

УДК 628.517

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СИНТЕЗ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ АКТИВНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ВІБРАЦІЇ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА

О.В. Барабаш, професор, д.т.н., Г.В. Пекуровський, аспірант,  
Національний авіаційний університет, м. Київ

*Анотація.* Описано послідовність кроків при експериментальному синтезі цифрової адаптивної системи активної компенсації вібрації. Запропоновано методику ідентифікації об'єкта керування, що дозволяє системі керування працювати у лінійному діапазоні.

*Ключові слова:* адаптивна система керування, активні методи, компенсація вібраційного поля.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ВИБРАЦИИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПИД-РЕГУЛЯТОРА

О.В. Барабаш, профессор, д.т.н., Г.В. Пекуровский, аспирант,  
Национальный авиационный университет, г. Киев

*Аннотация.* Описана последовательность шагов при экспериментальном синтезе цифровой адаптивной системы активной компенсации вибрации. Предложена методика идентификации объекта управления, которая позволяет системе управления работать в линейном диапазоне.

*Ключевые слова:* адаптивная система управления, активные методы, компенсация вибрационного поля.

## EXPERIMENTAL SYNTHESIS OF ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS OF VIBRATION ACTIVE COMPENSATION WITH THE USE OF PID-CONTROLLER

O. Varabash, Professor, Doctor of Engineering Science, G. Pekurovsky, Post-graduate,  
National Aviation University, Kyiv

*Abstract.* In the article the authors describe the sequence of experimental synthesis stages of a digital adaptive control system of active vibration compensation. The methods of identifying the object of control have been proposed to allow the control system operation in a linear range.

*Key words:* adaptive control system, active methods, compensation of vibration field.

### Вступ

Незважаючи на те, що активні методи мають широкий вжиток у рамках задачі компенсації небажаного вібраційного або акустичного полів, досі наявна проблема адаптації автоматичної системи керування, побудованої на основі використання активних методів. Самоналаштування системи відповідно до змін у параметрах вібрації об'єкта керування є важкою для імплементації через нелінійний характер цих змін. Окремою проблемою є достовірна експериментальна ідентифікація моделі об'єкта

керування, що використовується для налаштування параметрів регулятора.

### Аналіз публікацій

Даній проблемі присвячено ряд публікацій як у вітчизняних, так і в іноземних виданнях. Фундаментальними дослідженнями є [1, 2], які присвячено базисним засадам активного контролю та адаптивного керування. Серед робіт українських вчених слід виділити [3, 4, 5], кожна з яких торкається різних аспектів даної проблематики.

### Мета і постановка задачі

Метою роботи є проведення експериментальної ідентифікації об'єкта керування та програмний синтез цифрової адаптивної автоматичної системи активної компенсації вібрації на основі використання ПІД-регулятора у середовищах розробки Matlab та Simulink.

### Експериментальний синтез адаптивної системи активної компенсації вібрації на основі використання ПІД-регулятора

За основу досліджень взято метод побудови системи керування на основі моделі об'єкта керування (рис. 1).

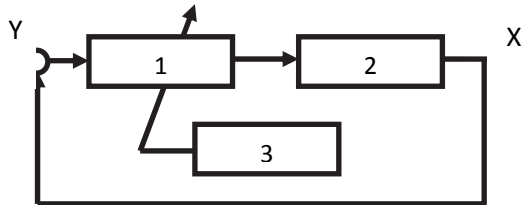


Рис. 1. Функціональна схема системи керування, побудованої на основі моделі об'єкта керування: 1 – регулятор; 2 – об'єкт керування; 3 – модель об'єкта керування; Y – вхід системи керування; X – вихід системи керування

Як регулятор прийнято рішення використати пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор (рис. 2).

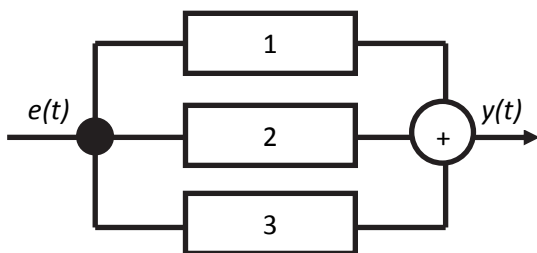


Рис. 2. Функціональна схема ПІД-регулятора: 1 – пропорційний блок; 2 – інтегральний блок; 3 – диференціальний блок;  $e(t)$  – сигнал помилки;  $y(t)$  – сигнал керування

ПІД-регулятор – пристрій у колі зворотного зв'язку, що використовується в системах автоматичного керування для формування сигналу керування. ПІД-регулятор формує сигнал керування, що є сумою трьох складових, перша з яких є пропорційною вхідному сигналу, друга – інтегралом вхідного сигналу, третя – похідною вхідного сигналу.

