

of the environment and the process proposed numerical algorithm for identifying reservoir fluids to flow well when the perturbation flow filtration hydraulic fracturing crack finitereservoir permeability. In the particular example analyzed of hydraulic crack effectiveness and impact of the characteristic parameters of cracks on the work of operating and injection wells.

Key words: *hydraulic crack, quasiconformal mappings, separation line, boundary problems, hydrodynamic mesh.*

Отримано: 12.03.2012

УДК 004.942

А. Ф. Верлань*, д-р техн. наук, професор,
Л. О. Митько*, канд. фіз.-мат. наук,
О. А. Дячук**, канд. техн. наук,
В. А. Федорчук***, д-р техн. наук

*Інститут проблем моделювання в енергетиці
ім. Г. Є. Пухова НАН України, м. Київ,

** Державна установа «Інститут економіки
та прогнозування НАН України», м. Київ,

*** Кам'янець-Подільський національний університет
імені Івана Огієнка, м. Кам'янець-Подільський

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МОДЕЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ВИПРОБУВАЛЬНИХ СТЕНДІВ СИЛОВИХ УСТАНОВОК

У статті зображені науково-практичні результати по створенню методів і засобів модельної підтримки процесів функціонування сучасних і перспективних випробувальних стендів силових установок енергетичного і транспортного призначення.

Ключові слова: *випробувальні стенди, силові установки, модельна підтримка.*

Вступ. В енергетичних і транспортних системах різного призначення знаходять широке застосування силові установки. В усіх країнах з розвиненими машинобудівним та енергетичним комплексами не припиняються роботи з розробки нових зразків та модернізації існуючих силових установок з метою підвищення їх ефективності та надійності. Особливо активні дослідження та розробки здійснюються в галузях енергетичного та авіаційного турбінобудування, транспортного моторобудування та ін. [1; 2].

У сучасній енергетиці, а також на транспортних засобах (авіація, морські та річкові судна, нафто- та газотранспортні трубопровідні системи тощо), які потребують застосування двигунів великої потужності, особливо, при наявності обмежень на їх масогабаритні параме-

три, широко застосовуються *газотурбінні силові установки* (ГТСУ), які у транспортних застосуваннях, зазвичай, називаються *газотурбінними двигунами* (ГТД).

Одним із найбільш ефективних напрямків розвитку енергетики є застосування для генерації електричної енергії парогазових установок, в яких гарячі гази, що виходять з газотурбінної силової установки, використовуються для генерації пари у котлах-утилізаторах, яка потім подається на парову турбіну. Така комбінована система генерації електроенергії дозволяє досягати ККД до 55-60%.

Зараз широкого розповсюдження набули силові установки наступних типів: турбомашинні силові установки — газотурбінні енергетичні силові установки (стаціонарні і пересувні електротурбогенератори) та двигуни транспортних засобів, приводи газоперекачувальних станцій, парові турбіни, гідравлічні турбіни, комбіновані парогазові силові установки для генерації електроенергії (газова турбіна — котел-утилізатор — парова турбіна); силові установки на основі поршневих двигунів внутрішнього згорання — з іскровим запаленням (автомобільний транспорт, електрогенератори від одиниць до десятків кіловат), дизельні (залізничний, морський, автомобільний транспорт, електрогенератори від десятків до тисяч кіловат); силові установки, що використовують відновлювальні джерела енергії (вітроенергетичні, з сонячними батареями, геотермальні тощо). Слід відмітити клас силових установок з високою відповідальністю, що потребують особливого підходу до забезпечення їх надійності та тривалого ресурсу роботи, наприклад, космічні енергоустановки.

Випробувальні стенди силових установок. Розв'язування складного комплексу проблем, які виникають при розробці, виробництві, експлуатації і модернізації силових установок енергетичного і транспортного призначення, неможливе без детального дослідження процесів, що відбуваються в самих силових установках та в їх системах автоматичного керування, а також в обладнанні, що забезпечує їх функціонування. Розв'язування вказаних проблем супроводжується створенням цілого комплексу спеціалізованих засобів — натурних, комп'ютерних, натурно-комп'ютерних випробувальних стендів.

