

М.І. Гученко, к.т.н., доц.  
Кременчуцький державний політехнічний університет

### АКТИВНО-РЕЗОНАНСНА МОДЕЛЬ НАВЧАННЯ ОПЕРАТОРА В ЗАДАЧІ КОМПЕНСАЦІЙНОГО СТЕЖЕННЯ

*Розглядається процес навчання і критерій оцінки майстерності оператора в системі компенсаторного стеження з погляду запропонованої автором аналітичної, істотно нелінійної моделі людини-оператора, основаної на так званому принципі активного резонансу. Принцип полягає в тому, що оператор спочатку супроводжує об'єкт керування в режимі резонансу, вивчаючи його динамічні властивості, а потім інвертує свій вихідний сигнал. Це дозволяє людині керувати об'єктом із невідомою заздалегідь динамікою в умовах дії невідомих збурень. Наводяться результати експериментів, що підтверджують справедливості запропонованої моделі.*

В сучасних ергатичних системах з їх високою складністю та вартістю оператор, як правило, приймає найбільш відповідальні рішення, причому від правильності його дій і вміння своєчасно знайти та реалізувати правильне рішення залежить не тільки ефективність виконання задачі, але й цілість об'єкта та безпека людей. Тому гостро ставиться питання вдосконалення методичних і технічних засобів формування та оцінки професійних знань і навичок операторів, необхідних в реальних умовах.

В процесі підготовки операторів все більшу роль відіграють тренажери, які мають меншу вартість, ніж реальні об'єкти керування, та дозволяють відпрацьовувати задачі, вирішення яких принципово неможливе на реальних об'єктах, наприклад, всякого роду аварійні ситуації та критичні режими роботи. Загальним напрямом розвитку тренажерів у сучасних умовах є підвищення ступеня їх комп'ютеризації та впровадження автоматизованих навчаючих систем (АНС), які на базі обчислювальної техніки реалізують найбільш досконалі методи і форми навчання та контролю.

Однією з основних переваг АНС є можливість оцінки професійних якостей оператора за допомогою об'єктивних критеріїв.

Існуючі критерії оцінки якості керування за параметрами руху (стану) об'єкта (критерії нижнього рівня) формуються на основі порівняння еталонних параметрів з поточними [1].

Найчастіше використовуються інтегральні критерії вигляду

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T |\Delta x(t)| dt, \quad (1)$$

де  $T$  – інтервал керування;  $|x(t)|$  – модуль нормованого відхилення контрольованого параметра від заданого значення, який, в свою чергу, визначається як:

$$|\Delta x(t)| = \frac{|\Delta \bar{x}(t)|}{\Delta x_{\max}}, \quad (2)$$

а  $\Delta x_{\max}$  – допустимий діапазон відхилення.

$$|\Delta \bar{x}(t)| = |x(t) - x^e(t)|, \quad (3)$$

де  $x^e(t)$  – еталонне значення параметра.

Часто використовуються також критерії виду

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T (\Delta x(t))^2 dt. \quad (4)$$

Вказані критерії оцінюють роботу оператора, так би мовити, ззовні, за досягнутим результатом.

Однак такий підхід до формування критеріїв має суттєві недоліки, оскільки не враховує особливостей сприйняття оператором своєї задачі, особливостей алгоритму керуючих дій оператора і особливостей формування його навичок, що є дуже суттєвим на етапі навчання та при відборі операторів, а також не враховує інтенсивності та спектра збурень, що діють на керований об'єкт.

Можливий інший підхід до розробки критеріїв оцінки майстерності (навченості оператора), запропонований в [2]. Цей підхід базується на тому, що вихідне значення регульованого параметра залежить від :

- динаміки регульованої системи;
- інтенсивності та спектра збурень;
- керуючих дій оператора.

Таким чином, хороший результат (рис. 1, а) може бути наслідком не тільки високого рівня майстерності оператора, а й низького рівня збурень чи хорошої стійкості та керованості регульованої системи.

Оцінювати рівень майстерності оператора, особливо в процесі навчання, слід, на думку автора, за виконаною ним корисною роботою, тобто за різницею між результатами в некерованому і керованому режимах в однакових умовах (рис. 1, б), враховуючи спектр та інтенсивність збурень, при яких був досягнутий результат.

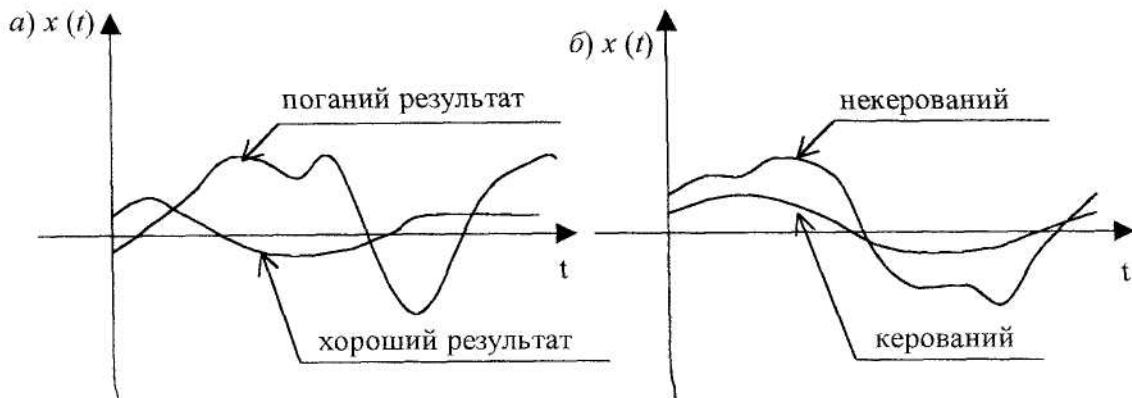


Рис. 1. Приклади записів вихідного параметра: а) в керованому режимі; б) в керованому і некерованому режимах

