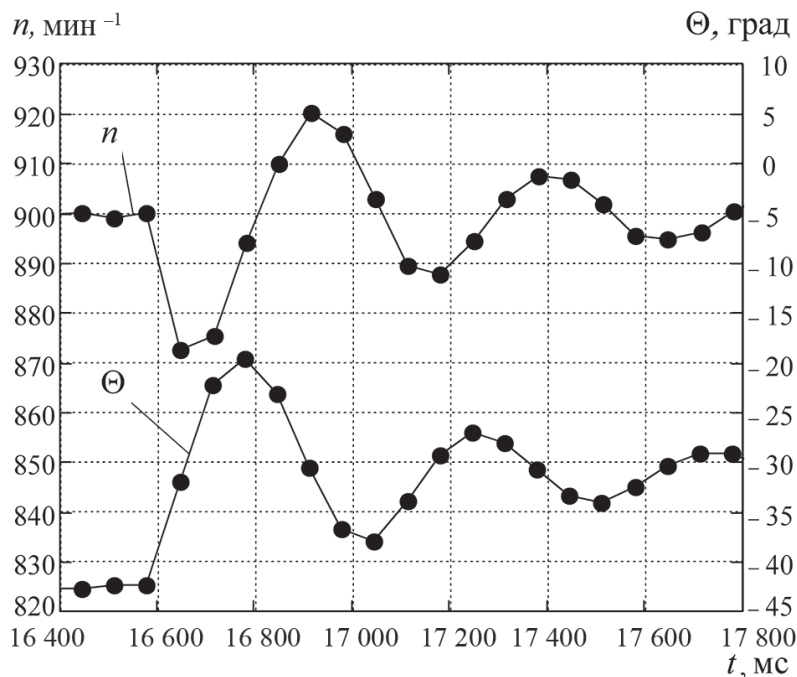


Рис. 4. Изменение частоты вращения  $n$  и предварения впуска  $\Theta$  по времени  $t$  при ступенчатом увеличении нагрузки на 180 Вт

#### Сопоставление экспериментальных данных с поведением динамической модели в переходном процессе при ССЧВ и оценка величины перерегулирования

Для анализа способов уменьшения перерегулирования необходимо оценить влияние параметров двигателя на переходный процесс. Это можно сделать, используя аналитическую формулу переходного процесса при ступенчатом изменении нагрузки из [5], которая получена на основе динамической модели [4] при условии, если ее поведение достоверно отображает экспериментальные данные.

В связи с этим сопоставим динамическую модель с натурным физическим экспериментом, для чего рассмотрим участок времени с 48 900 по 50 500 мс, при котором происходил полный сброс нагрузки. Изменение частоты вращения показано на рис. 5.

На отрезке времени с 49 056 по 49 121 мс с помощью пакетного выключателя 13 был отключен блок конденсаторов 14 (см. рис. 1). Это привело к потере источника реактивной мощности электрогенератора, в связи с чем произошло прекращение передачи активной мощности в нагрузку (255 Вт). Процесс исчезновения вращающегося магнитного поля и, как следствие, падение момента сопротивления вращению электрогенератора происходит не мгновенно, а в течение нескольких оборотов. Поскольку математическое описание этого события достаточно трудоемко, то сравнивать экспериментальные данные с расчетными, полученными на основе динамической модели, будем с того момента, где нагрузка с коленчатого вала ПРМ

уже гарантированно снята, например с шестого оборота коленчатого вала после отключения блока конденсаторов. Точка этого момента на рис. 5 обведена квадратом. Также отметим, что после полного сброса электрической нагрузки, параметры, определяющие динамическую модель, будут зависеть только от самого двигателя, что упрощает процесс их нахождения. Именно по этой причине выбран отрезок времени, где происходил полный сброс нагрузки.

Частота вращения и предварение впуска шестого оборота, которые являются начальными условиями для построения колебательного процесса по динамической модели, взяты из самого эксперимента. Дальнейшие теоретические точки получены при использовании только динамической модели. Из рис. 5 видно, что даже спустя 3 колебания частоты вращения коленчатого вала расхождение между экспериментальными и теоретическими данными является удовлетворительной.