Натурні випробувальні стенди (НВС) — дозволяють проводити детальні експериментальні (фізичні) дослідження складних механічних, теплових та інших процесів, що відбуваються у силових установках та їх вузлах і агрегатах при різних режимах функціонування. *Комп'ютерні моделюючі стенди* (КМС) — призначені для комплексного дослідження силових установок на основі комп'ютерного моделювання процесів, що в них відбуваються, оптимізації їх конструкції і параметрів функціонування, проектування і налагодження систем автоматичного керування тощо. *Натурно-комп'ютерні випробувальні стенди* (НКС) — здійснюють безпосереднє експериментальне дослідження роботи лише певної

частини випробовуваного об'єкта, тоді як функціонування решти його складових описується за допомогою комп'ютерних моделей.

Більшість експериментальних стендів обладнано системами автоматизації випробувань. Такі системи істотно підвищують ефективність випробувань, забезпечують скорочення часу доведення і налагодження установок за рахунок прискореної обробки великого обсягу вимірювальної інформації, підвищення її точності, забезпечення виконання програми випробувань.

У процесі розробки, доведення і серійного виробництва силових установок існують численні види випробувань, які можна умовно поділити на такі групи: науково-дослідний експеримент, проведений на стадії підготовки до розробки силової установки; випробування окремих вузлів створюваної силової установки, що проводяться в процесі розробки і доведення; доводочні і спеціальні випробування; сертифікаційні та Державні випробування; випробування серійної продукції.

На підставі даних, що одержуються при проведенні науково-дослідного експерименту, уточнюються теоретичні уявлення про протікання робочого процесу, розробляються методи розрахунку характеристик вузлів силової установки, вносяться необхідні емпіричні поправки в математичні моделі, що застосовуються при проектуванні силової установки. Особливістю дослідного експерименту є можливість проведення великої кількості вимірювань, які важко проводити при випробуваннях на працюючій силовій установці з використанням точної вимірювальної апаратури (наприклад, термоанемометрів, лазерних приладів, тіньових та інтерференційних оптичних пристроїв).

Структурна схема типової системи автоматизації випробувань силових установок приведена на рис.1, де СУ — силова установка, що випробовується; ВМ — виконавчі механізми; ПВП/ППСК — первинні вимірювальні перетворювачі; ППСК — первинні перетворювачі системи контролю; ПЗО — пристрій зв'язку з об'єктом; К — комп'ютер (ПК); Д — дисплей; П — принтер; КП — клавішний пристрій; ПУ — пульт управління.

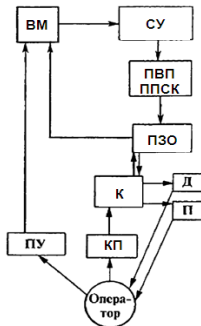


Рис. 1. Структурна схема типової системи автоматизації випробувань силових установок

Випробувальні стенди створюються, удосконалюються та використовуються всіма установами, що мають відношення до виробництва силових установок.

Задачі створення і функціонування випробувальних стендів силових установок, їх математичне і комп'ютерне забезпечення. Випробувальні стенди силових установок існуючого покоління реалізують, головним чином, процеси отримання, реєстрації та первинної обробки необхідного набору параметрів об'єкта випробування (показників вимірювань), що характеризують його стан в ускладнених режимах. Сучасні тенденції розвитку випробувальних стендів характеризуються їх значним апаратним і функціональним розширенням, зростають кількісні та якісні показники системи вимірювань параметрів, розширюється функціональне призначення силових установок, тобто ускладнюються об'єкти випробування, зростає кількість вимірювальних каналів, якість первинних вимірювальних перетворювачів, збільшується кількість функцій, що виконуються випробувальними стендами. Зокрема, до функцій реєстрації експериментальних даних додаються функції контролю, діагностики і керування. Випробувальний стенд стає автоматизованою системою з «повною відповідальністю», яка повинна моделювати, реалізовувати і відпрацьовувати процеси, притаманні діючим силовим установкам. Такі властивості випробувальних стендів можуть бути досягнені лише на основі розвинутого математичного і комп'ютерного забезпечення процесів функціонування випробувальних стендів силових установок. Комп'ютерна частина випробувальних стендів повинна включати в себе методи і засоби модельної підтримки, які забезпечують як розв'язування задач аналізу, так і задач побудови і доводки підсистем контролю, діагностики і керування силових установок на основі комп'ютерного моделювання.

