



Ройзман В. П.

Горошко А. В.

*Хмельницький
національний
університет*

Royzman V. P.

Goroshko A. V.

*Khmelnyskyi National
University*

УДК 621.01: 539.3

МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛЕЙ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Розроблено метод пробних параметрів для ідентифікації математичних моделей складних технічних систем з врахуванням ступеня ідеалізації реальних об'єктів і їх умов експлуатації. Ідентифікація параметрів і коефіцієнтів моделей досягається залученням додаткових параметрів з точними значеннями, що дозволяє підвищити точність і ефективність моделювання. За допомогою розробленого методу ідентифіковано амплітудно-частотну характеристику компресора авіадвигуна АИ-20. На основі методу розроблено розрахунково-експериментальний метод ідентифікації фізико-механічних характеристик полімерних матеріалів, за допомогою якого отримано значення фізико-механічних характеристик полімерних матеріалів при температурі (-60 до +20).

Ключові слова: ідентифікація, параметри, модель, обернена задача, амплітудно-частотна характеристика, авіадвигун, фізико-механічні характеристики.

Постановка проблеми. Одне з основних завдань, що стоять перед проектувальниками складних технічних систем (СТС), полягає в побудові адекватних математичних моделей. Підвищити точність моделі шляхом ускладнення, враховуючи якнайбільшу кількість даних і параметрів моделі, не завжди можливо, а часом і неможливо взагалі, оскільки виникає наступна залежність: чим складніше механічна система, тим важче для неї побудувати адекватну математичну модель [1]. Реальним способом побудови (створення) адекватних математичних моделей є шлях використання методів ідентифікації систем.

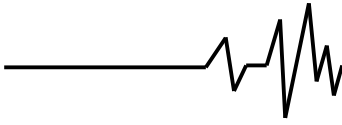
Як правило, СТС можуть мати невідому структуру або невідомі (неточні) параметри моделі, або і те й інше. Тому розрізняють структурну і параметричну ідентифікацію. При цьому необхідно відзначити, що підстановка неточних параметрів навіть у найточнішу розгалужену математичну модель призведе до неточних результатів моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Задачам ідентифікації, що є за своєю постановкою оберненими і некоректними, притаманні проблеми обернених задач, такі як проблеми точності і стійкості [1]. В даний час методи ідентифікації активно розвиваються як вітчизняними, так і зарубіжними вченими [2-4].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на існування чималої кількості робіт, присвячених проблемам ідентифікації, питання визначення точних значень параметрів моделей для конкретної партії матеріалу, температури і, особливо, розрахункової схеми, є недостатньо вивченим.

Мета дослідження: одержання ефективних математичних моделей складних технічних систем шляхом розробки нового методу їх параметричної ідентифікації.

Основні результати дослідження.
Суть методу. Часто деякі характеристики СТС або коефіцієнти, які входять в розрахункову модель, не можуть бути вимірянні, або вимірюються з великими похибками без врахування реальних умов експлуатації, а також ідеалізації реального об'єкта, або внаслідок значного розкиду значень, вимагають уточнення. Для визначення таких характеристик пропонується вважати їх значення невідомими у наявній розрахунковій моделі, а значення тих характеристик об'єкта, які можуть бути вимірянні достатньо точно в реальних умовах функціонування об'єкта, підставляти в ту ж модель в якості вхідної інформації. Тоді виникає можливість ідентифікувати значення шуканих характеристик і (або) коефіцієнтів. Сформулюємо задачу такої ідентифікації.



Нехай структура зв'язку між вихідними характеристиками об'єкту і його первинними факторами задана системою функціональних нерівностей

$$Y_i = f_i(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_j, x_1, x_2, \dots, x_k), \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

де $\eta \in \mathbf{R}^j$, $x \in \mathbf{R}^k$. Необхідно за вимірними на реальному об'єкті значеннями вихідних характеристик і заданій моделі визначити значення в загальному випадку як коефіцієнтів цієї моделі $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_j$, так і невідомих первинних факторів x_1, x_2, \dots, x_k . Частинний випадок постановки такої задачі передбачає, що значення коефіцієнтів моделей невідомі.

