

УДК 621.438
Х 22

СПОСОБ ЗАЩИТЫ ОТ РАЗГОНА ТУРБИН ДВУХКАСКАДНОГО ГТД

В.И. Харченко, канд. техн. наук, доц.;¹

А.А. Филоненко, канд. техн. наук, зам. директора²

¹Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

²ГП НПКГ «Зоря»– «Машпроект», г. Николаев

Аннотация. Представлены процессы, происходящие в двухкаскадных газотурбинных двигателях при разрушении одного из валов газогенератора. Рассмотрен один из способов защиты турбин при отсоединении от компрессора.

Ключевые слова. вал, газогенератор, турбокомпрессор, помпаж, канал защиты.

Анотація. Наведено процеси, які відбуваються у двокаскадних газотурбінного двигуна при руйнуванні одного з валів газогенератора. Розглянуто один зі способів захисту турбін при від'єднанні від компресора.

Ключові слова. вал, газогенератор, турбокомпресор, помпаж, канал захисту.

Abstract. The processes, which take place in two-cascades GT at the process of destruction of one of gas generator billows are presented. One of the methods of protection of turbines is considered during the detachment from the compressor.

Keywords. billow, gas generator, turbo-compressor, surging, protection channel.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Конструкция газогенераторов двухкаскадных газотурбинных двигателей (ГТД) содержит две турбины: высокого (ТВД) и низкого (ТНД) давлений, приводящие во вращение соответствующие компрессоры высокого (КВД) и низкого (КНД) давления. При этом вал, соединяющий КНД и ТНД проходит внутри турбокомпрессора высокого давления. Конструкция ГТД, в том числе и ее элементы, соединяющие турбины и соответствующие компрессоры, рассчитана на длительную работу в пределах назначенного ресурса. Крайне редко в процессе доводки и эксплуатации ГТД имеют место отсоединения турбин газогенератора от соответствующих ком-

прессоров. В таких случаях фиксируются помпажный хлопок и превышение температуры газов за турбиной.

В авариях такого типа из-за помпажа и резкого роста температуры газа t_{04} подача топлива в двигатель может быть прекращена по помпажу или превышению t_{04} с запаздыванием приблизительно 1 с. Несмотря на это, предпочтительно, чтобы в такой ситуации аварийная команда выдавалась непосредственно по причине «разгона» ротора турбины и с меньшим запаздыванием.

Быстродействие защиты свободной турбины от превышения допустимой частоты вращения обеспечивается использованием независимого (автономного от системы управления ГТД) канала защиты

при непосредственном достижении значения предельной величины с выдачей команды на аварийное прекращение подачи топлива в двигатель. Быстродействие такой защиты составляет приблизительно 0,1...0,2 с. Однако организовать защиту турбины газогенератора аналогично защите свободной турбины не представляется возможным по следующим причинам. В ограниченном объеме опорных венцов, в которых расположены подшипники роторов турбин, не размещаются зубчатые индукторы частоты вращения роторов ТВД и ТНД. Кроме этого, индукционные термостойкие датчики частоты вращения, которые необходимо разместить в опорных венцах, рассчитаны на уровень температуры опоры за свободной турбиной. В пространстве ТНД и ТВД уровень температур в опорах значительно выше, а термостойкие датчики в таких условиях неработоспособны. Поэтому известные отечественные и зарубежные двухкаскадные ГТД не имеют непосредственной защиты турбин газогенератора от «разгона», измерение частот вращения роторов низкого и высокого давлений обеспечивается постановкой датчиков на роторах КНД и КВД [1–5].

В последнее время иностранные заказчики ГТД предъявляют требование о необходимости соответствия двигателей американскому стандарту API 616 [6]. Одним из требований этого стандарта (п. 3.4.4.6) является следующее: «Многовальные турбины должны быть снабжены отдельными устройствами защиты от превышения частоты вращения каждого вала». Следует отметить, что в ГОСТах, действовавших на территории бывшего СССР, а ныне действующих в Украине и России, подобное требование отсутствует. Несмотря на это, разработка защиты турбин газогенератора двухкаскадных ГТД от разгона *актуальна*.

