

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЛИТВЯК ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 681.5.03


ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДЕЛІ І МЕТОДИ АНАЛІЗУ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В
СИСТЕМІ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТУРБОВАЛЬНОГО
ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА ВЕРТОЛЬОТА**

Спеціальність 05.13.03 – Системи та процеси керування
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 О.М. Литвяк

*Ідентичність
за збігом з іншими
примірниками дисертації*

Науковий консультант
Качанов Петро Олексійович,
доктор технічних наук, професор



Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Литвяк О.М. Моделі і методи аналізу динамічних процесів в системі автоматичного керування турбовального газотурбінного двигуна вертольота. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.03 – Системи та процеси керування – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Міністерство освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертаційна робота присвячено вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми прогнозування та усунення розвитку автоколивань в системі автоматичного регулювання (САР) обертів вільної турбіни турбовального газотурбінного двигуна (ГТД) вертольота на основі розробки відповідних математичних моделей і методів. В результаті аналізу стану проблеми встановлено, що на даний момент проблема розвитку автоколивань в САР обертів вільної турбіни турбовальних ГТД вертольотів з гідромеханічною системою регулювання вирішено не повністю, що обумовило необхідність удосконалення класичного математичного інструментарію. У дисертаційній роботі розроблено комплекс взаємопов'язаних моделей динаміки САР обертів вільної турбіни турбовального ГТД вертольота і нелінійної поелементної моделі статичних характеристик гідромеханічного регулятора. На підставі поглиблених експериментальних досліджень процесів і характеристик елементів гідромеханічного регулятора отримані нові данні, які дозволили усунути протиріччя у математичному представленні функцій елементів САР та удосконалити їх математичні моделі. Подальший розвиток отримали методи дослідження автоколивань у складних механічних системах та визначено критерій для прогнозування автоколивань в САР обертів вільної турбіни турбовального ГТД при його наземних випробуваннях на гідрогальмівної установці та льотних випробуваннях у складі

дводвигуневої силової установці вертольоту. Розроблені моделі і отримані результати досліджень складають основу методу прогнозування схильності САР обертів вільної турбіни турбовального ГТД до розвитку автоколивань. Для забезпечення коректних наземних випробувань турбовальних ГТД вертольотів в роботі вперше сформульовані вимоги до динамічних характеристик гідрогальмівної установки та обґрунтовано закон регулювання її завантаженням, що забезпечує повну емуляцію характеристик несучих гвинтів вертольотів. Достовірність нових наукових положень і висновків дисертаційної роботи підтверджуються результатами експериментальних даних, отриманих при дослідженнях фізичних об'єктів. Практична значущість отриманих результатів полягає в тому, що розроблені методи і моделі дозволяють прогнозувати схильність насосів-регуляторів типу НР-3 (ДП ХМЗ «ФЕД», Україна) до розвитку автоколивань без виконання моторних випробувань, скоротити час відновлення та усунути проблему автоколивань для двигунів типу ТВ3-117 (АТ «Мотор Січ», Україна).

Ключові слова: турбовальний ГТД, вільна турбіна, несучий гвинт, гідрогальмо, статична характеристика, статизм, гістерезис, автоколивання.

Список публікацій здобувача:

1. Литвяк А.Н., Комар С.В., Зинченко Ю.И. Система топливопитания и управления ТРДД АИ-25ТЛ. Харьков, 1996. 88 с.

Здобувачем проведено аналіз процесів у системі автоматичного управління турбореактивного двоконтурного двигуна учбового літака.

2. Березнев А.А., Бойко В.Е., Литвяк А.Н., Туголуков Н.А. Система управления и особенности эксплуатации силовой установки боевого самолета. Харьков, 1997. 56 с.

Здобувачем проведено аналіз характеристик і законів управління двигуна бойового літака.