Співвідношення сигналу вихідних даних

$$y(t) = K_{II} \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (1)$$

Використання ПІД-регулятора вимагає проведення експериментальної ідентифікації моделі об'єкта керування. Об'єктом керування є затиснута сталевая пластина. Експериментальна установка побудована на основі моделі віртуального середовища Simulink (рис. 3), з якої через цифрово-аналогове перетворення плати збору даних Numusoft AD622 надходить керувана напруга на електромагнітний динамік, що за допомогою металевого штока прикріплений до об'єкта керування. На об'єкті керування створюється зовнішнє вібраційне збудження.

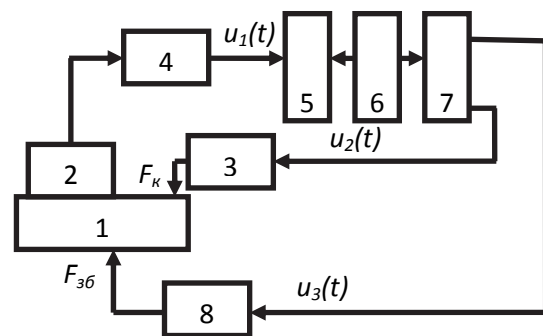


Рис. 3. Експериментальна установка: 1 – сталевая пластина; 2 – вібродатчик; 3 – підсилювач сигналу керування; 4 – підсилювач для вібродатчика; 5 – АЦП; 6 – ПІД-регулятор; 7 – ЦАП; 8 – підсилювач сигналу збудження;  $u_1(t)$  – вібросигнал;  $u_2(t)$  – сигнал управління;  $u_3(t)$  – сигнал збудження

Ідентифікація об'єкта керування проводиться у декілька етапів. Потрібно визначити оптимальні координати розташування вібродатчика та виконавчого пристрою, що створюватиме  $F_k$ . Оптимальними координатами вібродатчика мають бути такі, що знаходяться у всіх модах коливань, виконавчого пристрою – такі, що знаходяться у вузлі першої моди, яка знаходиться поза заданим діапазоном частот.

Для цього необхідно проаналізувати об'єкт керування на резонансні частоти у заданому діапазоні частот (табл. 1). Далі, збуджуючи об'єкт керування на цих частотах, візуально проаналізувати пластину на наявність і положення мод коливань. Для отримання значень резонансних частот об'єкта керування за 60 секунд збуджується на частоті, що лінійно зростає від 40 Гц до 250 Гц. Проведено три досліди за різних координат вібродатчика. Координати збуджуючого динаміка –  $197 \times 182$  мм.

Таблиця 1. Резонансні частоти сталевієї пластини

Координати вібродатчика, мм	98×263	98×88	227×248,5
Резонансні частоти, Гц	64,6	66,6	63,8
	77,3	75,3	72,2
	101,9	99,2	100,7
	112,8	115,4	110,6
	146,4	146,5	146,9
	165,8	160,1	165,4

Шляхом осереднення отримуємо резонансні частоти пластини: 65 Гц, 75 Гц, 101 Гц, 113 Гц, 147 Гц, 164 Гц.

Проведені далі дослідження об'єкта керування на моди коливань показали доцільність встановлення вібродатчика на координатах 88×100мм та виконавчого динаміка на координатах 170×248мм.

Наступним кроком має бути дослідження залежності між напругою на виходах АЦП та створюваним віброприскоренням. Доцільність даного дослідження базується на тому факті, що часто залежність між напругою на виході АЦП та створюваним віброприскоренням не є лінійною – в той самий час, коли адаптивна система, побудована на ПД-регуляторі, вимагає лінійності системи. Тому необхідно провести дослідження цієї характеристики в діапазоні частот 40 – 250 Гц для визначення такої її ділянки на кожній частоті, яка буде лінійною. Відповідно потрібно визначити максимальне та мінімальне значення напруги на цій ділянці.

Цей дослід впроваджується на основі робочої моделі Simulink (рис. 4).