Якщо будь-які два з вказаних факторів задані, то за кінцевим результатом можна оцінити третій. А оскільки в будь-якому випадку знаходиться вклад одного з компонентів в кінцевий результат, то й критерій оцінки всіх вказаних факторів повинен бути одним і тим же.

АНС добре підходить для подібної оцінки, оскільки дозволяє шляхом комп'ютерного моделювання отримати в реальному масштабі часу записи параметрів системи в керованому і некерованому режимах одночасно. Таке моделювання було реалізоване в експериментах, докладно описаних в [3].

В процесі розробки адекватних критеріїв оцінки майстерності оператора обов'язково необхідно враховувати суттєву нелінійність дій оператора. Вихідний сигнал системи компенсаційного стеження з людиною-оператором, який намагається мінімізувати відхилення вихідного параметра  $y(t)$  від заданого значення  $x(t) = 0$ , при гармонійному сигналі збурення  $f(t)$  та при одиничній передаточній функції об'єкта керування складається, в основному, з першої, третьої, п'ятої, сьомої та дев'ятої гармонік ряду Фур'є (рис. 2) [2].

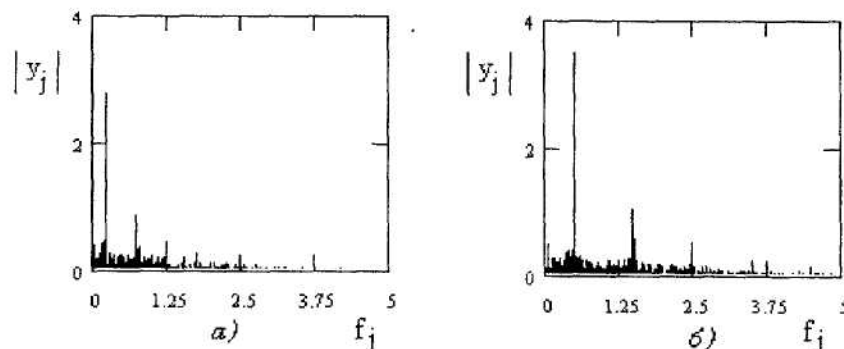


Рис. 2. Спектри амплітуд вихідного сигналу системи  $y(t)$  для частот гармонійного вхідного сигналу а)  $f = 0,25$  гц, б)  $f = 0,5$  гц

Реакція оператора на випадковий вхідний сигнал, у вказаних умовах, може бути представлена [4] як сума реакцій на окремі гармоніки (рис. 3, а). На достатньо довгому проміжку часу, при такому механізмі формування реакції, спектральна щільність вихідного сигналу набирає характерного двогорбого вигляду (рис. 3, б).

Таким чином, в реакції оператора можна виділити дві складові. Перша з них відповідає реакції лінійного елемента (область  $D_1$  на рис. 3, б), а друга, так звана ремнанта (область  $D_3$  на рис. 3, б), не корелює лінійно з вхідним сигналом. Іншими словами, оператор вносить у вихідний сигнал частоти, які були відсутні у вхідному.

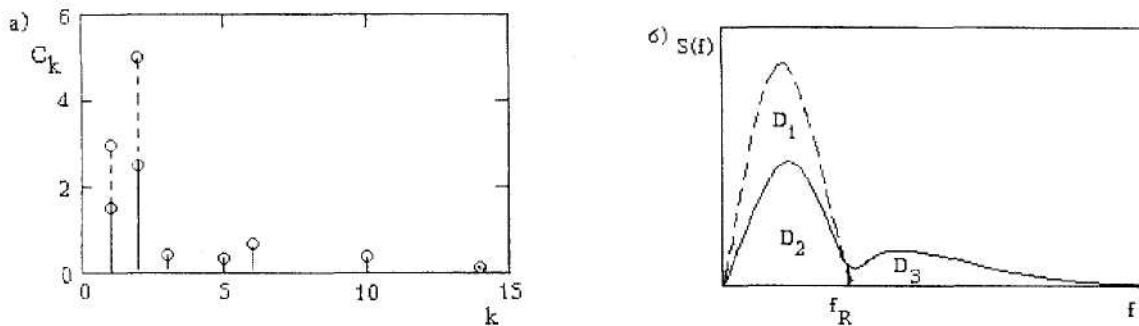


Рис. 3. Схема формування вихідного сигналу системи: а) сума реакцій на дві гармоніки вхідного сигналу; б) реакція на випадковий вхідний сигнал та характерні області на графіках спектральних щільностей; ----- некерований режим, ————— керований режим