Сформульована задача вимагає відшукування відображення точки в просторі вихідних характеристик СТС в точку в просторі первинних факторів і коефіцієнтів моделі. В залежності від співвідношення кількості невідомих і кількості рівнянь в системі (1) будемо розрізняти наступні три типи задач: недовизначені, нормальні і перевизначені.

В чисто математичному плані дослідження і пошук розв'язків таких задач не викликає великих складнощів. Однак, з урахуванням того факту, що кожна математична модель є описом деякого реально існуючого об'єкта, постановка, розв'язок і аналіз таких задач видається надзвичайно важливим. Так, якщо точка в просторі вихідних характеристик визначається за результатами відповідних експериментів на реальному об'єкті, то розв'язок задачі дозволяє ідентифікувати невідомі первинні фактори і коефіцієнти моделі, по-перше, з врахуванням всіх більш або менш суттєвих особливостей реального об'єкта. Цим виключена необхідність виокремлення і аналізу кожної з них. По-друге, враховується прийнятий ступінь ідеалізації реального об'єкту, що суттєво підвищує ефективність використання моделі в практиці проектування і виробництва. Крім того, таким чином можна визначити значення первинних факторів, які неможливо безпосередньо виміряти, а також коефіцієнтів моделі шляхом вираховування їх за результатами спостережень інших величин.

Зупинимось детальніше на дослідженні недовизначених задач, які часто зустрічаються в практиці проектування, виробництва і експлуатації ССТС. Такі задачі в загальному випадку мають нескінченну безліч розв'язків. Але з причини існування реального об'єкта, природно визначити саме відповідне йому рішення. Постановка такої задачі передбачає її доозначення на основі експерименту на

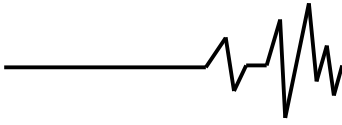
досліджуваному об'єкті. З цією метою в роботі пропонується узагальнений метод пробних параметрів, суть якого полягає у наступному.

Замінюючи в реальному об'єкті один або декілька елементів з невідомими значеннями первинних факторів на деякі пробні елементи, значення первинних факторів яких відомі, і вимірюючи відповідні їм значення вихідних характеристик СТС, можна отримати стільки відсутніх рівнянь, скільки вимагається, щоб система стала визначеною. В тих випадках, коли заміна вузла або елемента в конструкції повністю неможлива, пропонується вносити часткові зміни первинних факторів, провокуючи таким чином зміну вихідних характеристик. Вказані послідовні заміни елементів з невідомими значеннями факторів на пробні необхідно здійснювати таким чином, щоб отримана при цьому система рівнянь, по-перше, була нормальною, і, по-друге, щоб кожен із невідомих факторів попав хоча б в одне із рівнянь системи. Крім того, пробні елементи необхідно вибирати таким чином, щоб отримана система не містила залежних рівнянь.

В кожному конкретному випадку описаної ідентифікації особливого дослідження вимагає питання стійкості отриманого розв'язку.

Застосування методу для ідентифікації амплітудно-частотної характеристики авіадвигуна. Амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) будуються на підставі безперервного запису вібрацій в деяких характерних точках на його корпусі від моменту запуску до набору максимальних частот обертання. Вони характеризують не тільки рівень вібрацій машини, але і явно чи приховано містять в собі відомості про динамічні характеристики (масах, жорсткості, моментах інерції, демпфіруванні) багатьох вузлів і деталей двигуна. Для складних машин ці характеристики мають багатовершинний характер, що свідчить про те, що двигун проходить через кілька резонансних зон, але причини кожного з резонансів при цьому можуть залишатися невідомими. Тому надзвичайно важливо вміти правильно ідентифікувати кожен з резонансів для боротьби з ним.