3. Литвяк А.Н., Логинов В.В., Олейник Ю.А. Диагностика состояния авиационных газотурбинных двигателей по термодинамическим параметрам. *Зб. наукових праць ХУПС*. Харків, 2005. Вип. 5(5). С.31–34.

Здобувачем запропоновано модель та розроблено алгоритм діагностування стану газотурбінних двигунів за термодинамічними параметрами.

4. Литвяк А.Н., Дуреев В.А. Определение потерь напора в кольцевой распределительной сети автоматических установок водяного пожаротушения. *Проблеми пожежної безпеки. Зб. наукових праць НУГЗУ*. Харків, 2010. Вип. 27. С.66–69.

Здобувачем виконано гідравлічні розрахунки незбалансованої гідравлічної мережі складної кільцевої топології методом джерел та стоків.

5. Литвяк А.Н., Дуреев В.А. Выбор оптимальной скорости течения газа в трубах с потерями. *Проблеми пожежної безпеки. Зб. наукових праць НУГЗУ*. Харків, 2011. Вип. 29. С.116–118.

Здобувачем розроблено математичну модель течії газу в трубах з урахуванням його стисливості.

6. Литвяк А.Н., Дуреев В.А. Параметры водяных завес для предотвращения распространения продуктов горения. *Проблеми пожежної безпеки. Зб. наукових праць НУГЗУ*. Харків, 2011. Вип. 30. С.164–166.

Здобувачем запропоновано модель течії та руйнування суцільного струменя рідини у полі сил тяжіння.

7. Литвяк А.Н., Дуреев В.А. Определение параметров распределительной сети для создания водяной завесы общего назначения. *Проблеми пожежної безпеки. Зб. наукових праць НУГЗУ*. Харків, 2012. Вип. 31. С.120–122.

Здобувачем виконано гідравлічні розрахунки параметрів гідравлічної мережі спеціального призначення.

8. Литвяк А.Н., Дуреев В.А. Математическое описание чувствительного элемента максимального теплового пожарного извещателя с терморезистором. *Проблеми пожежної безпеки. Зб. наукових праць НУГЗУ*. Харків, 2012. Вип. 32. С.74–77.

Здобувачем запропоновано модель динаміки чутливого елемента датчика температури.

9. Литвяк А.Н., Дуреев В.А. Исследование эффективности создания водяных завес оросителями различного назначения. *Проблеми пожежної безпеки. Зб. наукових праць НУГЗУ*. Харків, 2012. Вип. 32. С.142–144.

Здобувачем виконано гідравлічні розрахунки течії рідини з насадків спеціального призначення.

10. Литвяк О.М., Дуреев В.О. Розрахунок витратних характеристик розподільних мереж водяних автоматичних систем пожежогасіння. *Проблеми пожежної безпеки. Зб. наукових праць НУГЗУ*. Харків, 2013. Вип. 33. С.113–116.

Здобувачем розроблено модель витратної характеристики складної гідравлічної мережі.

11. Литвяк А.Н., Дуреев В.А. Исследование расходных характеристик распределительных сетей спринклерных автоматических систем водяного пожаротушения помещений класса ОН1. *Проблеми пожежної безпеки. Зб. наук. праць НУГЗУ*. Харків, 2013. Вип. 34. С. 66–69.

Здобувачем розроблено алгоритм та виконано гідравлічні розрахунки витратних характеристик складних гідравлічних мереж.

12. Литвяк А.Н., Комар С.В., Калабанов В.В. Структурно-динамическое моделирование широтно-импульсного управляющего сигнала в пакетах прикладных программ. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Зб. наук. праць УкрДАЗТ*. Харків, 2014. №5. С.48–51.

Здобувачем запропоновано структурно-динамічна модель регулятора з широтно-імпульсним сигналом управління.

13. Литвяк А.Н., Комар С.В., Калабанов В.В. Исследование ошибки выходного сигнала инерционного исполнительного механизма с широтно-импульсным управлением. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Зб. наук. праць УкрДАЗТ. Харків, 2015. №1(110). С. 26–28.*

Здобувачем виконано параметричні дослідження впливу параметрів широтно-імпульсного сигналу на динаміку інерційного виконуючого механізму.