В [3] було показано, що за рахунок нелінійної частини реакції т.з. ремнанти оператору вдається суттєво зменшити амплітуду відхилення об'єкта від заданого положення, тобто ремнанта є не шкідливою, як вважалося раніше, а корисною складовою реакції оператора. Амплітуди гармонік монотонно зменшуються при збільшенні їх частоти (рис. 2) таким чином, що у вихідному сигналі системи формується площадка при мінімальних затратах енергії керування [6]. Тобто людина-оператор працює як нелінійний регулятор, вводячи у вихідний сигнал частоти більші від частоти вхідного сигналу, що дозволяє значно зменшити затрати енергії на процес керування порівняно з оптимальним лінійним регулятором при однаковій точності стабілізації вихідного параметра системи, тобто при однаковому значенні критерію (1).

Невдалий термін "ремнанта" (remnant – англ. залишок) пов'язаний з тим, що ремнанта довгий час вважалася шкідливою (шумовою) складовою реакції оператора, викликаною помилками оператора при сприйнятті та аналізі інформації, дозуванні відхилень органів керування, нелінійністю характеристик оператора (зони нечутливості, насичення і т.п.) та нестабільністю характеристик оператора при відпрацюванні навіть стаціонарного вхідного сигналу. Помилковість такого погляду була показана зокрема в [5]. В той же час, завжди відзначалося (напр. [7]), що оцінка оператором динаміки об'єкта керування, складності задачі та свого робочого навантаження дуже сильно корелює з величиною ремнанти.

На рис. 4 показані приклади експериментальних записів сигналу збурення (вихідного сигналу системи в некерованому режимі) і сигналу оператора (відхилення важеля керування). В експерименті брали участь два оператори – один з них був новачком, інший мав великий досвід вирішення подібної задачі. Було зроблено 60 замірів для частот вхідного гармонійного сигналу від 0,05 до 0,5 гц і в усіх випадках оператор починав процес керування з відхилення важеля керування у бік відхилення контрольного об'єкта від заданого положення. З наведених записів дуже добре видно також, що в деяких циклах на початку відхилення системи від заданого положення оператор робить важелем керування парадоксальні подвійні рухи, які не тільки не гальмують відхилення об'єкта керування від заданого положення, а навпаки – збільшують його! Вважати ці рухи помилковими чи випадковими очевидно не можна, оскільки вони мають чіткий, закономірний, однотипний для обох операторів характер, хоча зустрічаються і не в кожному циклі коливань. Вказані рухи оператора копіюють некерований рух об'єкта (активний резонанс).

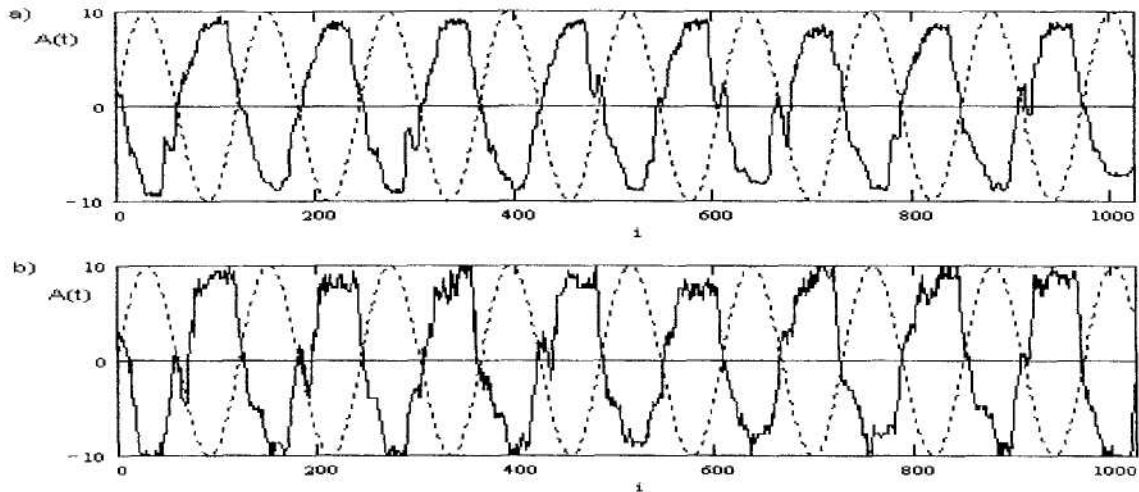


Рис. 4. Експериментальні записи вихідного сигналу системи в некерованому режимі (пунктир) та сигналу оператора (суцільна лінія); а) – перший оператор; б) – другий оператор

Резонансні рухи чітко виражені на малих частотах вхідного сигналу. При збільшенні частоти з'являється відставання цих рухів від вхідного сигналу, вони поступово згладжуються і зникають. Але для оператора 2, який мав більший досвід, подібні рухи зафіксовані на частотах до 0,45 гц.

Таким чином, оператор реалізує алгоритм керування, який автор запропонував у [8] і назвав активним резонансом. Збурення (власне реакція на нього об'єкта керування) спочатку вивчається в процесі керування шляхом його наслідування (копіювання). Потім іде реакція у вигляді інвертованого сигналу реакції об'єкта.

