

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 004.051

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-109-118

РЕВЕРС-ІНЖИНІРИНГ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ АНАЛІТИЧНИХ МЕРЕЖ

**В.А. Ровінський¹, О.В. Євчук²*

¹*Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника,
м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 54, <mailto:v.rovinsky@comp-sc.if.ua>*

²*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, itts@nung.edu.ua*

Пропонується спосіб синтезу числових моделей для нелінійних систем збільшеної складності за відомими їх входними та вихідними сигналами, знятими синхронно, на основі аналітичних мереж. Функціонування запропонованих аналітичних мереж ґрунтується на використанні модифікованого генетичного алгоритму та бібліотеки блоків незмінної функціональності. Запропоновано структуру генотипу та алгоритми мутацій для представлення структури і параметрів аналітичної мережі. Крім того, розглянуті способи моделювання складних нелінійних систем за допомогою рядів Вольєрра, Вінера-Гаммерштейна, адаптивних фільтрів, нелінійної моделі авторегресивного ковзного середнього з екзогенними входами, нейромереж та генетичних алгоритмів, і визначені основні проблеми, що виникають при користуванні цими моделями. Показаний практичний приклад можливості застосування аналітичної мережі на прикладі ресинтезу синтезатора звукових сигналів. Розглянута типова схема такого синтезатора. Розглянута можлива схема ресинтезованої системи на базі аналітичної мережі, що функціонально є максимально подібною до необхідної. Показана можливість автоматичної побудови числової моделі реакції механічної системи на входні збурення за відомими входними і вихідними сигналами, записаними синхронно. Розглянуті основні складності ресинтезу складних систем для звуковідтворення – показаний вплив психоакустичних явищ на сприйняття результатів синтезу і потреба забезпечення високої точності відтворення для одержання адекватних результатів. Запропонована структура типових блоків аналітичної мережі, які повинні включати в себе типові перетворення цифрової обробки сигналів, арифметичні та логічні операції, блоки кореляції та компаратори, гістерезисні компоненти та додатково типові імовірні стандартні блоки системи, яка ресинтезується.

Ключові слова: *аналітичні мережа; генетичний алгоритм; нейромережа; електронна система.*

Предлагается способ синтеза численных моделей для нелинейных систем увеличенной сложности на основе аналитических сетей по известным их входным и выходным сигналами, снятыми синхронно. Функционирование предложенных аналитических сетей основывается на использовании модифицированного генетического алгоритма и библиотеки блоков неизменной функциональности. Предложена структура генотипа и алгоритмы мутаций для представления структуры и параметров аналитической сети. Кроме того, рассмотрены способы моделирования сложных нелинейных систем с помощью рядов Вольєрра, Винера-Гаммерштейна, адаптивных фильтров, нелинейной модели авторегресивного скользящего среднего с экзогенными входами, нейросетей и генетических алгоритмов, и определены основные проблемы, возникающие при использовании этими моделями. Показан практический пример возможности применения аналитической сети на примере ресинтеза синтезатора звуковых сигналов. Рассмотрена типовая схема такого синтезатора. Рассмотрена возможная схема ресинтезированной системы на базе аналитической сети, функционально максимально подобной требуемой. Показана возможность автоматического построения числовой модели реакции нелинейной механической системы на входные возмущения по известным входным и выходным сигналами, записанным синхронно. Рассмотрены основные сложности ресинтеза сложных систем для звуковоспроизведения - показано влияние психоакустических явлений на восприятие результатов синтеза и потребность обеспечения высокой точности воспроизведения для получения адекватных результатов. Предложена структура типичных блоков аналитической сети,

которые должны включать в себя типичные преобразования цифровой обработки сигналов, арифметические и логические операции, блоки корреляции и сравнения, гистерезисные компоненты и дополнительно, типичные возможные стандартные блоки системы, которая подвергается ресинтезу.

Ключевые слова: аналитическая; сеть, генетический алгоритм, нейросеть, электронная система.

A method for the synthesis of numerical models based on analytical networks for nonlinear systems of increased complexity using their known input and output signals taken synchronously is proposed. The functioning of the proposed analytical networks is based on the use of a modified genetic algorithm and a library of blocks of constant functionality. Genotype structure and mutation algorithms are proposed for describing an analytical network. In addition, methods for modeling complex non-linear systems using the Volterra, Wiener-Hammerstein series, adaptive filters, non-linear model of an autoregressive moving average with exogenous inputs, neural networks and genetic algorithms are considered, and the main problems that arise when using these models are identified. A practical example of the possibility of using the analytical network is shown on the example of the resynthesis of a sound synthesizer. A typical diagram of such a synthesizer is described. A possible scheme of a re-synthesized system based on an analytical network that is functionally as similar as possible to desired system is considered. The possibility of automatically constructing a numerical model of the reaction of a nonlinear mechanical system to input disturbances using known input and output signals recorded synchronously is shown. The main difficulties of the resynthesis of complex systems for sound reproduction are considered - the influence of psychoacoustic phenomena on the perception of synthesis results and the need to ensure high fidelity for obtaining adequate results are shown. The structure of typical blocks of the analytical network is proposed, which should include typical conversions used in digital signal processing, arithmetic and logical operations, correlation and comparison blocks, hysteresis components, and in addition, typical possible standard blocks of a system that undergoes resynthesis.