Таким чином, при розробці методів і засобів комп'ютерного забезпечення нового покоління випробувальних стендів, які набувають ознак, що притаманні інформаційно-комп'ютерним системам, необхідно враховувати додаткові умови, найбільш суттєвою з яких є наявність реалізованої підсистеми математичного моделювання процесів функціонування силових установок. При цьому, комп'ютерна модель силової установки повинна задовольняти заданим умовам адекватності та обчислювальної точності, бути достатньо універсальною для охоплення класу процесів, що досліджуються і, разом з тим, забезпечувати індивідуалізацію до конкретного типу установки за параметрами, що отримуються експериментально при стендових випробуваннях [3].

Модельна підтримка функціонування випробувальних стендів. Відмінною рисою керованих силових установок є різноманітність елементів, що входять до їх складу. Це, в свою чергу, породжує неоднорідність у математичному описі системи. За характером неодно-

рідність можна розділити на фізичну та функціональну. Фізична неоднорідність викликана наявністю різних за фізичною сутністю елементів (механічні, електричні, оптичні, магнітні та електромагнітні і т.д.). Функціональна неоднорідність проявляється у присутності різних за призначенням сигналів (керуючі, вимірювальні, дублюючі, допоміжні та ін.). Таким чином, сучасні силові установки відносяться до класу складних неоднорідних динамічних систем.

Повний математичний опис таких технічних об'єктів досягається складними системами диференціальних рівнянь, що містять, як правило, рівняння в частинних похідних з досить складними граничними умовами. Розв'язування подібних систем рівнянь є трудомісткою задачею і потребує великих витрат машинного часу. Крім того, як показує досвід, не завжди є можливість в отриманні розв'язків таких систем рівнянь, оскільки не завжди вдається знайти для них стійкі обчислювальні методи.

Переважаюча частина досліджень динаміки об'єктів, пошук законів керування, а також попередня діагностика потребують більш простих систем рівнянь. Спрощені моделі повинні зберегти істотні властивості і головні динамічні ефекти, якими володіла повна система. Отримання спрощених математичних описів є досить складною проблемою, яка поки що не має стандартної методики і вимагає кожного разу індивідуального підходу.

Розповсюдженими на практиці спрощеними моделями є системи звичайних диференціальних рівнянь, застосування яких все ж залишає низку питань, що потребують вирішення. Серед них можна виділити питання забезпечення стійкості обчислювального процесу при наявності значних рівнів високочастотних спектрів шумів у вихідних даних, розповсюджений прояв ефекту Гіббса при моделюванні об'єктів з розподіленими параметрами, обмежене застосування ітераційних алгоритмів та ін. Для вирішення вказаних проблем необхідно, в доповнення до існуючих, створювати нові способи побудови і числової реалізації математичних моделей. Ефективним кроком у цьому напрямку є використання інтегральних рівнянь та операторів (інтегральних макромоделей), які володіють низкою позитивних властивостей, зокрема високою універсальністю (структура моделі є незмінною для різних класів динамічних об'єктів, властивості моделі задаються однією функцією — ядром інтегрального оператора), потенційно високою адекватністю процесів моделювання, властивістю згладжування при виконанні обчислень та використанні у реальних системах із значним рівнем спектрів високочастотних шумів, високою збіжністю ітераційних процесів розв'язування задач, можливістю ефективного побудови моделі за експериментальними даними тощо. Разом з тим, залишається питання отримання еквівалентних інте-

гральних моделей на основі відомої диференціальної моделі, задачі апроксимації моделей та їх числової реалізації.

Таким чином, ефективне розв'язування задач, що виникають, може досягатись шляхом розширення класу математичних моделей для врахування особливостей окремих типів ланок силових установок, в тому числі із залученням інтегральних динамічних моделей і макромоделей, створення та реалізації методів і алгоритмів ідентифікації, методів еквівалентних та апроксимаційних перетворень моделей, застосування швидкодіючих рекурентних алгоритмів для реалізації інтегральних динамічних моделей, підвищення рівня адекватності відтворення процесів як в окремих ланках, так і в цілому в системі, структурно-алгоритмічної організації програмних засобів комп'ютерного моделювання, що відповідає інженерному характеру проведення технічних розробок.

Характерним і розповсюдженим прикладом математичного опису силових установок є моделі компресора та ГТСУ. Структурна схема моделі компресора приведена на рис. 2, де, відповідно, L_{comp} , L_{thr} , L_{bl} — довжина компресора, дроселя і перепускного каналу [м], V_{pl} , T_{pl} , p_{pl} — об'єм [м³], температура [K] і тиск [Па] у камері тиску.