14. Литвяк А.Н., Деревянко А.А. Расчет расхода порошково-газовой смеси через выпускной насадок порошковой автоматической системы пожаротушения. *Проблеми пожежної безпеки. Зб. наук. праць НУГЗУ. Харків, 2017. Вип.42. С. 32–36. (Пр. МОН України от 21.12.2015 №1328).*

Здобувачем запропоновано модель і розроблено метод розрахунку течії неоднорідної газової суміші крізь насадок.

15. Андронов В.А., Литвяк А.Н., Деревянко А.А., Галица В.И. Автоматизированная система контроля функционального состояния спасателя. *Проблеми надзвичайних ситуацій. Зб. наук. праць НУГЗУ. Харків, 2017. Вип. 26. С. 11–16.*

Здобувачем обґрунтовано структурну схему автоматизованої системи контролю функціонального стану.

16. Литвяк А.Н., Деревянко А.А. Влияние коэффициента загрузки на динамику модуля порошкового пожаротушения. *Проблеми пожежної безпеки. Зб. наук. праць НУГЗУ. Харків, 2018. Вип. 43. С.100–104.*

Здобувачем розроблено алгоритм та виконано розрахункові дослідження динаміки течії неоднорідної газової суміші.

17. Литвяк А.Н., Деревянко А.А. Динамическая модель газовоздушной среды в условно герметичном помещении при работе

генератора огнетушащего аэрозоля. *Проблеми пожежної безпеки. Зб. наук. праць НУГЗУ*. Харків, 2018. Вип. 44. С.31–35.

Здобувачем розроблено математичну модель динаміки газоповітряного середовища з урахуванням відкритих прорізів.

18. Качанов П.А., Литвяк А.Н., Галица В.И., Антошкин А.А. Исследование влияния электростатического поля на скорость осаждения мелкодисперсной пыли. *Системи управління, навігації та зв'язку. ПНТУ ім. Ю.Кондратюка*. Полтава, 2018. Вип. 2(48)'2018. С.111–114.

Здобувачем розроблено систему вимірювань та проведено експериментальні дослідження впливу електростатичного поля на динаміку осадження дрібнодисперсного пилу.

19. Литвяк О.М., Комар С.В. Експериментальне дослідження характеристик керуючого клапана типу “сопло-заслінка” гідравлічних систем автоматичного керування. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України* Харків, 2019. №4(37). С. 56–60. DOI:10.30748/nitps.2019.37.08.

Здобувачем удосконалено метод та виконано експериментальні дослідження характеристик керуючих клапанів типу «сопло-заслінка».

20. Качанов Р., Lytviak O., Derevyanko O., Komar S. Development of an automated hydraulic brake control system for testing aircraft turboshaft gas turbine engines. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2019. № 6/2(102). P.52-57. DOI:10.15587/1729-4061.2019.185539. (**SCOPUS Q3**).

Здобувачем обґрунтовано закон регулювання та запропоновано структуру автоматизованої системи управління гідрогальмівною установкою для випробувань турбовальних газотурбінних двигунів.

21. Литвяк О.М., Комар С.В. Обґрунтування законів регулювання гідрогальмівної установки для наземних випробувань турбовальних ГТД. *Зб. наукових праць ХНУПС*. Харків, 2020. №1(63). С. 96–102. DOI:10.30748/zhups.2020.63.13.

Здобувачем обґрунтовано вимоги та закон регулювання гідрогальмівною установкою для випробувань турбовальних газотурбінних двигунів.

22. Литвяк О.М., Дурєєв В.О., Дерев'янка О.А. Дослідження застосування широтно-імпульсного управління інерційними об'єктами в сучасних адаптивних системах безпеки. *Проблеми надзвичайних ситуацій. Зб. наукових праць НУЦЗУ*. Харків, 2020. Вип. 1(31). С.68–77.