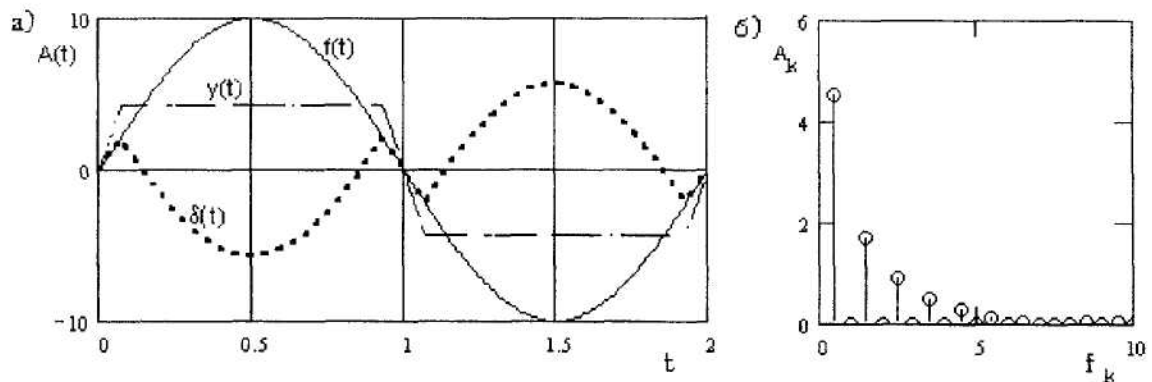


Рис. 5. Реалізація ідеального резонансного алгоритму (а) та відповідний спектр вихідного сигналу системи (б):  $f(t)$  – вхідний сигнал,  $\delta(t)$  – сигнал оператора,  $y(t)$  – вихідний сигнал системи

Перевага такого способу керування порівняно з алгоритмом розімкнутої системи керування та системи керування з від'ємним зворотним зв'язком полягає в тому, що оператор легко пристосовується до будь-яких збурень, динаміки об'єкта та дисплея. Він власне навіть і не пристосовується з позиції адаптивних систем керування. При будь-якій динаміці об'єкта реалізується один і той же алгоритм оператора. Оператор спочатку входить в резонанс з некерованим об'єктом (відтворює його рух) через дану систему керування і дисплей, а потім діє навпаки – через той же дисплей і той же об'єкт. Збурення і динаміка об'єкта вивчаються одночасно (як одне ціле) в процесі керування.

Недолік алгоритму, як і у випадку від'ємного зворотного зв'язку, той, що відхилення об'єкта від заданого положення потрібне операторові для формування реакції. Тобто зменшення точності керування є платою за можливість керування об'єктом з невідомою наперед динамікою з невідомими заздалегідь збуреннями.

При гармонійному сигналі збурення цей алгоритм реалізується надзвичайно просто і майже автоматично (рис. 5). Оператор спочатку “сідлає хвилю” – ловить з допомогою ручки керування резонанс і таким чином відтворює рух системи. Оператор створює на своєму виході і відповідно відчуває зусилля. Якщо зусилля в фазі з рухом об’єкта – керувати найлегше. Відхилення від правильного сигналу збільшує виконувану роботу, що оператор відчуває. Після копіювання сигнал екстраполюється і вводиться вже в протифазі (оператор забігає наперед).

Результати, показані оператором при випадковому входному сигналі (рис. 10), також не суперечать вказаній моделі. У зв’язку з цим цікаво вяснити механізм навчання оператора з позиції активно-резонансної моделі оператора.

Яким є алгоритм навчання оператора у випадку, якщо активно-резонансна модель справедлива? З точки зору активно-резонансної моделі оператора, резонансні рухи є абсолютно необхідними, але амплітуда їх повинна бути мінімально можливою. В міру навчання оператора (покращення його результатів) амплітуда резонансних рухів повинна зменшуватися (рис. 6.).

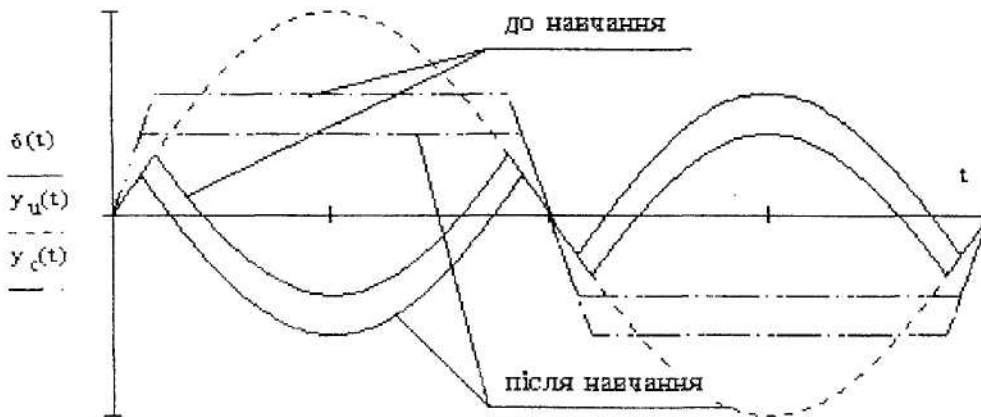


Рис. 6. Зміна сигналу оператора та вихідного сигналу системи для ідеального оператора, що діє згідно з активно-резонансною моделлю, до і після навчання при гармонійному входному сигналі:  $y_u(t)$  – вихідний сигнал системи в некерованому режимі;  $y_c(t)$  – вихідний сигнал системи в керованому режимі;  $\delta(t)$  – сигнал оператора

