

http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140310  
 УДК 621.438  
 В 57

**IMPACT OF PARAMETERS ALTERATION OF TWO-CIRCUIT GAS  
 TURBINE ENGINE WITH FREE POWER TURBINE ON OPERATIONAL  
 CHARACTERISTICS**

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВУХКАСКАДНОГО ГАЗОТУРБИННОГО  
 ДВИГАТЕЛЯ СО СВОБОДНОЙ СИЛОВОЙ ТУРБИНОЙ  
 НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

**Valerii I. Kharchenko**  
[valerii.kharchenko@nuos.edu.ua](mailto:valerii.kharchenko@nuos.edu.ua)  
 ORCID: 0000-0001-9588-8708  
**Oleh S. Kucherenko**  
**O. I. Matiiuk**

**В. И. Харченко,**  
 канд. техн. наук, доц.<sup>1</sup>;  
**О. С. Кучеренко,**  
 инж.<sup>2</sup>;  
**О. И. Матиюк,**  
 инж.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National University of Shipbuilding, Mykolayiv

<sup>2</sup>SE GTSPC «Zorya-Mashproekt», Mykolayiv

<sup>1</sup>Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

<sup>2</sup>ГП НПКГ «Зоря»–«Машпроект», г. Николаев

**Abstract.** Currently, the diagnosis of the GTE technical condition according to the thermogasdynamical parameters is carried out under the condition of the availability of steady operation mode. There is a multitude of continuously interconnected GTE operation modes in actual operating conditions. These operation modes can be whether steady or unsteady (dynamic). These are the starts, stops, sets and rejections of load, the transitions from one GTE operation mode to another one. One of the tasks of the technical diagnosis onboard system is the automatic identification of the occurrence fact of the GTE steady operation mode to perform the subsequent operations on the diagnosis according to the recorded time-series of the thermogasdynamical parameters. In the existing technical diagnosis onboard system the identification is carried out according to the time series of the thermogasdynamical parameters with the usage of the non-parametric *U*-test. During the trial operation of GTE which has the power of 15 MW it turned out that the identification time of the occurrence fact of the steady mode of the technical diagnosis onboard system was ununiform and unacceptably high in some cases. It required identifying the specific features of time series alteration of thermogasdynamical parameters of the marine type GTE with the power of 15 MW at the operating conditions and formulation of the basic principles of the improvement of the algorithm of the GTE steady operation mode identification in terms of time decrease of the identification and organization of the identification process over the regular time intervals. The study of the time series of the thermogasdynamical parameters of the shipboard type GTE with the power of 15 MW was carried out according to the data accumulated in the archives of the technical diagnosis onboard system under the experiments on the test bench. The thermogasdynamical parameters in the digital form stored in the memory of the technical diagnosis onboard computer system has been understood under the observed values of the thermogasdynamical parameters. The observed values of the thermogasdynamical parameters differ from their true values because of the presence of errors introduced by the measuring channel. In this consideration, the resultant errors of the whole multitude of the measuring channel hardware components starting from the measuring sensor of the thermogasdynamical parameters and finishing with the memory of the technical diagnosis onboard computer system is understood by the measuring channel errors. It also includes the introduction of this thermogasdynamical parameter digitally. There were identified 36 fragments of the GTE tests which correspond to the output and operation of GTE at steady modes under the analysis of the experimental data. The trends of time series of the observed thermogasdynamical parameters occur in all GTE test fragments under the unchanged position of the fuel control unit. After the setting of the GTE operation mode by means of the fuel control unit the trends of the observed parameters increase (decrease) sharply in the first moments, and then their growth (fall) rate decreases gradually over time and trends approach monotonically, almost linearly to the position which corresponds to the steady mode. This consistent pattern should be used in the algorithm of the parameters determination of GTE with the power of 15 MW at steady mode through a certain period

of time after the setting of the GTE operation mode by means of the fuel control unit. The results of the identification algorithm show that the parameters values obtained by the forecasting do not differ from the parameters which correspond to the GTE steady operation mode by more than the average values of the random deviations from the trends.