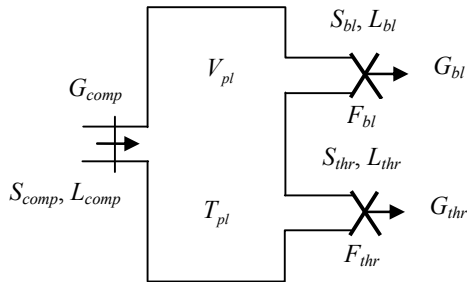


Рис. 2. Структура базової моделі компресора

Динамічні процеси в системі компресорної секції «компресор — камера тиску» описуються системою звичайних нелінійних диференціальних рівнянь четвертого порядку:

$$\begin{aligned} \frac{dG_{comp}}{dt} &= \frac{S_{comp}}{L_{comp}} (\Delta p_{compSS} - p_{pl} + p_{in}), \\ \frac{dG_{thr}}{dt} &= \frac{S_{thr}}{L_{thr}} (p_{pl} - p_{out} - \Delta p_{thr}), \\ \frac{dG_{bl}}{dt} &= \frac{S_{bl}}{L_{bl}} (p_{pl} - p_{out} - \Delta p_{bl}), \\ \frac{dp_{pl}}{dt} &= \frac{\gamma RT_{pl}}{V_{pl}} (G_{comp} - G_{thr} - G_{bl}), \end{aligned}$$

де, відповідно, G_{comp} , G_{thr} , G_{bl} — масові потоки через компресор, дросель і перепускний канал [кг/с]; S_{comp} , S_{thr} , S_{bl} — площі перерізів компресора, дроселя і перепускного каналу [м²]; Δp_{compSS} — стаціонарне підвищення тиску відповідно до статичних робочих характеристик компресора [Па]; Δp_{thr} , Δp_{bl} — падіння тиску на клапані дроселя і перепускному клапані [Па]; p_{out} — тиск на виході [Па]; η_{comp} — ККД компресора [б/р]; γ — відношення теплоємностей c_p/c_v [б/р].

У математичній моделі газотурбінної силової установки в цілому (рис. 3) до розгляду, крім компресора та камери тиску, включені камера згорання і газова турбіна.

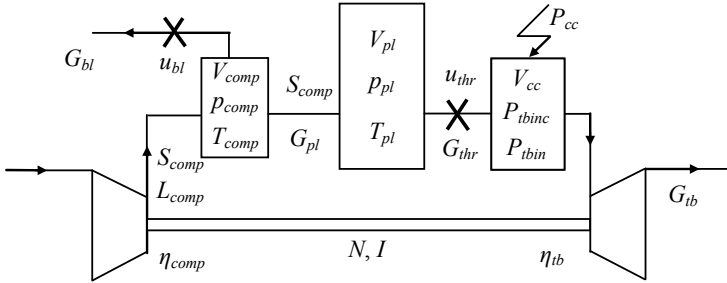


Рис. 3. Структура моделі газотурбінної силової установки в цілому

Повна система нелінійних диференціальних і алгебраїчних рівнянь, що описують динаміку турбіни, при цьому має наступний вигляд:

$$\frac{dp_{comp}}{dt} = \frac{\gamma R}{V_{comp}} \left[G_{comp} T_{cpout} - (G_{pl} + G_{bl}) T_{comp} \right],$$

$$\frac{dT_{comp}}{dt} = \frac{RT_{comp}}{p_{comp} V_{comp}} \left[\gamma (G_{comp} T_{cpout} - (G_{pl} + G_{bl}) T_{comp}) - T_{comp} (G_{comp} - (G_{pl} + G_{bl})) \right],$$

$$\frac{dp_{tbin}}{dt} = \frac{\gamma_T R_T}{V_{cc}} \left[G_{thr} T_{ccin} \frac{c_{pcomp}}{c_{pT}} - G_{ib} T_{tbin} + \frac{P_{cc} (u_f)}{c_{pT}} \right],$$

$$\frac{dT_{tbin}}{dt} = \frac{R_T T_{tbin}}{p_{tbin} V_{cc}} \left[\gamma_T \left(G_{thr} T_{ccin} \frac{c_{pcomp}}{c_{pT}} - G_{ib} T_{tbin} + \frac{P_{cc} (u_f)}{c_{pT}} \right) - T_{tbin} (G_{thr} - G_{ib}) \right],$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{G_{ib} c_{pT} (T_{tbin} - T_{tbout}) - G_{comp} c_{pcomp} (T_{cpout} - T_{in})}{NI},$$