Таким чином, у випадку, коли входний сигнал є випадковим, спектральні щільності потужності вихідного сигналу системи у некерованому та керованому режимах мали б виглядати так, як показано на рис. 7, тобто в міру навчання оператора амплітуди на графіку спектральної щільності вихідного сигналу системи повинні зменшуватися і на частотах вхідного сигналу, і на частотах резонанси, причому зменшення амплітуд на частотах резонанси повинне бути сильнішим на менших частотах.

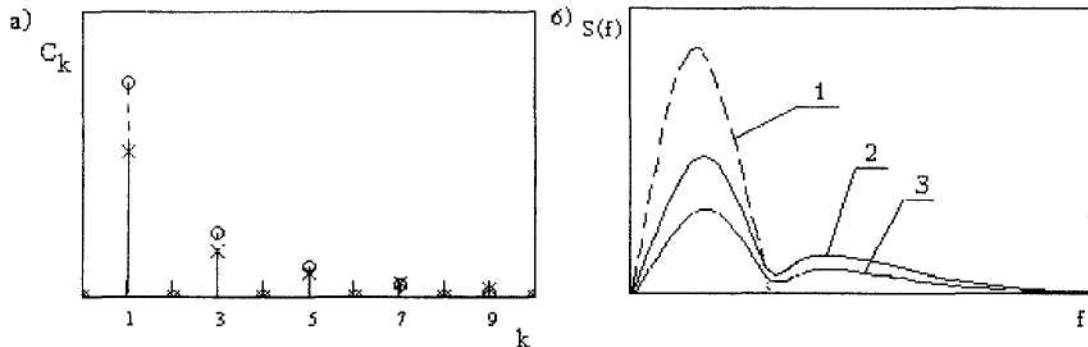


Рис. 7. Зміна спектральних характеристик вихідного сигналу системи для ідеального оператора, що діє згідно з активно-резонансною моделлю, до і після навчання: а) при гармонійному входному сигналі (o – до навчання; x – після навчання); б) при випадковому входному сигналі (1 – некерований режим; 2 – керований режим до навчання; 3 – керований режим після навчання)

Візуально на графіках спектральних щільностей, отриманих для експериментальних записів, приклади яких наведені на рис. 8, спостерігаються наступні закономірності:

- чим вищий рівень вхідного сигналу, тим більша площа під графіком кривої спектральної щільності вихідного сигналу на частотах ремнанти;
- в результаті роботи оператора дисперсія вихідного сигналу (площа під кривою  $S(f)$ ) на частотах вхідного сигналу зменшується, а на більших частотах – зростає;
- в міру навчання оператора при постійному рівні вхідного сигналу площа під графіком кривої спектральної щільності вихідного сигналу на частотах вхідного сигналу і на частотах ремнанти зменшується, але на частотах ремнанти ніколи не стає нульовою (звичайно процес навчання не є прямолінійним; прогрес помітний лише в середньому; різні оператори мають різну здатність до навчання та демонструють різну стабільність результатів).