**Keywords:** thermogasdynamical parameters, steady mode, gas turbine engine.

**Аннотация.** Представлены результаты исследования временных рядов термогазодинамических параметров ГТД судового типа мощностью 15 МВт на эксплуатационных режимах, регистрируемых бортовой системой технического диагностирования. Приведены основные принципы алгоритма распознавания установившегося режима работы ГТД для диагностирования технического состояния по термогазодинамическим параметрам.

**Ключевые слова:** термогазодинамические параметры, установившийся режим, газотурбинный двигатель.

**Анотація.** Наведено результати дослідження часових рядів термогазодинамічних параметрів ГТД судового типу потужністю 15 МВт на експлуатаційних режимах, які реєструються бортовою системою технічного діагностування. Подано основні принципи алгоритму розпізнавання сталого режиму роботи ГТД для діагностування технічного стану за термогазодинамічними параметрами.

**Ключові слова:** термогазодинамічні параметри, сталий режим, газотурбінний двигун.

## REFERENCES

- [1] Venttsel Ye.S. *Teoriya veroyatnostey* [Theory of probability]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 576 p.
- [2] Myuller P., Noyman P., Shtorm R. *Tablitsy po matematicheskoy statistike* [Mathematical statistics tables]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1982. 278 p.
- [3] Novitskiy P.V. *Otsenka pogreshnostey rezultatov izmereniy* [Evaluation of measurement results errors]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1991. 304 p.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Диагностирование технического состояния ГТД по термогазодинамическим параметрам (ТПП) в настоящее время выполняется при установившемся режиме работы. В реальных условиях эксплуатации имеет место множество непрерывно связанных между собой установившихся и неуставившихся (динамических) режимов работы ГТД. Это запуски, остановки, наборы и сбросы нагрузки, переходы с одного режима работы ГТД на другой. Одной из задач бортовой системы технического диагностирования (БСТД) является автоматическое распознавание по регистрируемым временным рядам ТПП факта наступления установившегося режима работы ГТД для выполнения последующих операций по постановке диагноза. В существующей БСТД распознавание производится по временным рядам ТПП с использованием непараметрического U-критерия [2]. В процессе опытной эксплуатации ГТД мощностью 15 МВт оказалось, что время распознавания факта наступления установившегося режима БСТД было неравномерным и в отдельных случаях недопустимо большим.

**ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ** является выявление особенностей изменения временных рядов термогазодинамических параметров ГТД судового типа мощностью 15 МВт на эксплуатационных режимах и формулировка основных принципов совершенствования алгоритма распознавания установившегося режима работы ГТД в направлении уменьшения времени рас-

познавания и организации процесса распознавания через равномерные отрезки времени.

## ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Исследование временных рядов термогазодинамических параметров ГТД судового типа мощностью 15 МВт выполнялось по данным, накопленным в архивах БСТД при проведении экспериментов на испытательном стенде.

Рассматривались следующие термогазодинамические параметры: частота вращения турбокомпрессора низкого давления  $n_1$ , частота вращения турбокомпрессора высокого давления  $n_2$ , давление воздуха за компрессором высокого давления  $P_2$  и температура газа за турбиной низкого давления  $t_4$ .

Под наблюдаемыми значениями ТПП понимались ТПП в цифровом виде, находящиеся в памяти компьютера БСТД. Наблюдаемые значения ТПП отличаются от своих истинных значений наличием ошибок, вносимых измерительным каналом. Под ошибками измерительного канала понимались суммарные ошибки всего множества аппаратных компонентов измерительного канала, начиная от датчика измерения ТПП и заканчивая памятью компьютера БСТД, включая представление этого ТПП в цифровом виде.

Факт установившегося режима работы ГТД в настоящем исследовании определялся с помощью непараметрического U-критерия при анализе интервала временного ряда частоты вращения ТКВД  $n_2$  длиной в 600 с.