ЦЕЛЬ РОБОТЫ — рассмотреть процессы, происходящие в двухкаскад-

ных ГТД при разрушении одного из валов газогенератора, и организовать защиту турбин двухкаскадного газогенератора при отсоединении от компрессоров.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

На установившихся рабочих режимах двухкаскадного ГТД соблюдается равенство крутящих моментов компрессора и турбин на каждом из валов газогенератора:

$$M_k = M_T.$$

При этих условиях зависимость частоты вращения КНД n_1 от частоты вращения КВД n_2 («скольжение роторов») при изменении температуры воздуха на входе в двигатель ДВ71 $t_{в.вх}$ в заданном диапазоне $-60...+45$ °С приведена на рис. 1.

На этом рисунке поле изменения «скольжения» роторов ограничено максимальным режимом $1,2N_{ном}$ (при отрицательных $t_{в.вх}$ начиная с $t_{в.вх} = -2$ °С) и номинальной частотой вращения КВД $n_2 = 14100$ об/мин при $t_{в.вх} > +15$ 0С.

С учетом рис. 1 на рис. 2 построены зависимости разности частот вращения $\Delta n = n_2 - n_1 = f(n_2)$ роторов КВД n_2 и КНД n_1 при различных значениях $t_{в.вх}$.

Из рис. 2 видно, что при работе двигателя ДВ71 в качестве привода электрогенератора в зоне от холостого хода генератора (ХХГ) до режима $1,2N_{ном}$ изменение параметра Δn происходит в определенном диапазоне. Минимальная и максимальная величины Δn составляют соответственно 2000 об/мин при $t_{в.вх} = -60$ °С и 4580 об/мин при $t_{в.вх} = +45$ °С.

В случае отсоединения турбины от соответствующего компрессора уравнения движения компрессора и турбины имеют следующий вид:

$$\frac{\pi}{30} I_k \left(\frac{dn}{dt} \right)_k = -M_k;$$

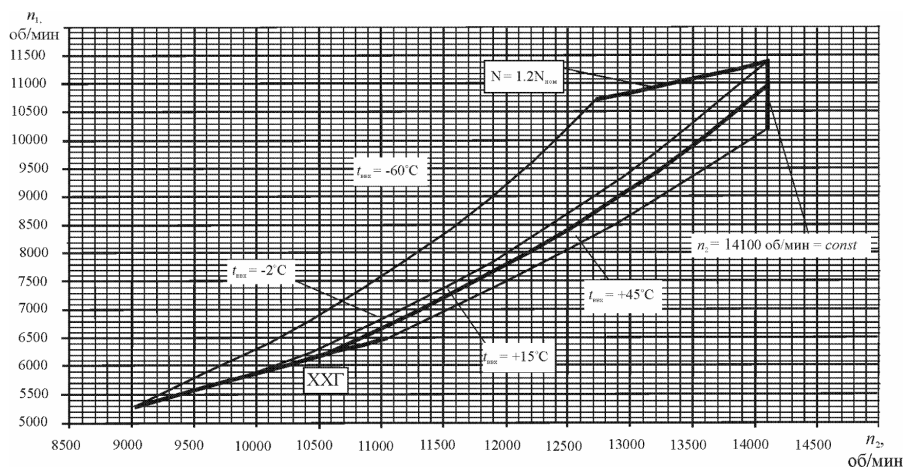
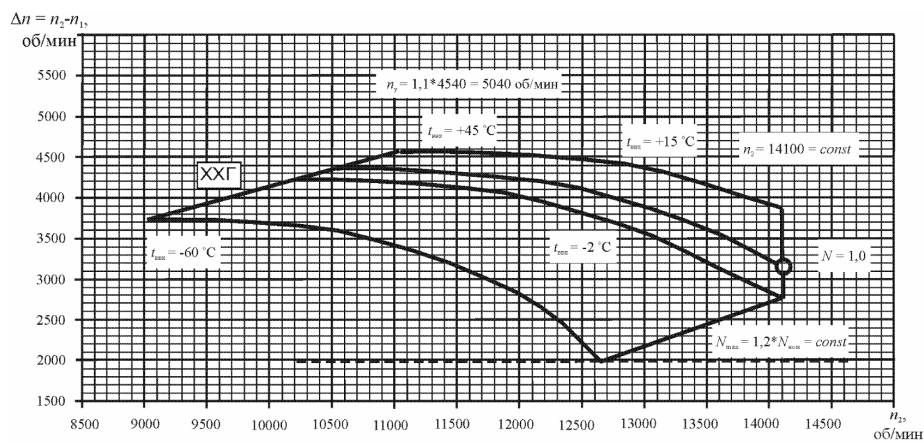
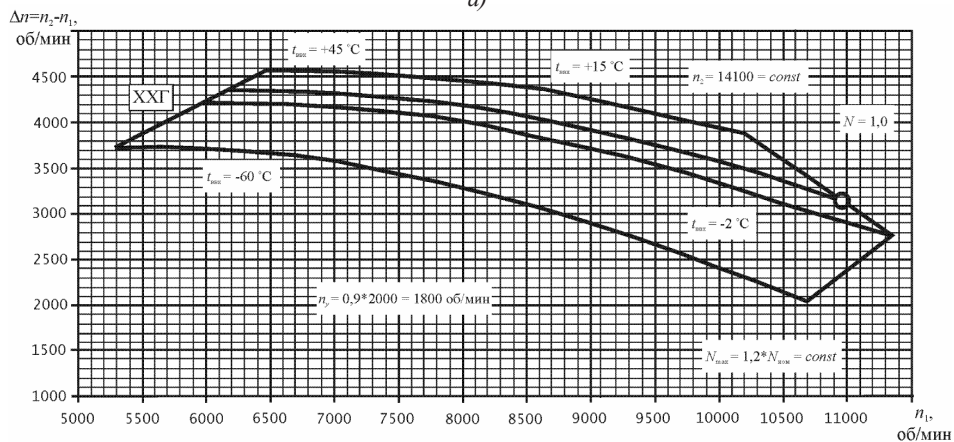