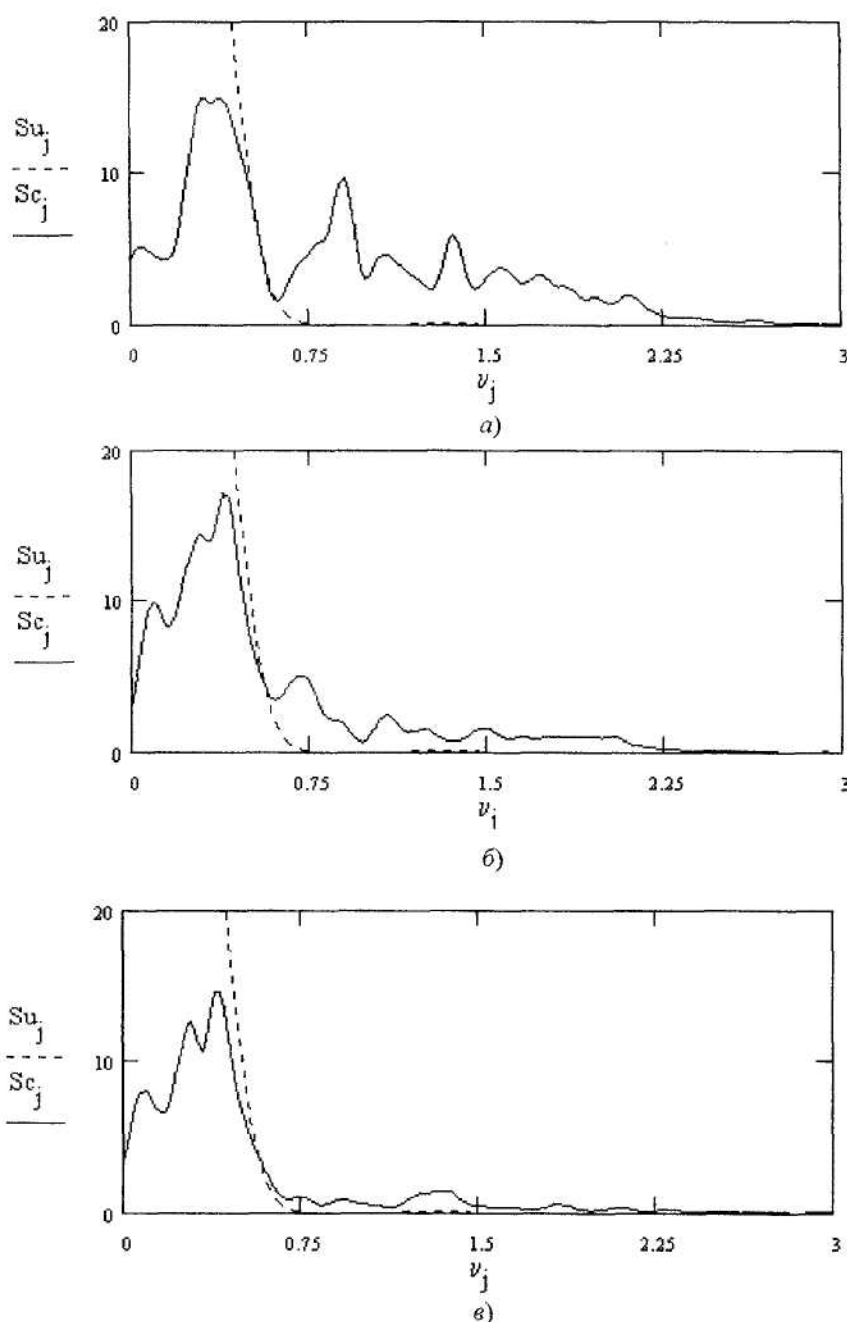


Рис. 8. Зміна площі під кривою спектральної щільності потужності вихідного сигналу системи в керованому (суцільна лінія) режимі в процесі навчання оператора. Оператор 3: а) замір 1 (початок навчання); б) замір 15 (середина навчання); в) замір 30 (кінець навчання)

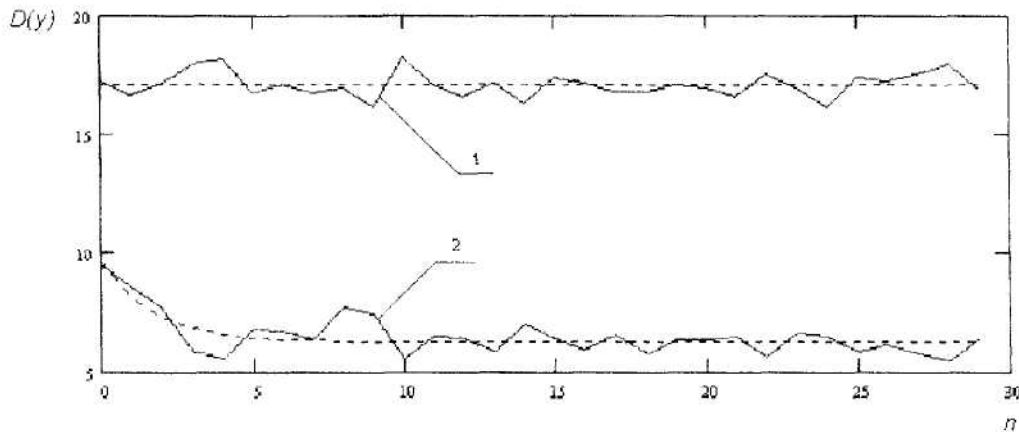


Рис. 9. Дисперсії вихідного сигналу в керованому режимі в залежності від номера заміру: 1 – на частотах вхідного сигналу; 2 – для всього частотного діапазону

З рис. 10 видно, що резонансні піки нікуди не зникають. Просто, в процесі навчання оператор переходить від нечітких резонансних піків з великою амплітудою (наприклад, рис. 10 запис 1 на 49-й секунді та записи 3 та 9 на 47-й секунді) до чітких, майже безпомилкових піків з невеликою амплітудою (наприклад, на записи 23 і 28 на 47-й секунді та на запис 27 на 49-й секунді).