Здобувачем запропоновано концепцію застосування широтно-імпульсного управління в адаптивних системах безпеки.

23. Литвяк О.М., Комар С.В. Особливості статичних характеристик регулятора обертів вільної турбіни насоса-регулятора типу НР-3. *Системи озброєння і військова техніка*. Харків, 2020. №4(64). С.93–100. DOI:10.30748/soivt.2020.64.12

Здобувачем виконано аналіз та запропоновано класифікація особливостей статичних характеристик регулятора обертів насоса-регулятора НР-3.

24. Литвяк О.М., Комар С.В. Проблеми наземних випробувань турбовальних газотурбінних двигунів типу ТВ3-117. *Системи озброєння і військова техніка*. Харків, 2021. №1(65). С.87–94. DOI:10.30748/soivt.2021.64.12

Здобувачем виявлені закономірності впливу динамічних параметрів елементів системи автоматичного регулювання на розвиток автоколивань у системі автоматичного регулювання обертів вільної турбіни двигунів ТВ3-117.

25. Lytviak O., Komar S., Derevyanko O., Durieiev V. Devising quality control criteria for manufacturing control valves of the type "nozzle-flap". *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2021. № 1/1(109). P.27–35. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.224918. (SCOPUS Q3).

Здобувачем виявлено нові дані про течію рідини у клапані «сопло-заслінка» та запропоновано критерій оцінки якості його виготовлення.

26. Литвяк А.Н., Деревянко А.А. Математическое моделирование распределительных сетей автоматических систем водяного пожаротушения. *Вестник Кокшетауского технического института Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан*. КТИ МЧС РК, 2013. № 2 (10). С. 48–53.

Здобувачем розроблено метод та розроблено алгоритм розрахунку параметрів гідравлічної мережі складної топології методом джерел та стоків.

27. Lytviak O., Loginov V., Komar S., Martseniuk Y. Self-Oscillations of The Free Turbine Speed in Testing Turboshaft Engine with Hydraulic Dynamometer. *Aerospace* 2021, 8, 114. <https://doi.org/10.3390/aerospace8040114>. (SCOPUS Q2).

Здобувачем розроблено метод дослідження та виконано розрахунок межі автоколивань у системі автоматичного управління турбовального газотурбінного двигуна.

28. Литвяк О.М., Дуреев В. О., Маляров М. В., Чигрин В. С. Экспериментальне дослідження характеристик регулятора оборотів вільної турбіни насоса-регулятора типу НР-3. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. ICTM-2019*. Харків, 2019. Том 2. С. 76–79.

Здобувачем виконано експериментальні дослідження статичних характеристик регулятора обертів вільної турбіни насоса-регулятора типу НР-3.

29. Комышан И.И., Литвяк А.Н., Дуреев В.А. Исследование влияния параметров П-регулятора на развитие автоколебаний системы автоматического регулирования 3-го порядка. *Сучасні інформаційні системи та технології: зб. тез. доп. III Всеукраїнської наук.-практ. конф. (Херсон, 30 листоп. 2020)*. Херсон, Україна. 2020. С. 184–187. URL: <http://kntu.net.ua/ukr/content/view/full/64374>.

Здобувачем виконано параметричні дослідження впливу динамічних параметрів реального регулятора на межу автоколивань в системі регулювання 3-го порядку.

30. Качанов П.А., Литвяк А.Н., Комар С.В. Математическая модель регулятора оборотов свободной турбины вертолетного ГТД. *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування України: матеріали III міжнар. наук.-практ. конф.* (Харків: ХНТУ «ХПП», 3–4 груд. 2020). Харків, Україна. 2020. С.17–18.

Здобувачем запропоновано метод моделювання особливостей характеристик гідромеханічного регулятора обертів вільної турбіни турбовального ГТД.