Зазвичай проводяться дослідження динаміки окремих вузлів і машин в цілому не завжди приводять до успіху, якщо далекі від натурних умов експлуатації виробу, не враховують різноманіття факторів, що впливають і динамічну модель системи, а між тим винятково важливо знаходити точні значення динамічних характеристик, прив'язаних саме до математичної моделі, і тим



самим підвищувати її ефективність. Цього можна досягти розв'язанням оберненої задачі динаміки за експериментально отриманою АЧХ.

В процесі експлуатації двигунів АИ-20 і при проведенні тривалих випробувань на стендах були виявлені такі дефекти, як погнутість заднього вала, поломки штифтового з'єднання ротора компресора, головним чином, в зчленуванні заднього вала з десятою ступінню ротора, а також ряд дефектів по корпусу камери згоряння.

Передбачалося, що виникнення зазначених дефектів пов'язане з проходженням через критичні частоти обертання ротора компресора в системі двигуна; це припущення посилювалося також неприпустимо високим рівнем вібрацій окремих екземплярів двигунів АИ-20 на режимі малого газу, де коливання носять резонансний характер.

На рис. 1 представлена АЧХ компресора двигуна АИ-20 на випробувальному вакуумному стенді МАІ.

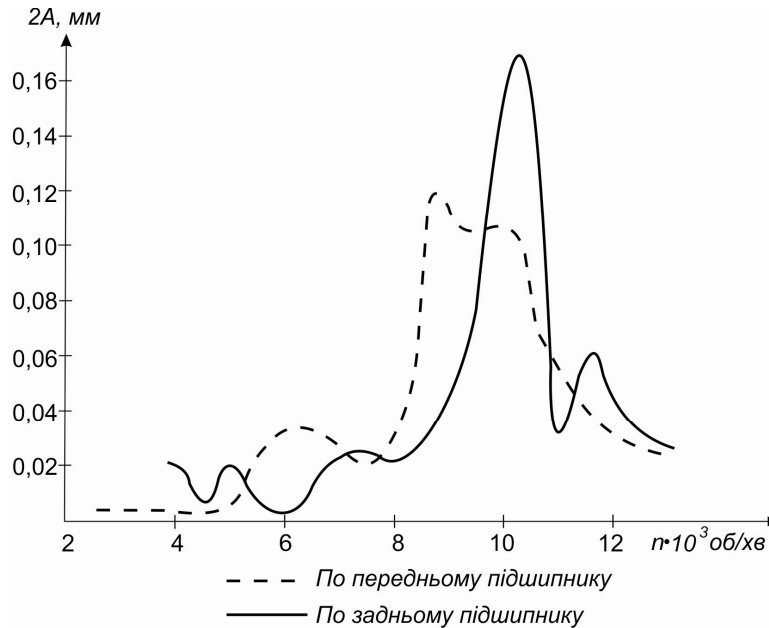


Рис. 1. АЧХ компресора: 1 – по передній опорі; 2 – по задній опорі

Тут чітко видно наявність чотирьох-п'яти резонансів, а зазначені вище дефекти пов'язані з проходженням ротора через ці резонанси або навіть з роботою на (або поблизу) деяких з них. Необхідно було з'ясувати походження всіх резонансів, щоб потім впливати на їх значення за частотою і амплітудою.

Для динамічної моделі для розрахунку спільних коливань системи ротор-опори ротор компресора масою m_1 і піддатливістю під центром мас a_{11} покоїться на двох пружних опорах податливостей a_{22} і a_{33} з приєднаними до них масами лобового картера m_2 і камери згоряння – m_3 .

Значення критичних частот обертання і резонансів такої тримасової системи знаходять із розв'язку «вікового» визначника системи трьох рівнянь, що описують її коливання.