де індексом *cpout* позначено величини на виході компресора, *comp* — величини в камері компресора, індекси *tbin*, *tbout* позначають величини на вході і виході турбіни, P_{cc} — потужність, що подається до камери згорання, об'єм якої V_{cc} , I — параметр, що визначає момент інерції ротора ГТУ, а індексом T позначено параметри газу у камері

згорання, залежності G_{comp} , G_{bb} , G_{pb} , G_{thr} , G_{tb} , T_{cponb} , T_{plin} , N_{ccin} , T_{tboub} , P_{cc} наперед визначені.

Загальний вигляд моделі можна продемонструвати на прикладі газотурбінного двигуна. Статична модель задається у вигляді залежності, що відображає дросельні характеристики двигуна

$$\bar{x}_{cm} = \bar{F}(\bar{S}), \quad (1)$$

де $\bar{x}_{cm} = col[n_i, T_i, P_k, n_k, N]$, n_i — обороти турбін, T_i — значення температури газів за ними, P_k — тиск за компресором, n_k — степінь підвищення тиску, N — потужність або тяга газотурбінного двигуна, \bar{F} — нелінійна вектор-функція, \bar{S} — вектор керуючих та збуджуючих дій, основною з яких є витрати палива G_T . Залежності (1) задаються таблично або апроксимуються поліноміальними функціями.

Динамічні моделі газотурбінних двигунів, що застосовуються при дослідженнях, зазвичай, є кусково-лінійними диференціальними моделями простору станів, які мають вигляд

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Delta \bar{x} = A \Delta \bar{x} + B \Delta \bar{u}, \\ \bar{y} = C \Delta \bar{x} + D \Delta \bar{u}, \end{cases} \quad (2)$$

де $\Delta \bar{x} = col[n_{cmi} - n_i]$ — вектор фазових динамічних координат, $\Delta \bar{u}$ — вектор відхилень керуючих та збуджуючих дій, $\bar{y} = col[\Delta n_i, \Delta T_i, \Delta P_k, \Delta n_k, \Delta N]$ — вектор відхилень вихідних координат; A, B, C, D — матриці, елементи яких є кусково-сталими функціями G_T або $n_k = P_k / P_{ex}$.

Моделі (1), (2) можуть бути отримані або виходячи з точних термогазодинамічних математичних моделей, або шляхом їх ідентифікації за даними стендових випробувань. Слід вказати, що на етапі розробки такі моделі відображають властивості деякого типового двигуна-еталона, однак характеристики конкретного газотурбінного двигуна можуть суттєво відрізнятися від типового. Необхідність конкретизації алгоритмів електронних систем управління та розв'язування діагностичних задач вимагає індивідуалізації математичної моделі, що досягається їх навчанням з використанням баз даних стендових випробувань.

Досвід комп'ютерної реалізації математичних моделей (1), (2) в інтерактивному середовищі Matlab для ряду авіаційних ГТД (AI-450, AI-25ТЛШ, ТВ3-117, AI-436 та інших) показав, що на їх основі може бути розв'язаний ряд прикладних задач, проте виявив також принципові недоліки, найістотнішим з яких є розривність прискорень при кусково-сталому заданні правої частини. Апроксимація правої частини в (1), (2) призводить, у ряді випадків, до небажаних ефектів при числовій реалізації. Крім того, очевидна надмірність (2) ускладнює алгоритми комп'ютерної реалізації.

Розглядаючи розв'язок (2) у вигляді

$$\Delta \bar{x}(t) = \int_{t_0}^t \Phi(t, s) B(s) \Delta \bar{u}(s) ds, \quad (3)$$

де Φ — перехідна матриця для моделі (2), можна зробити висновок, що модель (3) у компактній формі зберігає повний зміст вихідної моделі, звідки випливає припущення, що основні термогазодинамічні параметри газотурбінних двигунів можуть бути пов'язані більш загальними по відношенню до (1), (2) математичними залежностями, а саме — інтегральними рівняннями і операторами. Така математична модель може бути побудована як для сталих, так і для динамічних режимів газотурбінних двигунів.