Изменение частоты вращения, отнесенное к номинальной частоте ССЧВ,  $\xi$  по оборотам  $i$  при ступенчатом изменении нагрузки для динамической модели одноцилиндрового поршневого двигателя описано формулой [5]

$$\xi(i) = \frac{2A_2 \delta \left( \sqrt{(A_1 B_2 - A_2 B_1)} \right)^i}{\sqrt{4(A_1 B_2 - A_2 B_1) - (A_1 + B_2)^2}} \sin \times \left[ \arcsin \left( \sqrt{1 - \frac{(A_1 + B_2)^2}{4(A_1 B_2 - A_2 B_1)}} \right) \right], \quad (1)$$

где  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $A_2$ ,  $B_2$  — функции параметров динамической системы «ПРМ – нагрузка» в [4];  $\delta$  —

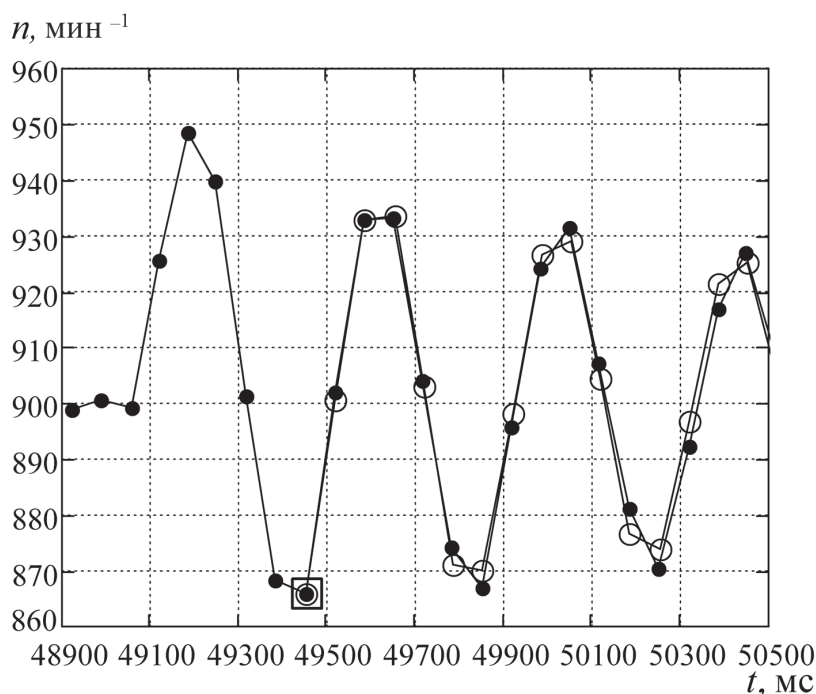


Рис. 5. Изменение частоты вращения  $n$  по времени  $t$  при полном сбросе нагрузки:

● — экспериментальные точки; ○ — теоретические точки; □ — начальная точка сравнения экспериментальных данных с поведением динамической модели

разница углов предварения впуска (град) в установившемся режиме после ступенчатого изменения нагрузки и до ступенчатого изменения нагрузки, отнесенная к  $360^\circ$ .

Принимая во внимание реальные диапазоны изменения параметров ПРМ, используемые в ее динамической модели, из (1) можно приближенно получить относительную величину перерегулирования  $\sigma$ , %, по формуле

$$\sigma \approx \frac{\Delta\theta}{\omega_n} \sqrt{\frac{\dot{M}_0}{J}} 100, \quad (2)$$

где  $J$  — момент инерции ротора рассматриваемой динамической системы,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $\dot{M}_0$  — производная крутящего момента ПРМ по углу предварения впуска в точке регулировочной характеристики, где предварение впуска соответствует установившемуся значению после ступенчатого изменения нагрузки,  $\text{н}\cdot\text{м}/\text{рад}$ ;  $\Delta\theta$  — разница углов предварения впуска в установившемся режиме после ступенчатого изменения нагрузки и до ступенчатого изменения нагрузки, рад;  $\omega_n$  — номинальная угловая скорость коленчатого вала, которая определяется номинальной частотой ССЧВ, рад/с.

Запишем ступенчатое изменение нагрузки  $\Delta N$ , Вт (в линейном приближении зависимости крутящего момента от величины предварения впуска) в виде

$$\Delta N = \omega_n \dot{M}_0 \Delta\theta. \quad (3)$$

Введем определение приведенной производной крутящего момента по углу предварения впуска  $\dot{m}_0$ , рад $^{-1}$ , как

$$\dot{m}_0 = \frac{\dot{M}_0}{M_{\max}}, \quad (4)$$

где  $M_{\max}$  — средний за оборот крутящий момент ПРМ при значении предварения впуска, обеспечивающего максимальную величину этого крутящего момента, н·м.