Рис. 1. Зависимость $n_1 = f(n_2)$ двигателя ДВ71



а)



б)

Рис. 2. Зависимости разности частот вращения компрессоров высокого и низкого давлений $n = n_2 - n_1$ от частоты вращения КВД n_2 при различных значениях $t_{в.вх}$ (а) и от частоты вращения КНД n_1 при различных значениях $t_{в.вх}$ (б)

$$\frac{\pi}{30} I_T \left(\frac{dn}{dt} \right)_T = M_T,$$

где I_k, M_k и I_T, M_T моменты инерции и крутящие моменты соответственно ротора компрессора и турбины.

Если принять номинальные значения M_k и M_T для двигателя ДВ71, а также величины I_k и I_T , рассчитанные по геоме-

$$\begin{aligned} \left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{ТВД}} &= 1600 \frac{\text{об/мин}}{\text{с}}; & \left(-\frac{dn}{dt} \right)_{\text{КВД}} &= -2500 \frac{\text{об/мин}}{\text{с}}; \\ \left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{ТНД}} &= 1630 \frac{\text{об/мин}}{\text{с}}; & \left(-\frac{dn}{dt} \right)_{\text{КНД}} &= -1710 \frac{\text{об/мин}}{\text{с}}. \end{aligned}$$

Кроме разгона и торможения отсоединившихся роторов турбин и компрессоров в двухкаскадном ГТД происходят и другие процессы.

При отсоединении ТВД от КВД происходят разгон ротора ТВД и торможение ротора КВД (при $n_1 = \text{const}$), а также уменьшение пропускной способности КВД и дросселирование выхода за КНД. При этом за КНД повышается давление воздуха, увеличивается его степень сжатия, рабочая точка на характеристике КНД смещается за границу устойчивой работы, а КНД попадает в помпаж. При помпаже происходят уменьшение расхода воздуха через двигатель и увеличение температуры газа за камерой сгорания и по тракту турбин. При отсоединении ТНД от КНД, разгоне ротора ТНД и торможении ротора КНД (при $n_2 = \text{const}$) происходят уменьшение пропускной способности КНД и дросселирование входа в КВД. При этом на входе в КВД понижается давление воздуха, увеличивается его степень сжатия, рабочая точка на характеристике КВД смещается за границу его устойчивой работы, а КВД попадает в помпаж с последующим увеличением температуры газа по тракту двигателя.

Организация защиты турбин двухкаскадного газогенератора при отсоединении от компрессоров [7]. При

трическим размерам соответствующих турбин и компрессоров, то можно определить квазистатические (мгновенные) ускорения турбин и торможения компрессоров сразу же после их отсоединения. Полученные указанным образом ускорения (dn/dt) и торможения ($-dn/dt$) роторов двигателя составили

обрыве одного из внутренних валов газогенератора происходят резкое ускорение ротора турбины и торможение ротора компрессора. При этом наблюдается очень быстрое отклонение разности частот вращения компрессоров $\Delta n = n_2 - n_1$ от исходного значения в большую или меньшую сторону. Следовательно, разгон турбины после отсоединения от компрессора можно контролировать косвенно через торможение соответствующего компрессора по изменению параметра $\Delta n = n_2 - n_1$.