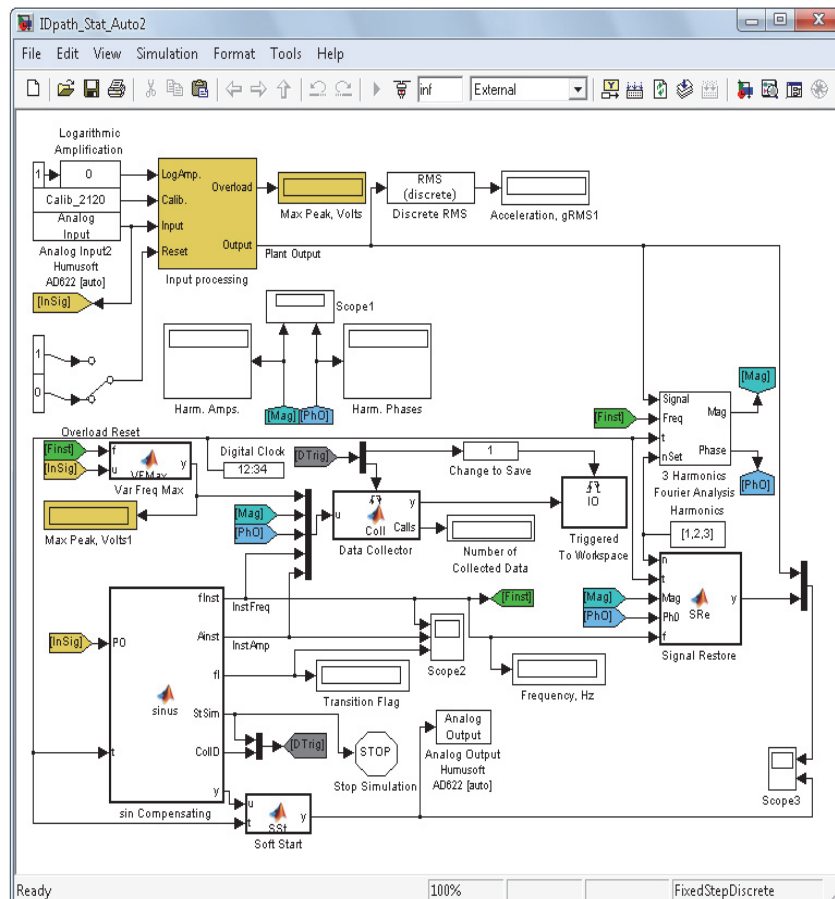


Рис. 4. Модель Simulink IDpath\_Stat\_Auto2.mdl

Алгоритм роботи моделі наступний. Спочатку модель поступово підвищує напругу на виході АЦП до тих пір, доки не відбудеться явище перевантаження значення віброприскорення. Модель зафіксує значення напруги, на якій це

відбулося, і почне пропорційно знижувати напругу у 8 кроків, фіксуючи на кожному з них значення напруги і відповідного йому віброприскорення. По завершенню вимірювань на одній частоті модель повторює всі

кроки для наступної частоти, аж доки не виконає їх на всьому спектрі. По закінченню роботи моделі у робочому середовищі Matlab з'явиться масив Ю, що міститиме заміряні моделлю дані, тому з'явиться можливість побудувати графік шуканої залежності.

Отримані залежності недоцільно наводити в рамках даної статті, водночас слід окреслити основні міркування і кроки, зроблені на їх основі. Ряд частот показав майже ідеально лінійну залежність між напругою та створюваним віброприскоренням, тому необхідності обмежувати робочий діапазон напруг не було. На певних частотах спостерігався менш ідеальний випадок, і довелося дещо обмежити діапазон. На поодиноких частотах спостерігався екстремальний випадок, коли довелося радикально обмежити діапазон робочих напруг.

Далі необхідно визначити траєкторію проходження сигналу при ідентифікації моделі сталеві пластины, що має розвиватися в певному лінійному діапазоні. На рис. 5. зображено мінімально та максимально допустимі напруги на спектрі частот та запропоновано траєкторію проходження сигналу для ідентифікації. Отриманий сигнал із траєкторією амплітуд напруг по спектру частот, отриманий нами раніше, збуджує сталеву пластину, проходячи весь робочий спектр частот за  $\Delta t = 30$  с. Вібродатчик при цьому вимірює вихід системи. Метою дослідження є отримання передаточної функції об'єкта керування (моделі об'єкта керування), під яку проводитиметься налаштування ПІД-регулятора. Дослід проводиться декілька разів у двох режимах: прямому (частота зростає) та зворотному (частота спадає).