При анализе экспериментальных данных было выделено 36 фрагментов испытаний ГТД, соответствующих выходу и работе ГТД на установившихся режимах. Каждый фрагмент испытаний был представлен семейством типовых графиков. В качестве примера на рис. 1–3 представлено семейство типовых графиков, построенных по данным архива параметров БСТД. Так, на рис. 1 изображен график протекания по времени значений  $G_T$  для ГТД мощностью 15 МВт. На рис. 2 показаны в увеличенном масштабе графики наблюдаемых значений параметров  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $P_2$ ,  $t_4$  на временном отрезке от 10235 до 11250 с. На рис. 3 представлены гистограммы и аппроксимирующие – кривые законов распределения случайных ошибок наблюдаемых значений  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $P_2$ ,  $t_4$  на рассматриваемом временном отрезке. Результаты операций анализа следующие.

Во всех фрагментах испытаний ГТД при неизменном положении дозатора топлива имеют место тренды временных рядов наблюдаемых ТГП. После задания режима работы ГТД дозатором топлива тренды наблюдаемых параметров в первые моменты времени резко возрастают (убывают), а затем их скорость роста (падения) постепенно уменьшается и тренды монотонно, практически прямолинейно приближаются к положению, соответствующему установившемуся режиму. Тренды зашумлены слу-

чайными ошибками измерительных каналов. Наилучшей математической моделью трендов оказался полином второй степени. Проверка по критерию согласия Пирсона [1, 3] показала, что гипотеза о нормальности распределения случайных ошибок ТГП в большинстве случаев не отвергается. Так, для параметра  $n_1$  число фрагментов временного ряда, где по критерию согласия Пирсона установлено, что гипотеза не противоречит опытным данным, равняется 27 (общее число рассмотренных фрагментов – 36), для параметра  $n_2$  – 13, для параметра  $P_2$  – 34, для параметра  $t_4$  – 17.

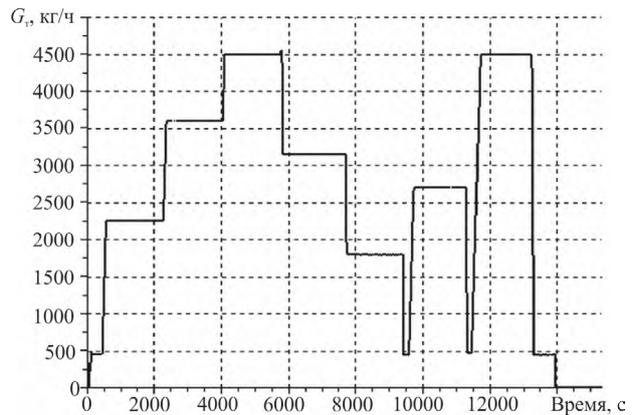
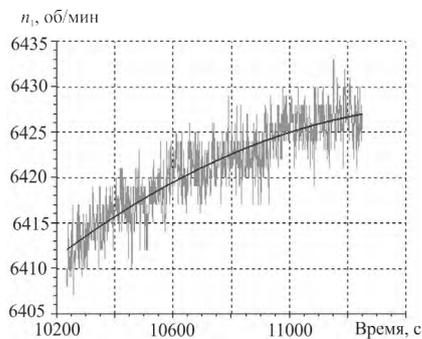
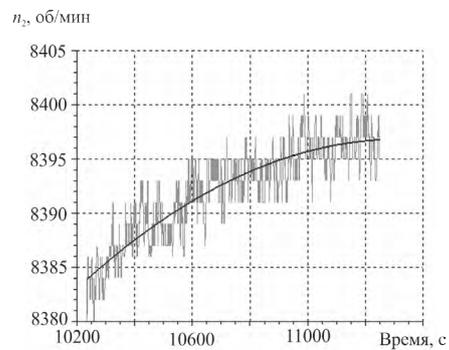