С учетом поля изменения Δn от ХХГ до $1,0N_{\text{ном}}$ в рабочем диапазоне температур воздуха на входе тв.вх (см. рис. 2) следует считать, что увеличение Δn более $\Delta n^{\text{max}} = 4580$ об/мин или уменьшение менее $\Delta n^{\text{min}} = 2000$ об/мин возможно только при отсоединении одной из турбин газогенератора от компрессора.

С учетом сказанного можно организовать защиту двигателя ДВ71 от обрыва внутренних валов путем постоянного контроля системой управления замеренной переменной величины Δn и сравнения ее с двумя постоянными уставками. Одна из установок должна быть больше Δn^{max} , а другая меньше Δn^{min} на приблизительно 7...10 %. Величины установок назначаются в зависимости от предельных частот вращения турбин и быстро-

действия защиты. На рис. 2, а обозначена уставка

$$\Delta n_y^{\max} = 1,1 \cdot \Delta n^{\max} = 1,1 \cdot 4580 = 5040 \text{ об/мин,}$$

а на рис. 2, б уставка

$$\Delta n_y^{\min} = 0,9 \cdot \Delta n^{\min} = 0,9 \cdot 2000 = 1800 \text{ об/мин.}$$

Если принять, что в кратковременных процессах разгона роторов до момента срабатывания защиты величины торможения соответствующего компрессора постоянны и равны номинальным значениям (фактически со снижением частот вращения они уменьшаются), можно определить запаздывание при срабатывании системы защиты на режиме $1,0N_{\text{ном}}$.

При отсоединении ТНД от КНД происходит увеличение величины Δn с 3120 до 5040 об/мин, а с учетом величины $\left(\frac{dn}{d\tau}\right)_{\text{КНД}} = -1710 \frac{\text{об/мин}}{\text{с}}$ время запаздывания при срабатывании защиты составит

$$\Delta \tau_1 = (3120 - 5040)/(-1710) = 1,12 \text{ с.}$$

За указанное время запаздывания частота вращения ротора ТНД увеличится на 1826 об/мин и составит 13226 об/мин, что соответствует увеличению частоты вращения ТНД относительно номинального значения на 16 %.

При отсоединении ТВД от КВД происходит уменьшение величины Δn с 3120 до 1800 об/мин, а с учетом величины $\left(\frac{dn}{d\tau}\right)_{\text{КВД}} = -2500 \frac{\text{об/мин}}{\text{с}}$ время запаздывания при срабатывании защиты составит

$$\Delta \tau_2 = (1800 - 3120)/(-2500) = 0,53 \text{ с.}$$

За указанное время запаздывания частота вращения ротора ТВД увеличится на 848 об/мин и составит 14948 об/мин, что соответствует увеличению частоты вращения ТВД относительно номинального значения на 6%.

Из рис. 2, а следует, что при работе при $t_{\text{в.вх}} > 15 \text{ }^\circ\text{C}$ время $\Delta \tau_1$ будет умень-

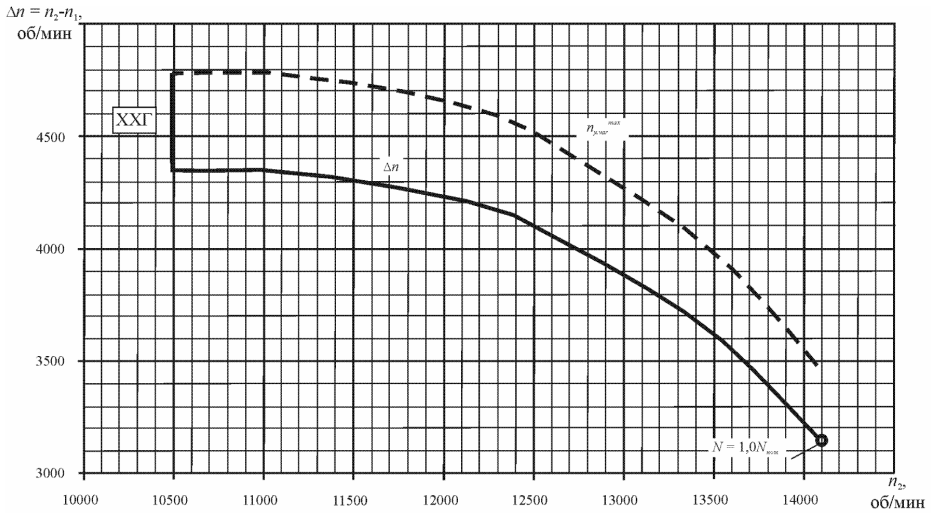
шаться, а при $t_{\text{в.вх}} < 15 \text{ }^\circ\text{C}$ будет увеличиваться. Из рис. 2, б следует, что при работе при $t_{\text{в.вх}} > 15 \text{ }^\circ\text{C}$ время $\Delta \tau_2$ будет увеличиваться, а при $t_{\text{в.вх}} < 15 \text{ }^\circ\text{C}$ будет уменьшаться.