31. Качанов П. А., Литвяк А.Н., Дуреев В.А. Определение границы автоколебаний реальной системы автоматического регулирования 3-го порядка методом весовых характеристик. *Achievements and prospects of modern scientific research. Abstracts of the 1st International scientific and practical conference. Editorial EDULCP.* (Buenos Aires, 6–8 Dec. 2020). Buenos Aires, Argentina. 2020. Pp. 150–153. – URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2020/12/ACHIEVEMENTS-AND-PROSPECTS-OF-MODERN-SCIENTIFIC-RESEARCH-6-8.12.20.pdf>.

Здобувачем виконано розрахунки межі автоколивань у системі автоматичного управління 3-го порядку з нелінійними особливостями регулятора.

32. Литвяк О.М., Дуреев В.О., Положій Е.М. Визначення межі автоколивань системи автоматичного регулювання з реальним регулятором методом вагових характеристик. *Сучасна наука: проблеми і перспективи: матеріали V міжнар. наук.-практ. конф.* (Київ, 10–11 грудня, 2020). Київ, Україна. 2020. С. 32–33. URL: [http://www.mcnd.ltd.ua/material/2020/грудень%20\(3\).pdf](http://www.mcnd.ltd.ua/material/2020/грудень%20(3).pdf).

Здобувачем запропоновано метод визначення межі автоколивань у реальних системах автоматичного регулювання технологічних процесів.

33. Литвяк О.М., Комар С.В., Дуреев В.О. Модель динаміки дводвигуневої силової установки вертольота. *Fundamental and applied research in the modern world*. Abstracts of the 5th International scientific and practical conference. BoScience Publisher. (Boston, December 16–18, 2020). Boston, USA. 2020. Pp. 497–501. URL: <https://sci-conf.com.ua/v-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-fundamental-and-applied-research-in-the-modern-world-16-18-dekabrya-2020-goda-boston-ssh-arhiv/>

Здобувачем запропоновано структурно-динамічну модель дводвигуневої силової установки вертольота.

34. Качанов П.А., Литвяк А.Н., Дуреев В.А. Обоснование закона регулирования для формирования динамических параметров аналога объекта регулирования. *World science: problems, prospects and innovations*. Abstracts of the 4th International scientific and practical conference. Perfect Publishing. (Toronto, December 23–25, 2020) Toronto, Canada. 2020. Pp. 21–27. URL: <https://sci-conf.com.ua/iv-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-world-science-problems-prospects-and-innovations-23-25-dekabrya-2020-goda-toronto-kanada-arhiv/>.

Здобувачем виконано математичне обґрунтування закону регулювання аналогом об'єкта управління складної системи автоматизації.

35. Качанов П.А., Литвяк А.Н., Дуреев В.А. Динамика системы автоматического регулирования оборотов несущего винта двухдвигательной силовой установки вертолета. *The world of science and innovation*. Abstracts of the 6th International scientific and practical conference. Cognum Publishing House. (London, 14–16 January, 2021) London, United Kingdom. 2021. Pp. 569–579. URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-the-world-of-science-and-innovation-14-16-yanvaryaya-2021-goda-london-velikobritaniya-arhiv/>.

Здобувачем виконано чисельне дослідження динаміки дводвигунової силової установки вертольота з урахуванням реальних характеристик регуляторів оборотів вільної турбіни.

36. Качанов П.О., Литвяк О.М., Дурєєв В.О. Дослідження завантажувальних характеристик несучого гвинта вертольота та гідрогальмівної установки, призначеної для наземних випробувань турбовальних газотурбінних двигунів. *Science and education: problems, prospects and innovations*. Abstracts of the 5th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. (Kyoto, February 4–6, 2021). Kyoto, Japan. 2021. Pp. 525–535. URL: <https://sci-conf.com.ua/v-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-science-and-education-problems-prospects-and-innovations-4-6-fevralya-2021-goda-kioto-yaponiya-arhiv/>.