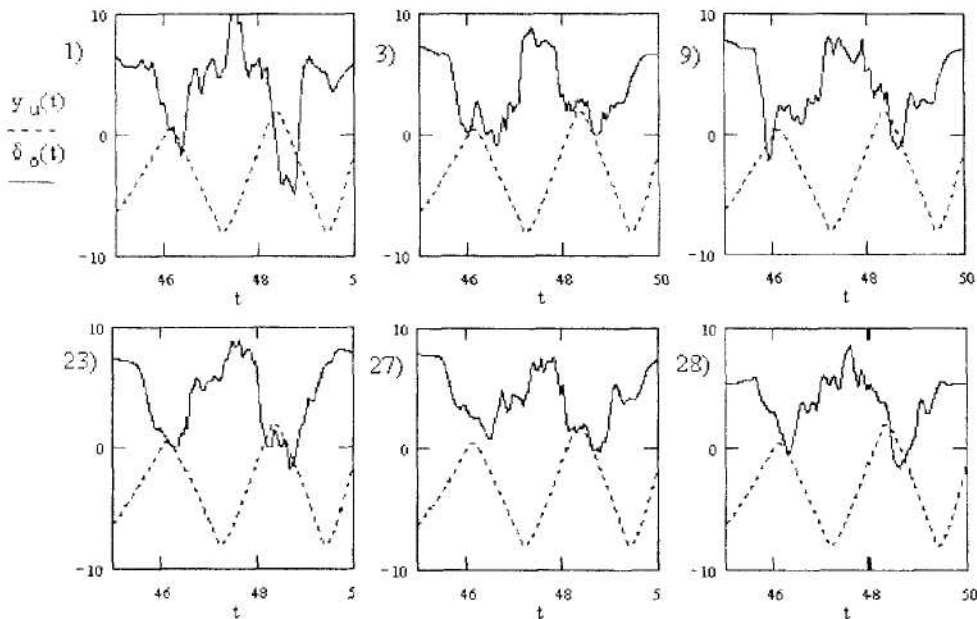


Рис. 10. Зміна характеру резонансних ділянок в процесі навчання оператора

Таким чином, експериментальні дані якісно не суперечать активно-резонансній моделі оператора та моделі навчання на її основі.

Виконаємо тепер деякий кількісний аналіз. Цікаво дослідити закономірності зміни потужності ремнанти в процесі навчання оператора.

На рис. 3, б показані також характерні області на кривих спектральних щільностей. В даному дослідженні умовною межею початку частотного діапазону ремнанти вважалася точка перетину згладжених графіків спектральних щільностей вихідних сигналів системи в некерованому та керованому режимах  $F_R$ . Максимальною частотою  $F_M$  вважалася частота, що визначалася кроком дискретизації за часом згідно з теоремою Котельникова.  $D_1$  – площа під кривою спектральної щільності вихідного сигналу системи в некерованому режимі (дисперсія сигналу).  $D_2$  – площа під кривою спектральної щільності вихідного сигналу системи в керованому режимі на частотах вхідного сигналу.  $D_3$  – площа під кривою спектральної щільності вихідного сигналу системи в керованому режимі на частотах ремнанти.

На рис. 9 показані дисперсії вихідного сигналу в керованому режимі в залежності від номера заміру  $n$  для частот нижчих (верхній графік) максимальної частоти сигналу збурення і для діапазону частот, де зосереджено 95 % потужності вихідного сигналу (нижній графік). Пунктиром показані криві відповідно лінійної та експоненційної регресій.

Зменшення дисперсії вихідного сигналу на частотах вхідного сигналу на величину  $D_1$  в процесі навчання відбувається практично відразу. Потім оператор шліфує свою майстерність шляхом зменшення дисперсії  $D_3$  введених ним же височастотних гармонік, починаючи з нижчих частот, причому дисперсія вихідного сигналу на частотах вхідного сигналу  $D_2$  вже не зменшується. Таким чином, процес навчання оператора простежується, в основному, на частотах ремнанти.

Враховуючи вищесказане, ступінь майстерності (навченості) оператора можна характеризувати критерієм, що був запропонований автором в [3]

$$I = \left( 1 - \frac{D_3}{D_1} \right) \quad (6)$$

або

$$I = \left( 1 - \frac{\int_{F_u}^{F_v} S_u(f) df}{\int_0^{F_k} [S_u(f) - S_c(f)] df} \right), \quad (7)$$

де  $S_u(f)$  та  $S_c(f)$  – спектральні щільності вихідного сигналу відповідно в некерованому та керованому режимах.

Величина  $D_1$  характеризує затрати енергії керування на частотах вхідного сигналу, а  $D_3$  – на частотах ремнанти. Чим ближча величина  $I$  до одиниці, тим краще працює оператор.

Наведемо приклад отриманих даних для двох операторів, які навчалися при квазивипадковому вхідному сигналі і, за оцінкою інструкторів, демонстрували відмінні результати в процесі навчання [9].

Перший оператор навчався в умовах постійного рівня збурень (рис. 11, а.1). При цьому дисперсія вихідного сигналу (критерій (4)) в процесі навчання постійно зменшувалася (рис. 11, б.1), тобто вказаний критерій дозволяв контролювати процес навчання та об'єктивно оцінювати рівень навченості оператора.

Другий оператор навчався в умовах постійного росту рівня збурень (рис. 11, а.2). При цьому дисперсія вихідного параметра (рис. 11, б.2) теж постійно зростала, тобто критерій (4) показував не тільки відсутність всякого прогресу, а навіть погіршення рівня майстерності оператора в процесі навчання, що не відповідало дійсності згідно з експертними оцінками.