Однак у цьому визначнику невідомі всі податливості, крім α_{11} .

$$\begin{vmatrix} 1 - m_1 \alpha_{11} \omega^2 & -m_2 \alpha_{12} \omega^2 & -m_3 \alpha_{13} \omega^2 \\ -m_1 \alpha_{21} \omega^2 & 1 - m_2 \alpha_{22} \omega^2 & -m_3 \alpha_{23} \omega^2 \\ -m_1 \alpha_{31} \omega^2 & -m_2 \alpha_{32} \omega^2 & 1 - m_3 \alpha_{33} \omega^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

Для ідентифікації невідомих податливостей і застосований метод пробних параметрів. В якості пробного елемента використовувалося пружне кільце, показане на рис. 2, що одягається на зовнішню обійму переднього підшипника ротора компресора, характеристика жорсткості якого була визначена на спеціальному пристосуванні і виявилася значно більше податливості ротора $a_{\text{кільця}} = 50 \times 10^{-6}$ (м/н).

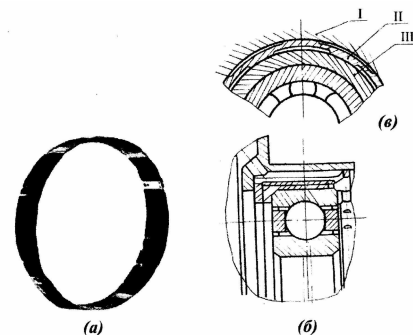
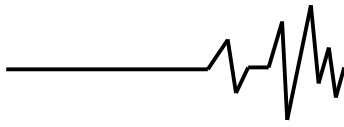


Рис. 2. Опора ротора компресора з пружним кільцем



Податливості опор ротора, розташовані в лобовому картері і корпусі камери згоряння, ідентифікували по етапах:

1. Знаючи пружність кільця і вважаючи, що пружність передньої опори компресора визначається лише їм, за значенням резонансу двигуна з пружним кільцем ідентифікували податливість задньої опори, розглядаючи коливання одномасової ротора на двох піддатливих опорах.

2. За знайденим значенням податливості задньої опори і значенням резонансів двигуна без пружною опори ідентифікували податливість передньої опори.

Далі розраховували власну частоту коливань складових системи, тобто власну частоту коливань ротора компресора на жорстких опорах, лобового картера на податливості α_{22} , що відповідає резонансам цих вузлів. Нарешті, зробили розрахунок спільних коливань системи.

Зіставлення результатів розрахунку з експериментом дозволило представити повну картину коливань і причини резонансів [5].

Застосування методу для ідентифікації фізико-механічних характеристик полімерних матеріалів.

Об'єктом досліджень був процес визначення фізико-механічних характеристик полімерного компаунда, який використовують при герметизації мікромодулей (ММ), що застосовуються у електронній техніці. Під час експлуатації ММ мали місце випадки механічного руйнування резисторів у складі ММ.

В роботі [6] проаналізовано причини руйнування ММ і розроблено математичну модель розрахунку напружень у системі електронний елемент-компаунд, що описує залежність контактного тиску в матеріалах резистора і компаунда при усталеній температурі від геометричних розмірів деталей конструкції та їх фізико-механічних характеристик.

Встановлено, що під час експлуатації ММ в конструкції електронний елемент-компаунд з'являються небезпечні напруження, причинами яких є різниця коефіцієнтів лінійного температурного розширення (КЛТР), Пуассона та модулів пружності вказаних матеріалів, що приводить до руйнування ММ і, як наслідок, руйнування складних дорогих систем, частиною яких вони є.

Проведений аналіз показав, що модель виявилась придатною для розрахунків на міцність деталей системи, але розкид значень параметрів моделі, а саме фізико-механічних характеристик компаундів при виробництві ММ

для різних партій може досягати 300% і залежить від багатьох факторів, як наприклад, місце виготовлення складових компаунда. Очевидно, що підстановка значень параметрів з такими величезними розкидами у математичну модель дає розкид результатів. Крім того, характеристики компаундів в температурному діапазоні $-60^{\circ}\text{C} \dots +20^{\circ}\text{C}$ взагалі невідомі, хоча вказані ММ експлуатуються за таких температур.