Здобувачем розроблено методіку та виконано аналіз експериментальних досліджень завантажувальних характеристик несучого гвинта та гідрогальмівної установки.

37. Литвяк О.М., Дурєєв В.О., Дерев'янка О.А. Дослідження межі автоколювань системи автоматичного регулювання обертів вільної турбіни турбовального газотурбінного двигуна вертольоту методом гармонійної лінеаризації. *Actual trends of modern scientific research*. Abstracts of the 7th International scientific and practical conference. MDPC Publishing. (Munich, February 14–16, 2021). Munich, Germany. 2021. Pp. 195–201. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/ACTUAL-TRENDS-OF-MODERN-SCIENTIFIC-RESEARCH-14-16.02.21.pdf>.

Здобувачем виконано розрахунок та аналіз межі автоколювань у системі автоматичного регулювання обертів вільної турбіни.

ABSTRACT

Lytviak O.M. Models and methods of analysis of dynamic processes in the automatic control system of a turboshaft gas turbine engine of a helicopter. –As a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.13.03 – Control Systems and Processes. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The thesis is devoted to the solution of the actual scientific and applied problem of predicting and eliminating the development of self-oscillations in the automatic control system of the revolutions of a free turbine of a turboshaft gas turbine engine of a helicopter based on the development of appropriate mathematical models and methods. As a result of the analysis of the state of the problem, it was found that at the moment the problem of the development of self-oscillations in the automatic control system of the free turbine revolutions of turboshaft GTEs of helicopters with a hydromechanical control system has not been completely solved, which necessitated the improvement of the classical mathematical tools. In the dissertation work, a complex of interrelated models of the dynamics of the automatic control system of revolutions of a free turbine of a turboshaft GTE of a helicopter and a nonlinear element-by-element model of the static characteristics of a hydromechanical regulator was developed. On the basis of in-depth experimental studies of the processes and characteristics of the elements of the hydromechanical regulator, new data were obtained, which made it possible to eliminate contradictions in the mathematical representation of the functions of the ACS elements and improve their mathematical models. Methods for studying self-oscillations in complex mechanical systems were further developed and a criterion for predicting self-oscillations in the automatic control system of the revolutions of a free turbine of a turboshaft GTE during its ground tests on a hydraulic brake system and flight tests as part of a twin-engine power plant of a helicopter was determined. The developed models and the

obtained research results form the basis of the method for predicting the tendency of the automatic control system of revolutions of the free turbine of a turboshaft GTE to the development of self-oscillations. To carry out correct ground tests of turboshaft gas turbine engines of helicopters, the requirements for the dynamic characteristics of the hydraulic brake system were formulated for the first time and the law for regulating its load was substantiated, which provides complete emulation of the characteristics of helicopter rotor. The reliability of the new scientific provisions and conclusions of the thesis is confirmed by the results of experimental data obtained in the study of physical objects. The practical significance of the obtained results lies in the fact that the developed methods and models make it possible to predict the tendency of pump-regulators of the HP-3 type (SE KhMP "FED", Ukraine) to the development of self-oscillations without carrying out motor tests, reduce the repair time and eliminate the problem of self-oscillations for motors of the type TV3-117 (Motor Sich JSC, Ukraine).

Keywords: turboshaft GTE, free turbine, main rotor, hydraulic brake, static characteristic, constant-error behavior, hysteresis, self-oscillations.