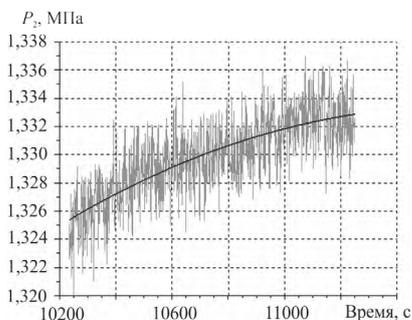
Рис. 1. Изменение расхода топлива в процессе испытания



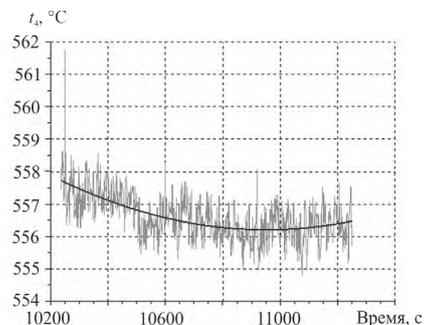
**а**



**б**



**в**



**г**

Рис. 2. Фрагмент установившегося режима работы ГТД по параметрам: **а** – частоте вращения ротора НД; **б** – частоте вращения ротора ВД; **в** – давлению воздуха за компрессором; **г** – температуре газа за ТНД

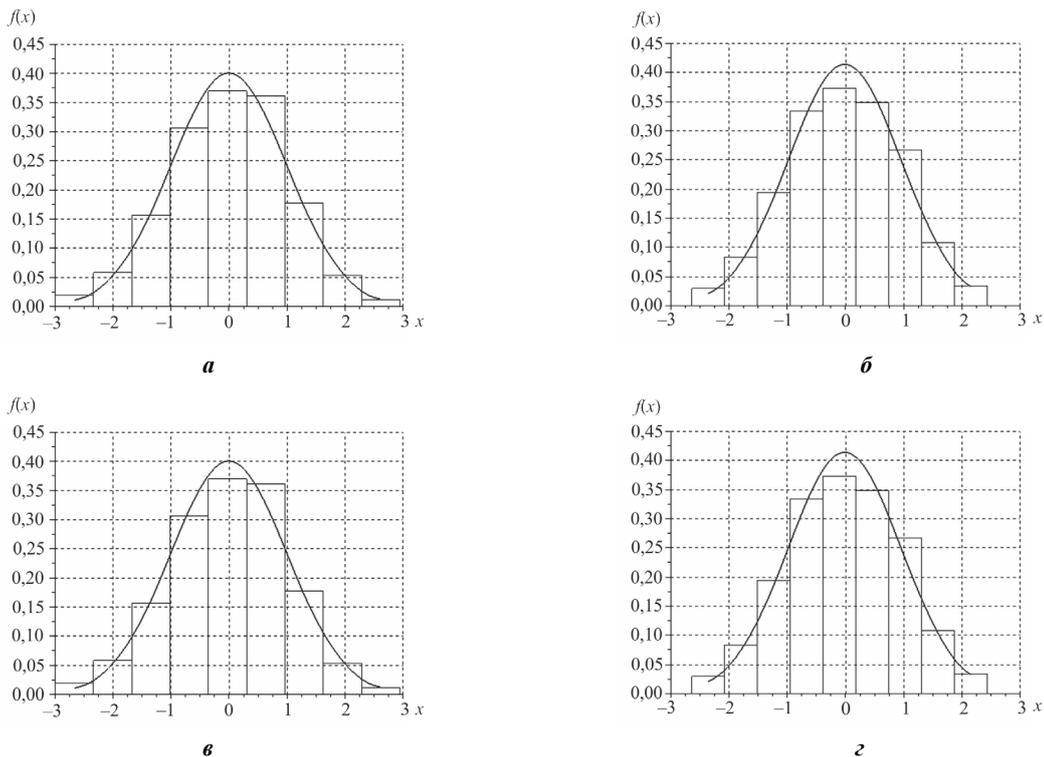


Рис. 3. Гистограммы отклонений от трендов значений параметров: *а* – частоты вращения ротора НД; *б* – частоты вращения ротора ВД; *в* – давления воздуха за компрессором; *г* – температуры газа за ТНД