Узагальненою формою інтегральних лінійних динамічних моделей є *інтегральний оператор Вольтерри*

$$y(t) = \int_0^t K(t, x) f(s) ds + y(0), \quad (4)$$

а також рівняння Вольтерри другого роду

$$y(t) + \int_0^t K(t, x) f(s) ds = f(t), \quad (5)$$

де $y(t)$ — вихідна координата, $f(t)$ — зовнішній вплив (або керування), $K(t, x)$ — ядро, що описує динамічну характеристику об'єкта. Моделі (4) і (5) можуть розглядатись як скалярні або векторно-матричні залежності.

Для вибору найбільш доцільної моделі з декількох можливих необхідно застосовувати еквівалентні та апроксимаційні перетворення [4—6]. Основою для розв'язування задач еквівалентного перетворення моделей є *метод перетворення з розщепленням*.

Нехай відома модель динамічного об'єкта у вигляді звичайного диференціального рівняння

$$D[y] = y^{(n)}(x) + \sum_{i=1}^n a_i y^{(n-i)}(x) = f(x), \quad y^{(i)}(0) = C_i, \quad i = \overline{0, n-1}, \quad (6)$$

або в операторній формі

$$D[y] = f. \quad (7)$$

Розчеплюючи оператор D на два оператори, тобто записуючи $D = D_1 + D_2$, отримуємо диференціальне рівняння

$$D_1[y] = \psi, \quad (8)$$

де $\psi(x) = f(x) - D_2[y]$. Вибираючи такий спосіб розщеплення, щоб допустимим був аналітичний розв'язок рівняння (8), отримаємо розв'язок

$$y = D_1^{-1}[\psi], \quad (9)$$

який є інтегральним або інтегро-диференціальним рівнянням, оскільки оператор D_1^{-1} , як обернений по відношенню до D_1 , є інтегральним оператором. Метод може застосовуватись у нелінійних задачах та допускає комп'ютерну реалізацію. Частковими випадками методу є методи старшої похідної та послідовного інтегрування [7].

Нелінійні непараметричні динамічні моделі Вольтерри. Для опису нелінійних динамічних об'єктів з невідомою структурою (типу «чорний ящик») використовують ряд Вольтерри, який має вигляд:

$$\begin{aligned}
 y_j(t) = & \sum_{i_1=1}^{\nu} \int_0^t w_{i_1}^j(\tau) x_{i_1}(t-\tau) d\tau + \\
 & + \sum_{i_1=1}^{\nu} \sum_{i_2=1}^{\nu} \int_0^t \int_0^t w_{i_1 i_2}^j(\tau_1, \tau_2) x_{i_1}(t-\tau_1) x_{i_2}(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + \\
 & + \sum_{i_1=1}^{\nu} \sum_{i_2=1}^{\nu} \sum_{i_3=1}^{\nu} \int_0^t \int_0^t \int_0^t w_{i_1 i_2 i_3}^j(\tau_1, \tau_2, \tau_3) x_{i_1}(t-\tau_1) x_{i_2}(t-\tau_2) x_{i_3}(t-\tau_3) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \dots, \\
 & j = \overline{1, \mu},
 \end{aligned} \tag{10}$$

де $x_1(t), \dots, x_{\nu}(t)$ — вхідні впливи, $y_j(t)$ — відгук об'єкта на j -му виході в даний момент часу t при нульових початкових умовах; $w_{i_1 i_2 \dots i_n}^j(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$ — ядра Вольтерри n -го порядку по i_1, i_2, \dots, i_n входах і j -му виходу, симетричні щодо дійсних змінних $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ функцій; ν, μ — кількість входів і виходів, відповідно. Ефективне застосування моделей (10) у задачах ідентифікації і діагностики пояснюється його принципово важливими перевагами і явними співвідношеннями між вхідними та вихідними змінними; універсальністю — можливістю дослідження нелінійних неперервних у часі та імпульсних систем, стаціонарних і нестаціонарних; одночасним і компактним урахуванням нелінійних та інерційних (динамічних) властивостей об'єкта.

Задачі ідентифікації динамічних моделей. Інтегральний метод. Отримання і уточнення параметрів моделей, що відтворюють процеси в силових установках на основі експериментальних даних є задачею ідентифікації [8—10], розв'язування якої, в багатьох випадках, пов'язано зі значними труднощами у зв'язку з їх принциповою некоректністю, притаманною оберненим задачам. Тому пошук ефективних завадостійких методів і алгоритмів ідентифікації та їх удосконалення є актуальними. Використання інтегральних моделей динаміки дозволяє зробити ще один крок у даному напрямку.