ЗМІСТ

ВСТУП	23
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ АВТОКОЛИВАНЬ ОБЕРТІВ ВІЛЬНОЇ ТУРБИНИ ТУРБОВАЛЬНИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ВЕРТОЛЬОТІВ.....	34
1.1 Турбовальний ГТД як об'єкт управління.....	34
1.2 Завдання системи автоматичного управління турбовального ГТД.....	36
1.3 Проблеми льотних і наземних випробувань турбовальних ГТД...	37
1.4 Дослідження автоколивань у системі автоматичного управління вертолітних ГТД.....	41
1.5 Методологічні основи дослідження автоколивань складних динамічних систем.....	46
1.5.1 В галузі теорії автоматичного управління.....	47
1.5.2 В галузі нелінійних систем управління.....	47
1.5.3 В галузі теорії авіаційних ГТД.....	48
1.5.4 В галузі систем управління авіаційними силовими установками.....	49
1.5.5 В галузі газової та гідродинаміки	51
1.5.6 В галузі прогнозування автоколивань.....	54
1.5.7 В галузі дослідження динаміки систем автоматичного управління авіаційних ГТД.....	56
1.5.8 В галузі випробувань турбовальних ГТД.....	60
Висновки за розділом 1	62
РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ОБЕРТІВ ВІЛЬНОЇ ТУРБИНИ ТУРБОВАЛЬНОГО ГТД ВЕРТОЛЬОТА.....	64
2.1 Дослідження характеристик РОВТ.....	64

2.1.1 Цілі та завдання досліджень характеристик РОВТ.....	65
2.1.2 Система вимірювань та методика проведення експерименту..	65
2.1.3 Обробка даних експерименту.....	69
2.1.4 Результати експериментальних досліджень статичних характеристик РОВТ.....	72
2.1.5 Аналіз результатів експериментальних досліджень статичних характеристик РОВТ.....	89
2.2 Дослідження характеристик клапанів типу «сопло-заслінка».....	90
2.2.1 Цілі й завдання експериментальних досліджень характеристик керуючого клапана.....	90
2.2.2 Влаштування керуючого клапана «сопло-заслінка»	91
2.2.3 Витратна характеристика клапана «сопло-заслінка».....	93
2.2.4 Аналіз критеріїв подібності.....	94
2.2.5 Вплив конструктивних чинників на коефіцієнт витрати....	96
2.2.6 Прилади та методи дослідження статичних характеристик керуючого клапана «сопло-заслінка».....	99
2.2.7 Результати експериментальних досліджень статичних характеристик керуючого клапана.....	102
2.2.8 Аналіз результатів експериментальних досліджень характеристик керуючих клапанів.....	107
2.3 Дослідження завантажувальних характеристик ГГУ і НГ.....	109
2.3.1 Завантажувальні характеристики ГГУ.....	110
2.3.2 Завантажувальні характеристики НГ.....	111
Висновки за розділом 2.....	111
Література до розділу 2.....	113
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДИНАМІКИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ОБЕРТІВ ВІЛЬНОЇ ТУРБІНИ ТУРБОВАЛЬНОГО ГТД ВЕРТОЛЬОТА.....	118
3.1 Математична модель динаміки САР обертів вільної турбіни.....	120
3.2 Математична модель динаміки ТК.....	122

3.2.1 Рівняння динаміки ТК.....	122
3.2.2 Динамічні параметри ТК.....	125
3.3 Математична модель динаміки ВТ.....	130
3.3.1 Рівняння динаміки ВТ.....	130
3.3.2 Динамічні параметри ВТ.....	133
3.4 Математична модель динаміки РОВТ.....	135
3.4.1 Рівняння динаміки РОВТ.....	135
3.4.2 Динамічні параметри РОВТ.....	138
3.4.3 Нелінійні елементи у структурі РОВТ.....	140
3.5 Математична модель динаміки $САР(n_{ВТ})$ під час наземних випробувань двигуна.....	143
3.6 Математична модель динаміки $САР(n_{ВТ})$ дводвигуневої силової установки вертольота.....	144
Висновки за розділом 3.....	152
Література до розділу 3.....	152
РОЗДІЛ 4 ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ОБЕРТІВ ВІЛЬНОЇ ТУРБІНИ ТУРБОВАЛЬНОГО ГТД ВЕРТОЛЬОТА.....	156
4.1 Аналіз стійкості $САР(n_{ВТ})$	158
4.1.1 Критичні параметри РОВТ.....	158
4.1.2 Межа стійкої роботи $САР(n_{ВТ})$ з об'єктом (ВТ+ГГ).....	161
4.1.3 Межа стійкої роботи $САР(n_{ВТ})$ з об'єктом (ВТ+НГ).....	166
4.2 Дослідження межі автоколивань $САР(n_{ВТ})$ методом гармонійної лінеаризації.....	167
4.3 Дослідження межі автоколивань $САР(n_{ВТ})$ методом вагових характеристик.....	176
4.4 Порівняльний аналіз методів дослідження автоколивань.....	180
4.5 Вплив технологічного дросельного пакету ДП ОДГ на межу автоколивань $САР(n_{ВТ})$ з об'єктом (ВТ+ГГ).....	181
4.6 Статистичні данні моторних випробувань.....	183