Ці міркування привели до постановки задачі розробки методу параметричної ідентифікації фізико-механічних характеристик компаундів безпосередньо в реальних конструкціях в температурному діапазоні $-60^{\circ}\text{C} \dots +20^{\circ}\text{C}$ шляхом розв'язку оберненої задачі міцності. Для практичної реалізації методу пробних параметрів для визначення фізико-механічних характеристик компаундів необхідно, як було вказано раніше, забезпечити коректність застосування розрахункової схеми двошарових складових циліндрів. Це передбачає виконання наступних умов: циліндри в складовій конструкції мають бути товстостінними; складовий двошаровий циліндр має бути достатньо довгим для того, щоб у відповідності до принципу Сен-Венана у місці, де будуть відбуватися деформації, не позначався вплив крайових ефектів.

Для проведення експериментів було розроблено і виготовлено спеціальне пристосування (рис. 3). Основними елементами пристосування є полий мідний циліндр (пробний елемент), полий сталевий циліндр, розрізаний по двом діаметрально протилежним твірним, циліндрична опорна пластина з двома коаксіальними циліндричними проточками, призначеними для фіксації пробного і сталевого циліндрів.

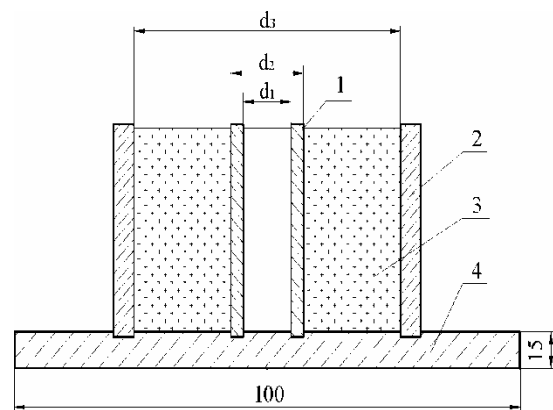
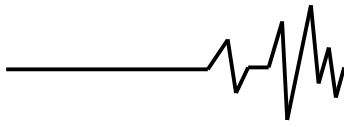


Рис. 3. Схема пристосування для визначення фізико-механічних характеристик компаунда: 1 – полий мідний циліндр; 2 – полий сталевий циліндр; 3 – компаунд; 4 – опорна пластина



Було виготовлено три таких пристосування, що різняться один від одного діаметром циліндрів і відповідними розмірами поверхні опорних фіксуючих пластин.

Перед складанням пристосувань опорні поверхні сталених напівциліндрів і опорної пластини покривали тонким шаром компаунду (для забезпечення вільного роз'єму конструкції після проведення експериментів), а мідні циліндри препарували малобазними тензорезисторами типу МПТ для вимірювання окружних відносних деформацій поверхні контакту.

Після закінчення препарування тензодатчиками і полімеризації компаунда, мідні циліндри і сталеві напівциліндри встановлювали в опорні пластини, напівциліндри стягували за допомогою хомути, стики закривали шаром КЛТ-30. Потім вільну порожнину між сталевими і мідними циліндрами заливали компаундом. Полімеризацію компаунда здійснювали за заводською технологією. Після закінчення процесу полімеризації в пристосуваннях знімали опорну пластину і сталеві напівциліндри.

Отримані двошарові конструкції поміщали в кліматичну камеру Файтрон 3526/51 з температурою -20°C . Конструкції витримувалися при такій температурі до їх

повного охолодження, після чого реєстрували покази тензорезисторів. Потім температуру в камері знижували ще на 10°C , знімали покази тензодатчиків і т.д. поки температура не досягне значення -60°C .