Розглянемо випадок стаціонарного динамічного об'єкта, який описується диференціальним рівнянням виду

$$u^{(m)}(t) + p_1 u^{(m-1)}(t) + \dots + p_m u(t) = f(t), \quad u^{(i-1)}(0) = C_i, \quad i = \overline{1, m}, \tag{11}$$

де C_i — відомі величини (початкові умови), $u(t)$, $f(t)$ — відповідно, вхідний і вихідний сигнали, p_i — параметри, що визначаються. Методом послідовного інтегрування рівняння (11) перетвориться до еквівалентного інтегрального рівняння Вольтерри другого роду

$$u(t) - \int_0^t K(t,s)u(s)ds = F(t), \quad t \in [0, T],$$

де

$$K(t,s) = \sum_{i=1}^m p_i \frac{(t-s)^{i-1}}{(i-1)!}, \quad m \in N,$$

$$F(t) = \int_0^t \frac{(t-s)^{m-1}}{(m-1)!} f(s)ds + \sum_{i=1}^{m-1} C_i \frac{t^i}{i!} + \sum_{i=1}^{m-1} p_i \sum_{k=0}^{m-i-1} C_k \frac{t^{k+i}}{(k+i)!}.$$

Розбивши період вимірювань на N точок з кроком $h = \frac{T}{N}$,

отримуємо СЛАР відносно невідомих коефіцієнтів p_i

$$\sum_{i=1}^m A_{ij} p_i = F_j, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, N},$$

де

$$A_{ji} = \int_0^{t_j} \frac{(t_j - s)^{i-1}}{(i-1)!} u(s)ds - \sum_{k=0}^{m-i-1} C_k \frac{t_j^{k+i}}{(k+i)!}, \quad i = \overline{1, m-1},$$

$$A_{jm} = \int_0^{t_j} \frac{(t_j - s)^{m-1}}{(m-1)!} u(s)ds,$$

$$F_j = \int_0^{t_j} \frac{(t_j - s)^{m-1}}{(m-1)!} f(s)ds - u(t) + \sum_{i=0}^{m-1} C_i \frac{t_j^i}{i!}.$$

Таким чином, використання інтегральної форми динамічної моделі дає змогу отримати, на відміну від більшості існуючих методів, обчислювальну схему розв'язання задачі параметричної ідентифікації, яка не передбачає використання оптимізаційних алгоритмів.

Структура та модульний склад програмного комплексу модельної підтримки функціонування випробувального комплексу. Програмна частина системи математичного і комп'ютерного забезпечення випробувальних стендів силових установок разом з традиційними засобами реєстрації результатів випробувань та формування керуючих впливів для управління експериментом і керування процесами в об'єкті випробувань, містить в собі підсистему комп'ютерного моделювання. Підсистема виконує функції модельної підтримки робочих процесів випробувальних стендів, тобто комп'ютерної реалізації математичних моделей об'єкта випробування з можливістю відпрацювання методів керування,

контролю і діагностики. Крім того, забезпечується можливість формування та уточнення моделей за даними випробувань.

Згідно обраного підходу, програмний комплекс моделювання будується на основі певного набору алгоритмів числової реалізації традиційних та запропонованих математичних моделей. Набір алгоритмів охоплює наступні задачі та моделі:

- моделювання нелінійних робочих характеристик елементів та вузлів силових установок;
- лінеаризація динамічних моделей;
- розв'язування лінійних і нелінійних диференціальних рівнянь, в тому числі типових рівнянь опису компресорів газотурбінних установок в цілому;
- формування і числова реалізація лінійних інтегральних динамічних моделей явного виду;
- формування і числова реалізація лінійних інтегральних динамічних моделей неявного виду;
- формування і числова реалізація нелінійних інтегральних динамічних моделей явного виду;
- еквівалентне та апроксимаційне перетворення динамічних моделей;
- лінійна і нелінійна ідентифікація моделей динамічних об'єктів.