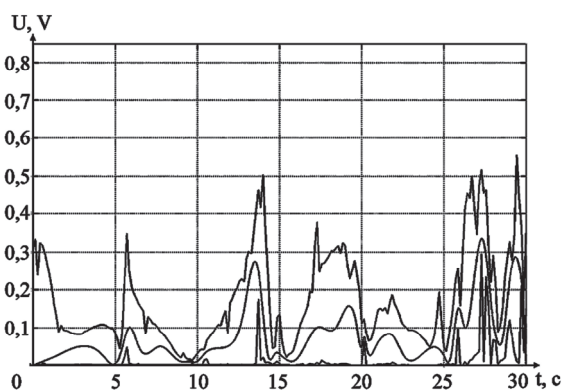


Рис. 5. Траєкторія проходження сигналу при ідентифікації об'єкта керування

На рис. 6 зображено приклад графічного представлення входу об'єкта керування, а на рис. 7 – приклад графічного представлення виміряного виходу системи при ідентифікації пластины у зворотному режимі.

Передаточну функцію пластины отримують шляхом ділення вихідних значень системи на вхідні значення, і результат записується у змінну робочого простору Matlab. Оцінка отриманої моделі проводиться із застосуванням вбудованого набору інструментів System Identification Toolbox, після імпорту в який відповідної змінної необхідно обрати спосіб оцінки передаточної функції. Найкращі результати показав спосіб ОЕ: [nb nf nk] з порядками 4 4 1.

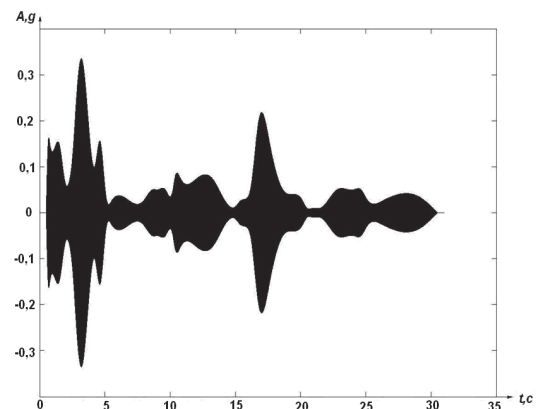


Рис. 6. Вхідний сигнал об'єкта керування при ідентифікації

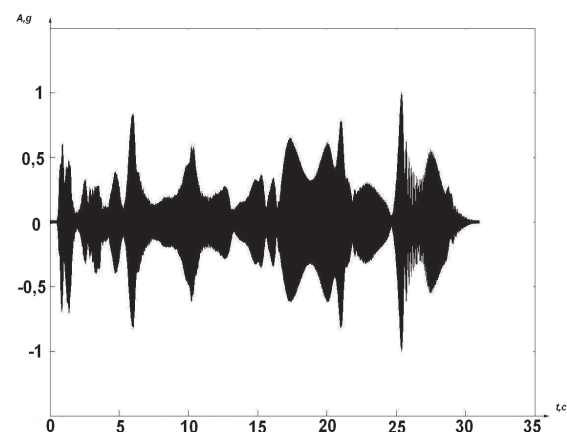


Рис. 7. Вихідний сигнал об'єкта керування при ідентифікації

Далі проводиться цифровий синтез адаптивної системи на основі використання ПІД-регулятора. На рис. 7 зображено модель Simulink PID\_final.mdl.