Причиной отклонения случайных ошибок измерений от нормального закона может служить то обстоятельство, что полином второй степени, принятый для аппроксимации, не во всех фрагментах строго описывает реальный процесс – изменение параметров. Это приводит к тому, что появляются участки фрагментов, где истинные значения параметров не освобождены от случайных составляющих, в результате чего гипотеза о нормальности закона распределения случайных ошибок по критерию Пирсона отвергается. Для фрагментов испытаний ГТД определены численные значения отклонений от тренда наблюдаемых значений параметров ГТД:

	Средние значения	Максимальные значения
$\pm n_1$ , об/мин	6,3	20,0
$\pm n_2$ , об/мин	6,5	15,0
$\pm P_2$ , МПа	0,006	0,009
$\pm t_4$ , °С	2,0	4,0

Как показывает анализ, характер протекания тренда наблюдаемых значений ТГП по времени не связан со случайными ошибками измерительного канала и обусловлен тепловой инерционностью роторно-статорных элементов конструкции ГТД. Тренды каждого из временных рядов параметров  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $P_2$ ,  $t_4$  на рассматриваемом отрезке времени могут в различных комбинациях возрастать, убывать, оставаться неизменными. Количественно это описывается через отклонения параметров  $\Delta n_1$ ,  $\Delta n_2$ ,  $\Delta P_2$ ,  $\Delta t_4$ , определенных как разность между значениями параметра в на-

чале и конце наблюдаемого отрезка времени. Анализ с помощью математической модели ГТД отклонений  $\Delta n_1$ ,  $\Delta n_2$ ,  $\Delta P_2$ ,  $\Delta t_4$ , при законе поддержания режима ГТД  $G_{\text{топ}} = \text{const}$ , каждого из 36 фрагментов испытаний ГТД показывает следующее:

- в 18 фрагментах причина тренда наиболее достоверно объясняется изменением КПД турбокомпрессора высокого давления;
- в 14 фрагментах причина тренда наиболее достоверно объясняется изменением расхода топлива ГТД;
- в двух фрагментах причина тренда наиболее достоверно объясняется изменением температуры воздуха на входе в ГТД;
- в одном фрагменте причина тренда наиболее достоверно объясняется изменением КПД турбокомпрессора низкого давления;
- в одном фрагменте причина тренда не выяснена.

Для тех фрагментов испытаний ГТД, у которых тренд объясняется изменением КПД турбокомпрессора высокого давления, было замечено, что если происходит переход с малого режима работы ГТД на большой, то параметры ГТД изменяются так же, как если бы происходило улучшение КПД турбокомпрессора высокого давления. И наоборот, если происходит переход с большого режима работы ГТД на малый, то параметры ГТД изменяются так же, как если бы происходило ухудшение КПД турбокомпрессора высокого давления.

Алгоритм определения факта наступления установившегося режима БСТД по временному ряду  $n_2$  с использованием U-критерия весьма жесткий. По сути, он предполагает, что при установившемся режиме работы ГТД временной ряд параметра  $n_2$  за текущий отрезок времени 600 с аппроксимируется горизонтальной прямой, зашумленной случайными ошибками. В математическом плане для исправного ГТД при неизменных внешних условиях такой алгоритм представляется верным. Алгоритм был отлажен по экспериментальным данным, полученным на испытаниях ГТД UGT 15000+ с законом регулирования ГТД  $n_2 = \text{const}$ . Время определения факта наступления установившегося режима ГТД не превышало 10...15 мин. Однако при использовании закона регулирования ГТД  $G_{\text{топ}} = \text{const}$  время определения БСТД факта наступления установившегося режима ГТД в отдельных случаях доходило до 45 мин и более.