Температурний діапазон $-20^{\circ}\text{C} \dots -60^{\circ}\text{C}$ був обраний тому, що при низьких від'ємних температурах фізико-механічні характеристики полімерів взагалі не відомі, а саме за цих температур в компаунді і в електронному елементі з'являються максимальні напруження.

Параметрами, які входять в обрану математичну модель і вимірюються експериментально, були виникаючі від дії контактного тиску окружні деформації на внутрішній поверхні герметика і зовнішній поверхні циліндра з пробного матеріалу. За виміряними значеннями деформацій визначали величину контактного тиску, а далі – значення КЛТР, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона компаунда в різних діапазонах від'ємних температур. Для забезпечення стійкості розв'язку систем рівнянь був застосований статистичний метод підвищення стійкості і алгоритм забезпечення заданої точності розв'язків погано обумовлених систем рівнянь [7], для чого вимірювання і обчислення проводили багатократно. Результати ідентифікації представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

Значення фізико-механічних характеристик компаунду

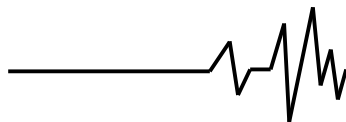
Температурний діапазон	Модуль Юнга E , $\text{H}/\text{мм}^2 \cdot 10^4$	Коефіцієнт Пуассона, μ	КЛТР α , $1/\text{град} \cdot 10^{-6}$
$-20^{\circ}\text{C} \dots -30^{\circ}\text{C}$	1,24	0,29	44,99
$-30^{\circ}\text{C} \dots -40^{\circ}\text{C}$	1,21	0,31	43,03
$-40^{\circ}\text{C} \dots -50^{\circ}\text{C}$	1,21	0,32	42,61
$-50^{\circ}\text{C} \dots -60^{\circ}\text{C}$	1,20	0,33	42,07

Висновки. Розроблений метод пробних параметрів для уточнення математичних моделей складних систем з врахуванням ступеня ідеалізації реальних об'єктів і їх умов експлуатації шляхом ідентифікації параметрів, які входять у них, і коефіцієнтів моделей, який відрізняється залученням додаткових параметрів з точними значеннями, що дозволяє підвищити точність і ефективність моделювання. За допомогою методу ідентифіковано амплітудно-частотну характеристику компресора авіадвигуна АІ-20.

Розроблено розрахунково-експериментальний метод ідентифікації фізико-механічних характеристик полімерних матеріалів, за допомогою якого отримано значення фізико-механічних характеристик полімерних матеріалів при температурі (-60 до $+20$).

Список використаних джерел

1. Костин В.А. Решение обратных задач прочности тонкостенных конструкций летательных аппаратов: дис.... доктора техн. наук : 05.07.03 / Костин Владимир Алексеевич. – Казань., 2002. – 324 с.
2. Avril S. Overview of identification methods of mechanical parameters based on full-field measurements / M. Bonnet, A. S. Bretelle, M. Grédiac, F. Hild, P. Ienny, ... & F. Pierron // Experimental Mechanics. – 2008. № 48(4). P. 381–402.
3. Гук Н.А. Идентификация механических свойств материала по результатам косвенных измерений / Н.А. Гук, Н.И. Ободан // Механика твердого тела: Межвед. сб. науч. тр. – 2010. – Вып 40. – С. 233–243.
4. Алифанов О.М. Идентификация процессов тепло-и массообмена по методам



обратных задач. Современные экспериментальные методы исследования процессов тепло-и массообмена / О.М. Алифанов // Материалы Международной школы-семинара, часть 2. С. 133–147.

5. Royzman V.P. Dynamic characteristics identification of aircraft engine by method of trial parameters / V. Royzman, A. Bohorosh // ISSN 1392 – 1207. MECHANIKA. 2005. Nr.3(53). – P. 34–38.