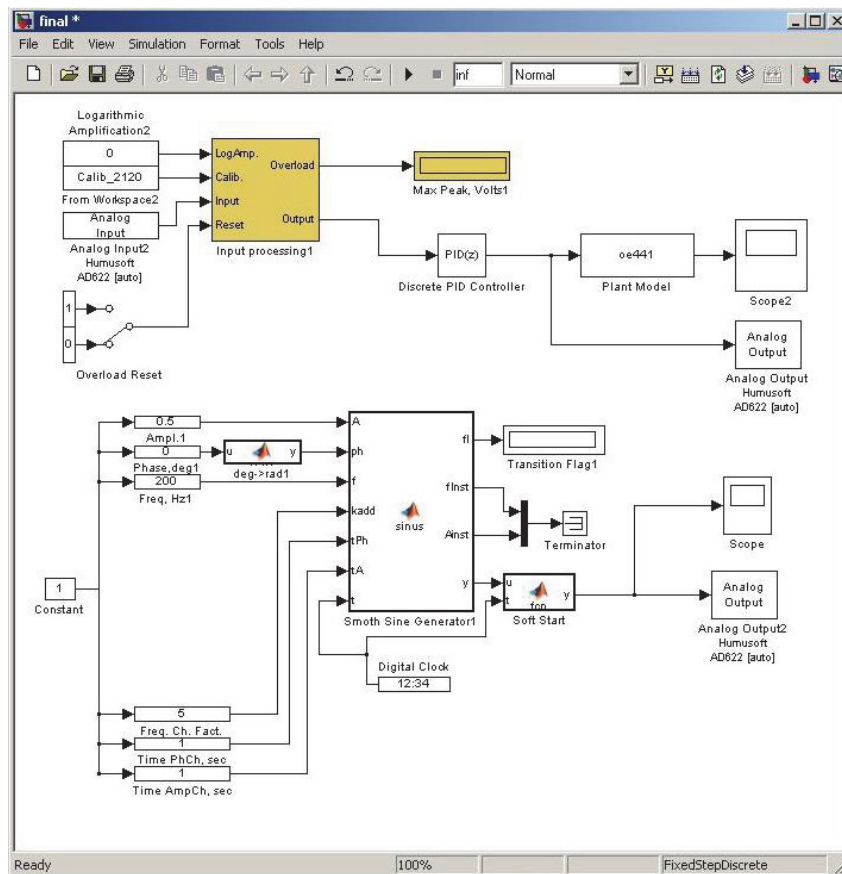


Рис. 7. Модель PID\_final.mdl

Ця модель складається з двох груп блоків, що реалізують функції збудження пластини та компенсації. Основний блок першої групи блоків – блок Smooth Sine Generator1. Він реалізує функцію генерації синусоїдального сигналу з параметрами, які поступають на його входи з регуляторів Ampl.1, Phase\_deg1 та Freq. Hz1, що задають значення, відповідно, амплітуди, фази та частоти сигналу збудження. Після цього сформований сигнал поступає на аналоговий вихід плати збору даних Humusoft AD622 і далі через тракт збудження надходить на пластину і створює в точці кріплення динаміка вібрацію.

Вібродатчик вимірює віброприскорення і по вимірювальному тракту передає сигнал на аналоговий вхід плати збору даних Humusoft AD622. Після цього отримані значення надсилаються на вхід блоку Discrete PID Controller, що реалізує функцію ПІД-регулятора.

Дані коефіцієнти було отримано за допомогою вбудованого у блок Discrete PID Controller функціоналу підбору значень пропорційного, інтегрального та диференціального множників (кнопки Tune). Блок Discrete PID Controller

пропонує оптимальні значення коефіцієнтів. Отримані значення

$$\begin{aligned} K_p &= -0,160458028047613; \\ K_i &= -0,320916056095227; \\ K_d &= 0; \end{aligned}$$

Керуючий сигнал, отриманий на основі цих коефіцієнтів, блок Discrete PID Controller направляє на свій вихід, що дає змогу подати його на аналоговий вихід плати збору даних Humusoft AD622 та використати як компенсуючий сигнал.

Оцінка достовірності отриманої моделі пластини, ефективності синтезованої системи та її аналіз на стійкість є предметом подальших досліджень.

### Висновки

У даному дослідженні запропоновано методику експериментальної ідентифікації моделі об'єкта керування, яка сприяє синтезу системи керування, що працюватиме в лінійному діапазоні. Проведено синтез цифрової адаптивної системи керування активної компен-

сації вібраційного навантаження, що має здатність самоналаштування. Оцінка достовірності отриманої моделі та ефективності системи керування є предметом подальших досліджень.

### Література

1. Colin H. Hansen. Understanding Active Noise Cancellation / H. Colin // Spon Press, 2001. – 173 p.
2. Vance J. VanDoren. Techniques for Adaptive Control / J. VanDoren Vance // Butterworth Heinemann, 2003, 289 p.
3. Барабаш О.В. Построение функционально-устойчивых распределенных информационных систем / О.В. Барабаш. – К.: НАОУ, 2004. – 226 с.
4. Дідковський В.С. Основи акустичної екології: навчальний посібник / В.С. Дідковський, В.І. Токарев, О.І. Запорожець / за редакцією В.С. Дідковського. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2002. – 520 с.
5. Барабаш О.В. Елементи синтезу автоматичної системи зниження віброакустичного навантаження на гнучких металевих пластинах / О.В. Барабаш, Г.В. Пекуровський // БЖДЛ – 2011: зб. наукових праць. – К.: НАУ, 2011. – С. 39 – 45.

Рецензент: О.В. Полярус, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 12 вересня 2012 р.

---