Анализ временных рядов ТПП показывает, что время достижения установившегося режима ГТД в большой мере зависит от предыстории процесса работы ГТД. Наибольшее время достижения установившегося режима ГТД имело место при выходе на режим холостого хода ГТД после запуска и при выходе на заданный режим после холостого хода. Так, в процессе проверки работы БСТД ГТД на испытательном стенде при выходе на режим 0,7 по мощности ГТД после холостого хода удалось выйти на стационарный режим работы ГТД только за 45 мин. При переходах по относительной мощности ГТД от режима 0,4 на режим 0,7, от 0,7 на режим 0,9 и от 0,9 на режим 0,6 установившийся режим достигался за 15...20 мин работы ГТД.

Качественно зависимость времени достижения установившегося режима ГТД может быть описана предложениями: «При переходе на какой-либо режим работы ГТД из холодного состояния время достижения установившегося режима ГТД большое», «Если набирать или сбрасывать режим работы ГТД маленькими шагами, то время достижения установившегося режима ГТД небольшое», «Если набирать или сбрасывать режим работы ГТД большими шагами, то время достижения установившегося режима ГТД будет большим».

В реальных условиях эксплуатации ГТД при работе на режиме, который на практике считается установившимся, всегда имеет место тренд параметров. Этот тренд объясняется изменениями внешних условий, тепловой инерционностью роторно-статорных элементов конструкции ГТД, ухудшением технического состояния проточной части. По этой причине временной ряд параметра  $n_2$ , по которому БСТД распознает факт установившегося режима работы ГТД, не является стацио-

нарным и, соответственно, U-критерий формируют признаки, по которым режим считается неустановившимся.

Тепловая инерционность роторно-статорных элементов конструкции и скорость ухудшения технического состояния проточной части, обусловленная загрязнением и естественным износом, являются индивидуальными свойствами конкретного ГТД. Поэтому улучшить алгоритм БСТД в направлении уменьшения времени постановки диагноза после выхода ГТД на заданный режим работы возможно путем определения квазиустановившегося режима работы ГТД с дальнейшим прогнозированием значений параметров ГТД по математической модели тренда до значений, соответствующих установившемуся режиму работы ГТД.

Как отмечалось ранее, после задания режима работы ГТД дозатором топлива тренд наблюдаемых параметров в первые моменты времени резко возрастает (убывает), а затем с течением времени скорость роста (падения) постепенно уменьшается и тренд монотонно, практически прямолинейно приближается к положению, соответствующему установившемуся режиму. Эту закономерность естественно использовать в алгоритме определения параметров ГТД мощностью 15 МВт на установившемся режиме через определенный отрезок времени после задания режима работы ГТД дозатором топлива. Наиболее удачным оказался следующий алгоритм: «Если прошло не менее 600 с работы ГТД после задания режима работы дозатором топлива, то считать, что режим работы ГТД установившийся. Параметры ГТД на установившемся режиме получить прогнозированием текущих значений параметров на интервал упреждения в 300 с по линейным моделям трендов, построенным по данным временных рядов параметров за последние текущие 200 с».

Результаты тестирования упомянутого алгоритма показывают, что значения параметров, полученные прогнозированием, отличаются от параметров, соответствующих установившемуся режиму работы ГТД, не более чем на средние значения случайных отклонений от трендов.

Исходя из изложенного, в качестве рекомендаций по улучшению алгоритма БСТД ГТД мощностью 15 МВт в направлении уменьшения времени распознавания и организации процесса распознавания через равномерные отрезки времени принимается сформулированный вариант алгоритма.

На рис. 4 в качестве примера тестирования алгоритма представлены графики замеренных и спрогнозированных на установившийся режим ГТД параметров  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $P_2$ ,  $t_4$ , построенные по данным рассматриваемого примера.