В связи с большими величинами ускорений роторов турбин после отсоединения от соответствующих компрессоров целесообразно время запаздывания при срабатывании защиты путем контроля величины $\Delta n = n_2 - n_1$ уменьшить до минимума. Из анализа параметров на рис. 2 следует, что время запаздывания $\Delta \tau_1$ и $\Delta \tau_2$ является следствием достаточно широкой зоны работы двигателя по Δn из-за расслоения зависимостей $\Delta n = f(n_2)$ и $\Delta n = f(n_1)$ от $t_{\text{в.вх}}$. С целью уменьшения времени запаздывания целесообразно использовать в системе автоматического управления, реализующей предлагаемую систему защиты, при формировании параметра Δn не замеренные величины n_2 и n_1 , а приведенные к $t_{\text{в.вх}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$. В этом случае при любой величине $t_{\text{в.вх}}$ зависимости $\Delta n = f(n_2)$ и $\Delta n = f(n_1)$ будут однолинейными. Для сохранения высокого быстродействия во всем рабочем диапазоне режимов целесообразно уставку срабатывания защиты принять переменной — на 10% выше и ниже фактических величин Δn на установившихся режимах. Зависимости $\Delta n = f(n_2)$ и $\Delta n = f(n_1)$ при $t_{\text{в.вх}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ и соответствующие переменные уставки срабатывания защиты $\Delta n_{\text{вар}}^{\min}$, $\Delta n_{\text{вар}}^{\max}$ приведены на рис. 3.

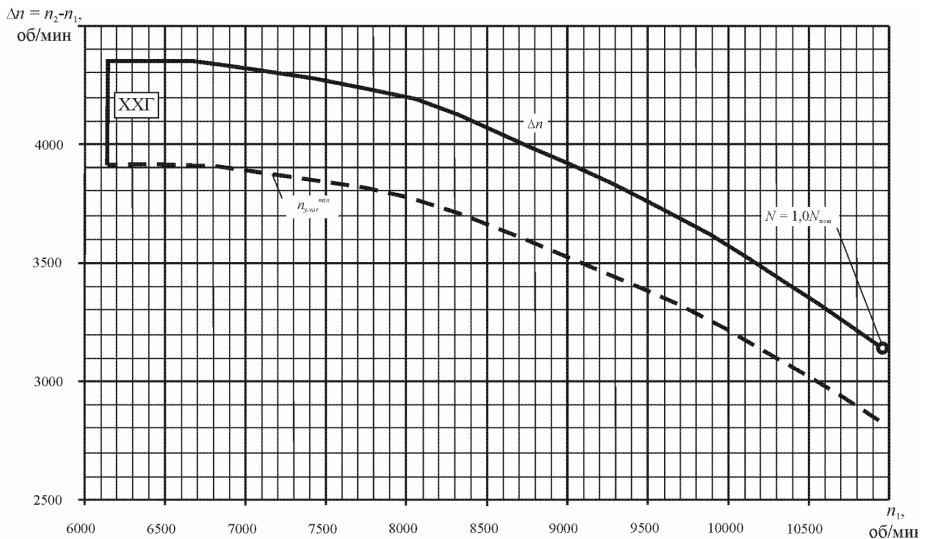
С учетом номинальных значений величин торможения обоих компрессоров можно определить запаздывание при срабатывании системы защиты по приведенному параметру $\Delta n_{\text{пр}} = n_{2\text{пр}} - n_{1\text{пр}}$.