Застосування ж критерію (7) показує, що обидва оператори мають приблизно однакові здібності щодо вирішення заданої задачі (рис. 11, в.3). Під номером 3 на рис. 11, в показана апроксимація середнього значення критерію (7) для двох операторів аналітичною залежністю (8) де  $\tau = 4,83$ .

$$C(t) = C_{\max} \left( 1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \right). \quad (8)$$

При апроксимації було взято до уваги дві обставини:

- будь-яка людина в житті постійно стикається з вирішенням задачі компенсаційного стеження (керування автомобілем, побутовими приладами, знаряддями праці і т.п.), тому вважати, що процес навчання починається з початком експерименту, не можна, тобто на початку експерименту критерій (7) вже повинен мати якийсь позитивне значення, що враховується параметром  $t_0 = 3,53$ ;
- в силу своєї неідеальності, оператор не може досягти значення критерію (7) рівного одиниці, що враховується параметром  $C_{\max} = 0,89$ .

Таким чином, критерій (7) має фільтруючу дію по відношенню до рівня збурень і дозволяє ефективно оцінювати рівень майстерності оператора в умовах зміни рівня збурень у широкому діапазоні.

Природно, що запропонований критерій може бути застосований лише для стійких об'єктів керування.



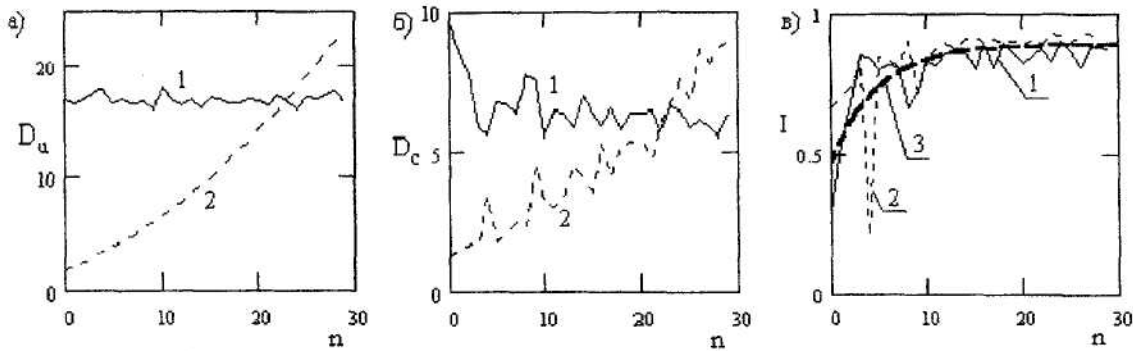


Рис. 11. Експериментальні дані, отримані в процесі навчання двох операторів. Залежність від номера вправи: а) дисперсії вихідного параметра в некерованому режимі; б) дисперсії вихідного параметра в керованому режимі; в) критерію (7)

Для заданої динаміки об'єкта керування та заданого спектра збурень можна теоретично розрахувати значення чисельника дробу в формулі (7). Шляхом експериментів на тренажері можна знайти для даного оператора максимально можливу величину знаменника цього ж дробу. Таким чином, можна відповісти на питання, чи зможе даний оператор в даних умовах забезпечити потрібні характеристики точності стабілізації регульованого параметра.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Стенин А.А. Автоматизированные обучающие системы (анализ и синтез). – Луганск: Изд-во восточноукр. нац. ун-та, 2000. – С. 109.
2. Гученко М.І. Інформаційний метод оцінки рівня майстерності оператора. «Проблеми створення нових машин і технологій» // Сб. научн. трудов КПИ. Випуск 1. – Кременчук, 1998. – С. 6.
3. Гученко М.І., Лашко Ю.В., Сидоренко В.М. Експериментальні дослідження процесу навчання оператора. «Проблеми створення нових машин і технологій» // Сб. научн. трудов КПИ. Випуск 1. – Кременчук, 1998. – С. 3.
4. Гученко М.І. Синтез реакції оператора на випадковий сигнал. «Адаптивні системи автоматичного управління» // Міжвідомчий науково-технічний збірник, № 3 (23) «Системні технології». – Дніпропетровськ, 2000. – С. 7.
5. Гученко М.І. Про роль ремнанти в вихідному сигналі оператора при компенсаційному стеженні // Вісник НТУУ КПІ, Інформатика, управління та обчислювальна техніка, № 34. – Київ, 2000. – С. 5.
6. Яерсонс М.І. Енергетична ефективність роботи оператора в системі компенсаційного стеження. «Проблеми створення ерсо машин і технологій» // Научные труды КППУ. Випуск 2. – ерсонськ, 2001. – С. 5.
7. Momler R., Sulser R., Cox V.J., Nichamin N.D. Elements of aircrew workload. «Human factor bulletin. Jan/Feb/Mar/Apr.1981.
8. Яерсонс М.І. Активний резонанс – принцип реакції оператора на вхідний сигнал в системі компенсаційного стеження. Адаптивні системи автоматичного управління // Міжвідомчий науково-технічний збірник, № 4 (24) «Системні технології». – Дніпропетровськ, 2001. – С. 30–38.
9. Яерсонс М.І. Об'єктивна оцінка рівня навченості оператора при вирішенні задачі компенсаційного стеження в умовах зміни рівня збурень в процесі навчання // «Вестник ерсонського государственного технического университета», № 1 (10). – Херсон, 2001. – С. 5.

ГУЧЕНКО Микола Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних систем Кременчуцького державного політехнічного університету.

Наукові інтереси:

- ергатичні системи;
- аеродинаміка вертольотів.