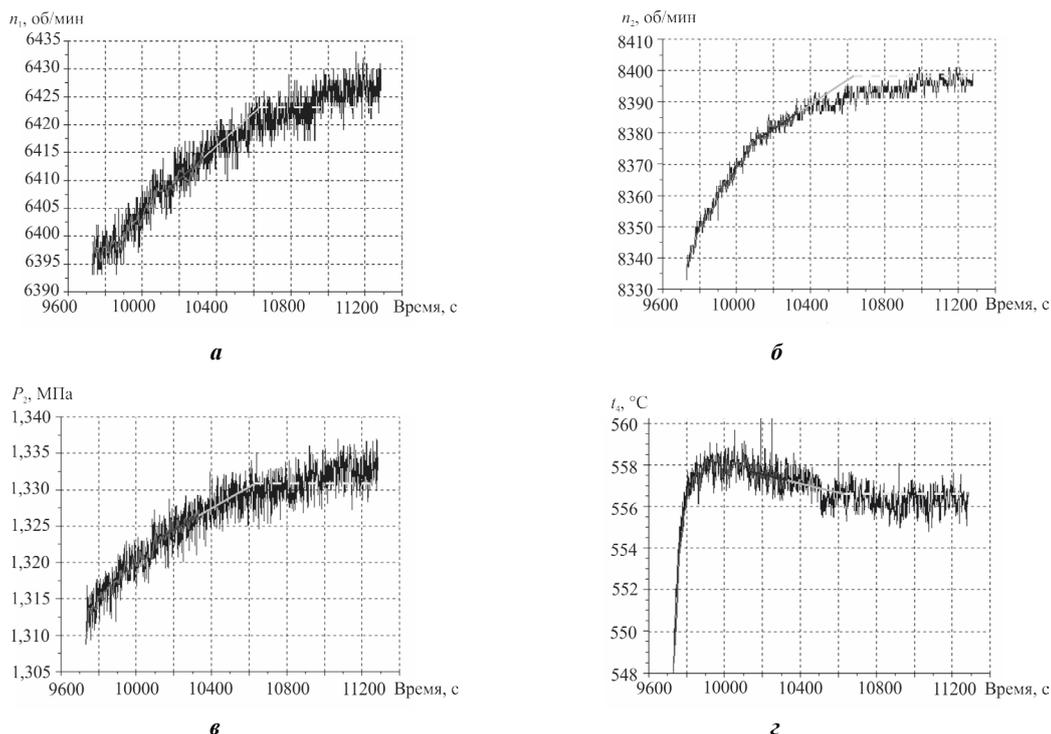


Рис. 4. Демонстрация работы алгоритма прогнозирования на установившемся режиме значений параметров: *а* – частоты вращения ротора НД; *б* – частоты вращения ротора ВД; *в* – давления воздуха за компрессором; *г* – температуры газа за ТНД

### ВЫВОДЫ

1. При работе ГТД мощностью 15 МВт на режиме с неизменным положением дозатора топлива имеет место тренд ТГП, зашумленный случайными ошибками измерительного канала.

2. Гипотеза о нормальном распределении случайных составляющих ошибок измерительного канала БСТД для параметров  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $P_2$ ,  $t_4$  в большинстве случаев не противоречит опытными данным.

3. Причина тренда ТГП ГТД объясняется тепловой инерционностью роторно-статорных элементов конструкции ГТД, проявляющейся через изменение КПД турбокомпрессора высокого давления.

4. Предложенные основные принципы алгоритма определения наличия установившегося режима работы ГТД позволяют усовершенствовать БСТД в части уменьшения времени распознавания и организации процесса распознавания через равномерные отрезки времени.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Вентцель, Е. С.** Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.
- [2] **Мюллер, П.** Таблицы по математической статистике [Текст] / П. Мюллер, П. Нойман, Р. Шторм ; пер. с нем. и предисл. В. М. Ивановой – М. : Финансы и статистика, 1982. – 278 с.
- [3] **Новицкий, П. В.** Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / П. В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.

© В. І. Харченко, О. С. Кучеренко, О. І. Матіюк

Надійшла до редколегії 11.04.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. *Г. Ф. Романовський*