Для розробки програмного комплексу модельної підтримки випробувальних стендів силових установок найбільш ефективним є підхід з використанням принципу декомпозиції, на якому традиційно ґрунтуються дослідження та інженерні розробки при створенні зразків нової техніки на основі математичного моделювання. Підхід дозволяє використовувати, в тому числі одночасно, різні види динамічних моделей, створювати розгалужене алгоритмічне забезпечення з можливістю розробки і застосування відповідного набору програмних модулів, використовувати опис системи, що моделюється, в природній і зручній для розробника графічній формі.

На основі порівняльного аналізу для реалізації запропонованих алгоритмів обрано інтерактивну систему Matlab, яка є зручним та доступним засобом для дослідницьких інженерних обчислень та моделювання систем достатньо високого рівня складності.

Розроблений програмний комплекс модельної підтримки випробувальних стендів складається з шести блоків (підсистем), які забезпечують розв'язування всієї низки задач комп'ютерного моделювання процесів у силових установках, в тому числі з дослідженням і відпрацюванням методів керування, контролю і діагностики. Структура комплексу приведена на рис. 4, де перераховано розроблені програмні модулі та задачі, які за допомогою них розв'язуються.



Рис. 4. Програмні засоби та задачі

Програмні засоби апробовані на модельних (тестових) задачах та використовувались при розв'язуванні таких практичних задач: формулювання непараметричних інтегральних моделей датчиків у системах вимірювання випробувального обладнання, отримання спрощеної математичної моделі газотурбінного двигуна по каналу подачі палива, побудова діагностичної моделі вентильного реактивного двигуна.

Висновки. Таким чином, запропоновані підходи до розв'язування задачі побудови математичного та програмного забезпечення випробувальних стендів силових установок з урахуванням необхідності виконання випробувань не тільки в зонах технологічних режимів, але й у зонах, що граничать з аварійними режимами дають змогу ефективно розв'язувати не лише задачі аналізу, а також задачі побудови і доводки підсистем керування, контролю та діагностування силових установок на основі комп'ютерного моделювання.

Список використаних джерел:

1. Испытания и обеспечение надежности авиационных двигателей и энергетических установок : учебник для вузов / Е. Ю. Марчуков, И. И. Онищик,

- В. Б. Рутовский, Е. М. Таран, А. Я. Черкез ; [под ред. И. И. Онищика]. — М. : Изд-во МАИ, 2004. — 336 с.
2. Цанев С. В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций / С. В. Цанев, В. Д. Буков, А. Н. Ремезов. — М. : Издательство МАИ, 2002. — 584 с.
 3. Meuleman C. Measurement and Unsteady Flow Modelling of Centrifugal Compressor Surge. — Ph. D. thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, The Netherlands. — 2002. — 145 p.
 4. Верлань А. Ф. Математическое моделирование непрерывных динамических систем / А. Ф. Верлань, С. С. Москалюк. — К. : Наукова думка, 1988. — 287 с.
 5. Верлань А. Ф. Комп'ютерне моделювання в задачах динаміки електромеханічних систем / А. Ф. Верлань, В. А. Федорчук, В. А. Іванюк // ПІМЕ ім. Г. С. Пухова. — Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2010. — 204 с.
 6. Дячук О. А. Метод отримання спрощеної макромоделі динамічної системи засобами середовища SIMULINK-MATLAB / О. А. Дячук // Математичні машини і системи. — 2008. — № 2. — С. 81–89.
 7. Верлань А. Ф. Методи математического и компьютерного моделирования измерительных преобразователей и систем на основе интегральных уравнений / А. Ф. Верлань, М. В. Сагаатов, А. А. Сытник. — Ташкент : Издательство «Фан» АН Республики Узбекистан, 2011. — 336 с.
 8. Идентификация и диагностика в информационно-управляющих системах авиакосмической энергетики / Б. В. Боев, В. В. Бугровский, М. П. Вершинин и др. — М. : Наука, 1988. — 168 с.
 9. Kulikov G. G. Dynamic modelling of gasturbines: identification, simulation, condition monitoring and optimal control / G. G. Kulikov, H. A. Thompson. — London : Springer-Verlag, 2004. — 305 p.
 10. Doyle F. J. Identification and Control Using Volterra Models / F. J. Doyle, R. K. Pearson, B. A. Ogunnaik. — Published Springer Technology & Industrial Arts. — 2001. — 314 p.

In article scientifically-practical results on building of methods and means of modelling support of processes of functioning of modern and perspective test stands of power-plants of power and transport appointment are reflected.

Key words: *test stands, power-plants, modelling support.*

Отримано: 15.02.2012