4.7 Дослідження динаміки $SAR(n_{BT})$ дводвигуневої силової установки вертольота методом вагових характеристик.....	185
Висновки за розділом 4.....	193
Література до розділу 4.....	195
РОЗДІЛ 5 НЕЛІНІЙНА ПОЕЛЕМЕНТНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ГІДРОМЕХАНІЧНОГО РЕГУЛЯТОРА ОБЕРТІВ ВІЛЬНОЇ ТУРБІНИ.....	200
5.1 Конструктивна схема гідромеханічного РОВТ.....	201
5.2 Математичний опис статичної характеристики РОВТ.....	203
5.3 Качаючий вузол.....	208
5.4 Керуючий клапан 770 РОВТ.....	209
5.5 Живильний жиклер 732.....	213
5.6 Послідовне включення гідравлічних опорів.....	215
5.7 Розподільник палива.....	217
5.7.1 Перший контур форсунок.....	217
5.7.2 Другий контур форсунок.....	219
5.7.3 Сумарна характеристика РП.....	225
5.8 Основна дозуюча голка.....	226
5.9 Гідравлічний привід ОДГ.....	230
5.9.1 Вплив конструктивних факторів на характеристику ГП ОДГ.....	232
5.10 Клапан постійного перепаду тиску.....	235
5.11 Тахометр РОВТ.....	238
5.12 Синхронізатор потужності.....	245
5.13 Клапан мінімального тиску.....	248
5.14 Дозуюча голка автомата приймальності.....	251
5.15 Розрахункова характеристика РОВТ.....	255
Висновки за розділом 5.....	256
Література до розділу 5.....	256
РОЗДІЛ 6 ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ДО РОЗВИТКУ АВТОКОЛИВАНЬ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ	

ОБЕРТІВ ВІЛЬНОЇ ТУРБИНИ ТУРБОВАЛЬНОГО ГТД ВЕРТОЛЬОТА.....	260
6.1 Автоматизація гідрогальмівних установок для наземних випробувань турбовальних газотурбінних двигунів.....	260
6.1.1 Обґрунтування закону регулювання ГГУ.....	263
6.1.2 Структурна схема АСУ ГГУ.....	267
6.1.3 Дослідження динаміки АСУ ГГУ.....	267
6.2 Поліпшення характеристик гідромеханічного РОВТ.....	271
6.2.1 Збільшення жорсткості пружини 133 ГП ОДГ.....	273
6.2.2 Збільшення продуктивності живильного жиклера 732.....	276
6.2.3 Зміна тиску налаштування СП.....	278
6.2.4 Оптимізація витратних характеристик розподільника палива..	281
6.2.5 Зменшення кута нахилу характеристики тахометра ВТ.....	290
6.2.6 Зміна конструкції керуючого клапана 770.....	293
6.2.7 Застосування ремонтної манжети ГП ОДГ.....	296
Висновки за розділом 6.....	298
Література до розділу 6.....	300
ВИСНОВКИ.....	303
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	308
ДОДАТКИ.....	335