Тогда при отсоединении ротора ТНД время запаздывания при срабатывании защиты

$$\Delta \tau_1 = \frac{\Delta n_{\text{пр}} - 1,1 \Delta n_{\text{пр}}}{-\left(\frac{dn}{dt}\right)_{\text{КНД}}}$$



a)



б)

Рис. 3. Зависимости разности частот вращения компрессоров высокого и низкого давлений Δn на установившихся режимах n : а — установка настройки защиты $n_{2\text{звар}}^{\text{max}}$ от частоты вращения КВД n_2 при $t_{\text{в.вх}} = 15^\circ\text{C}$; б — установка настройки защиты $n_{1\text{звар}}^{\text{max}}$ от частоты вращения КНД n_1 при $t_{\text{в.вх}} = 15^\circ\text{C}$

$$\Delta\tau_1 = \frac{3120 - 1,1 \cdot 3120}{-1710} = 0,18 \text{ с.}$$

Соответственно при отсоединении ротора ТВД

$$\Delta\tau_2 = \frac{\Delta n_{\text{пр}} - 1,1 \Delta n_{\text{пр}}}{-(dn/dt)_{\text{КНД}}}$$

$$\Delta\tau_2 = \frac{0,9 \cdot 3120 - 3120}{-2500} = 0,13 \text{ с.}$$

За указанное время запаздывания частоты вращения роторов турбин увеличатся не более чем на следующие величины:

$$\text{ТНД} - \text{на } \Delta n_{\text{ТНД}} = \Delta\tau_1 \left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{ТНД}}$$

$$\Delta n_{\text{ТНД}} = 0,18 \cdot 1630 = 295 \text{ об/мин;}$$

$$\text{ТВД} - \text{на } \Delta n_{\text{ТВД}} = \Delta \tau_2 \left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{ТВД}}$$

$$\Delta n_{\text{ТВД}} = 0,13 \cdot 1600 = 210 \text{ об/мин.}$$

С учетом номинальных значений n_1 и n_2 (см. рис. 1) частоты вращения ТНД и ТВД составят 11695 и 14310 об/мин, а относительное увеличение соответственно 2,70 и 1,44 %. Таким образом, в аварийной ситуации после увеличения частоты вращения ТНД и ТВД на указанные величины будет выдана аварийная команда на полное прекращение подачи топлива в камеру сгорания двигателя быстродействующим клапаном за время приблизительно равное 0,15 с.

ВЫВОДЫ

1. В связи с большими величинами ускорений роторов турбин после отсоединения от соответствующих компрессоров целесообразно время за-

паздывания при срабатывании защиты путем контроля величины разности частот вращения компрессоров привести к $t_{\text{в.вх}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Для сохранения высокого быстродействия защиты во всем рабочем диапазоне режимов целесообразно уставку срабатывания защиты принять переменной – на 10 % выше и ниже фактических величин разности частот вращения компрессоров на установившихся режимах.

3. В аварийной ситуации, после увеличения частоты вращения ТНД и ТВД на указанные величины будет выдана аварийная команда на полное прекращение подачи топлива в камеру сгорания двигателя быстродействующим клапаном за время, что приведет к увеличению частоты вращения ТНД и ТВД на величины, которые являются некритическими.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Артемов, Г. А.* Судовые установки с газотурбинными двигателями [Текст] / Г. А. Артемов, В. М. Горбов, Г. Ф. Романовский. — Николаев : УГМТУ, 1997. — 233 с.
- [2] *Горбов, В. М.* Основы технической эксплуатации судовых газотурбинных установок [Текст] / В. М. Горбов. — Николаев : УГМТУ, 1996. — 139 с.
- [3] Декларацийний патент на винахід UA 1760 C1. Спосіб захисту від разгону турбіни газотурбінного двигуна [Текст] / Берестнев Б. С., Майорович Б. Д., Качан О. Г.; заявл. 19.07.92 ; опубл. 25.10.94, Бюл. № 3.
- [4] Основы проектирования газотурбинных двигателей и установок [Текст] / Васильев Б. П., Коваль В. А., Канаков В. В., Павленко Г. В., Романов В. В. — Х. : Контраст, 2005. — 376 с.
- [5] *Романовський, Г. Ф.* Сучасні газотурбінні агрегати [Текст] : в 2 т. Т. 1 : Агрегати виробництва України та Росії / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. — Миколаїв : НУК, 2005. — 344 с.
- [6] Стандарт 616 (API). Газовые турбины для применения в нефтяной, химической и газовой промышленности [Текст]. — 4-е изд. — Вашингтон : Амер. нефтяной ин-т, 1998.
- [7] *Харченко, В. И.* Защита турбин двухкаскадного газотурбинного двигателя / В. И. Харченко, А. А. Филоненко, Б. Д. Майорович // Зб. наук. пр. НУК. — Миколаїв : НУК, 2007. — № 4 (415). — С. 78–86.