Запишем мощность ПРМ  $N_{\max}$ , Вт, следующим образом:

$$N_{\max} = \omega_n M_{\max}. \quad (5)$$

Подставляя значения  $\Delta\theta$  и  $\dot{M}_0$ , полученные соответственно из (3) и (4), в (2), с учетом (5) получим

$$\sigma \approx \frac{\Delta\bar{N}}{\omega_n^{3/2}} \sqrt{\frac{N_{\max}}{J\dot{m}_0}} 100, \quad (6)$$

где  $\Delta\bar{N}$  — относительное изменение нагрузки,  $\Delta\bar{N} = \Delta N / N_{\max}$ .

Из формулы (6) можно сделать вывод о способе уменьшения относительной величины перерегулирования за счет увеличения номинальной угловой скорости коленчатого вала. Увеличение момента инерции и приведенной производной крутящего момента по углу предварения впуска также уменьшает перерегулирование, но в меньшей степени. Конструкторские способы увеличения упомянутой производной — это вопрос, требующий отдельного рассмотрения.

---

## Заключение

---

В данной работе показано удовлетворительное совпадение изменения частоты вращения коленчатого вала поршневой расширительной машины с самостабилизацией частоты вращения при изменении нагрузки, построенное на основе динамической модели из [4], с экспериментальными данными. На основе этой динамической модели получена инженерная формула, которая позволяет приближенно определить относительную величину перерегулирования при ступенчатом изменении нагрузки. Сделаны выводы по способу ее уменьшения.

---

## Литература

---

1. **Дубинин В.С.** Вопросы микроэнергетики летательных аппаратов / В кн.: Гагаринские научные чтения по авиации и космонавтике, 1981. М.: Наука, 1983.
2. **Трохин И.С.** О применении поршневых паровых машин на мини-ТЭЦ в зарубежной биоэнергетике // Промышленная энергетика. 2014. № 10. С. 43—44.
3. **ГОСТ 13822—82.** Электроагрегаты и передвижные электростанции дизельные. Общие технические условия.
4. **Дубинин В.С.** Об условиях устойчивого сохранения частоты вращения одной нелинейной неконсервативной системы: Сборник научн. трудов «Колебания, деформация, прочность конструкций дви-

гателей летательных аппаратов». М.: Изд-во МАИ, 1991. С. 15—18.

5. **Шкарупа С.О.** Использование точечного преобразования для аналитического описания переходного процесса в тепловом двигателе дискретного действия // Динамика сложных систем. 2010. № 2. С. 39—42.

---

## References

---

1. **Dubinina V.S.** Voprosy Mikroenergetiki Letatel'nyh Apparatov / V Kn.: Gagarinskie Nauchnye Chtenija Po Aviacii i Kosmonavtike, 1981. M.: Nauka, 1983. (in Russian).
2. **Trohin I.S.** O Primenenii Porshnevyyh Parovyh Mashin na Mini-TJEC v Zarubezhnoj Bioenergetike. Promyshlennaja Energetika. 2014;10:43—44. (in Russian).
3. **GOST 13822—82.** Jelektroagregaty i Peredvizhnye Jelektrostancii Dizel'nye. Obshhie Tehniceskie Uslovija. (in Russian).
4. **Dubinina V.S.** Ob Uslovijah Ustojchivogo Sohraneniya Chastoty Vrashhenija Odnaj Nelinejnoj Nekonservativnoj Sistemy: Sbornik Nauchn. Trudov «Kolebanija, Deformacija, Prochnost' Konstrucij Dvigatel'nyh Apparatov». M.: Izd-vo MAI, 1991:15—18. (in Russian).
5. **Shkarupa S.O.** Ispol'zovanie Tochechnogo Preobrazovanija dlja Analiticeskogo Opisanija Perehodnogo Processa v Teplovom Dvigatele Diskretnogo Dejstvija. Dinamika Slozhnyh Sistem. 2010;2:39—42. (in Russian).

*Статья поступила в редакцию 29.07.2016*