6. Goroshko A. V. Methods for testing and optimizing composite ceramics-compound joints by solving inverse problems of mechanics / A. V. Goroshko, V. P. Royzman, A. Bubulis, K. Juzėnas // – JOURNAL OF VIBROENGINEERING. Vol. 16, Issue 5, 2014, p. 2178–2187.

7. Горошко А.В. Шляхи підвищення точності розв'язків зворотних задач / А.В. Горошко, В.П. Ройзман // Вісник Хмельницького національного університету. – 2013. №6. – С. 60–69.

Список джерел в транслітерації

1. Kostin V.A. Solution of inverse problems of strength of thin-walled aircraft designs: dis doctor tehn. Sciences: 05.07.03 / Vladimir Kostin. – Kazan. 2002. – 324 s.

2. Avril S. Overview of identification methods of mechanical parameters based on full-field measurements / M. Bonnet, A. S. Bretelle, M. Grėdiac, F. Hild, P. Ienny, ... & F. Pierron // Experimental Mechanics. – 2008. № 48(4). P. 381–402.

3. Guk N.A. Identification of the mechanical properties of the material according to the results of indirect measurements / NA Hooke, NI Obodan // Mechanics of Solids: Interagency. Sat scientific. tr. – 2010. – Vip 40. – S. 233–243.

4. Alifanov O.M. Identification of the processes of heat and mass transfer by the inverse scattering method. Modern experimental methods for studying the processes of heat and mass transfer. Proceedings of the International School-Seminar, Part 2, S. 133–147.

5. Royzman V.P. Dynamic characteristics identification of aircraft engine by method of trial parameters / V. Royzman, A. Bohorosh // ISSN 1392 – 1207. MECHANIKA. 2005. Nr.3(53). – P. 34–38.

6. Goroshko A. V. Methods for testing and optimizing composite ceramics-compound joints by solving inverse problems of mechanics / A. V. Goroshko, V. P. Royzman, A. Bubulis, K. Juzėnas // – JOURNAL OF VIBROENGINEERING. Vol. 16, Issue 5, 2014, p. 2178–2187.

7. Goroshko A.V. Ways to improve the accuracy of solutions of inverse problems / A.V. Goroshko, V.P. Royzman // Bulletin of Khmelnitsky National University. – 2013. №6. – P. 60–69.

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация. Разработан метод пробных параметров для идентификации математических моделей сложных технических систем с учетом степени идеализации реальных объектов и их условий эксплуатации. Идентификация параметров и коэффициентов моделей достигается привлечением дополнительных параметров с точными значениями, позволяет повысить точность и эффективность моделирования. С помощью метода идентифицировано амплитудно-частотную характеристику компрессора авиадвигателя АИ-20 путем поочередной идентификации податливости каждой из опор ротора, расположенных в лобовом картере и корпусе камеры сгорания. Разработан расчетно-экспериментальный метод идентификации физико-механических характеристик полимерных материалов, с помощью которого получено значение физико-механических характеристик полимерных материалов при температуре (-60°C до +20°C).

Ключевые слова: идентификация, параметры, модель, обратная задача, амплитудно-частотная характеристика, авиадвигатель, физико-механические характеристики.

METHOD OF MODEL PARAMETERS IDENTIFICATION OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

Annotation. Developed a method of test parameters for the identification of mathematical models of complex technical systems, taking into account the degree of idealization of real objects and their operating conditions. Identification of parameters and coefficients of the models achieved the involvement of additional parameters with the exact values, to improve the accuracy and efficiency of simulation. The method identified the frequency response of the aircraft engine compressor AI-20 by alternately identifying the compliance of each of the poles of the rotor located in the frontal housing and the housing of the combustion chamber.

Developed methods to assess the identification of physical and mechanical properties of polymeric materials used to obtain the value of physical and mechanical properties of polymeric materials at a temperature (-60°C to +20°C).

Key words: identification, parameters, model, inverse problem, frequency response, aircraft engine, physical and mechanical characteristics.