Keywords: analytical network, genetic algorithm, neural network, electronic system..

Аналіз останніх публікацій. Для ідентифікації нелінійних систем використовують різні форми блочно-структурованих нелінійних моделей. [6] [7] Модель Гаммерштейна складається із статичного нелінійного елемента, за яким слідує лінійний динамічний елемент. [8] Модель Вінера має протилежну до цієї комбінацію, тобто лінійний елемент знаходиться перед елементом із статичною нелінійною характеристикою [9]. Модель Вінера-Гаммерштейна складається із статичного нелінійного елемента, розміщеного між двома динамічними лінійними елементами. Модель Урисона [10] [11] відрізняється від інших блочних моделей тим, що вона не складається з послідовних лінійних і нелінійних блоків, але описує як динамічні, так і статичні нелінійності у вигляді ядра оператора [12]. Всі ці моделі можуть бути представлені як різновид рядів Вольтерра, але в цьому випадку ядра Вольтерра приймають особливий вигляд в кожному випадку. Ідентифікація системи полягає у використанні методів кореляції та оцінки параметрів нелінійних функцій. Методи кореляції використовують певні властивості систем, що потребують ідентифікації, що означає, що у разі, коли використовуються

спеціальні вхідні дані (нерідко «білий» шум), окремі елементи можуть бути ідентифіковані тільки по одному за раз. Це призводить до потреби управління обмеженнями до вхідних даних, і окремі блоки, які ідентифікуються, можуть бути пов'язані з компонентами в досліджуваній системі.

Коли система нелінійна і динамічна, представлення може бути отримане, використовуючи поняття з багатоструктурних форм реалізації та результатів диференціальної геометрії, що переходять в нелінійний різницевий вираз:

$$y(k) = \frac{F_1[y(t-1), \dots, y(t-n_{ny}), u(t-1), \dots, u(t-n_{nu}), \varepsilon(t-1), \dots, \varepsilon(t-n_{ne})]}{F_2[y(t-1), \dots, y(t-n_{dy}), u(t-1), \dots, u(t-n_{du}), \varepsilon(t-1), \dots, \varepsilon(t-n_{de})]} = \frac{\sum_{j=1}^{num} \theta_{nj} \phi_{nj}(t)}{\sum_{j=1}^{den} \theta_{dj} \phi_{dj}(t)} \quad (1)$$

де $F[\cdot]$ – нелінійна функція, $y(t)$ – вихідний сигнал, $u(t)$ – вхідний сигнал, $t \in 0, 1, 2, \dots$ - часовий крок, n_* – затримка, θ_* – вектор параметрів, ϕ_* – може бути довільною нелінійною функцією. Оскільки вираз (1) нелінійний з точки зору параметрів,

стандартний алгоритм найменших квадратів не може використовуватися безпосередньо.

Розширяючи рівняння (1) як поліноми і вводячи заміни:

$$\tilde{y}(t) = F_1(\cdot) - y(t)[F_2(\cdot) - \theta_{d1}\phi_{d1}(t)] = \sum_{j=1}^{nnum} \theta_{nj}\phi_{nj}(t) - \sum_{j=1}^{nden} \theta_{dj}\phi_{dj}(t) = \phi^T(t)\theta \quad (2)$$

де:

$$\tilde{y}(t) = y(t)\theta_{d1}\phi_{d1}(t),$$

$$\theta = [\theta_{n1}, \dots, \theta_{nnum}, \theta_{d2}, \dots, \theta_{dden}]^T$$

$$\phi(t) = [\phi_{n1}(t), \dots, \phi_{nnum}(t), -y(t)\phi_{d2}(t), \dots, -y(t)\phi_{dden}(t)]^T$$

Якщо дано $\theta_{d1} = \phi_{d1}(t) = 1$, то рівняння (2) можна переписати наступним чином:

$$y(t) = \phi^T(t)\theta = \phi^T(t)\hat{\theta}(t-1) + \varepsilon(t)$$

де $\hat{\theta}(t)$ – оцінка істинного параметру θ на часовому кроці t .

Ряди Вольтерра, блок-структуровані моделі та багато нейромережових архітектур можуть бути розглянуті як підмножини моделі NARMAX. Більшість ранніх робіт ґрунтувалася на поліноміальних розширеннях моделі NARMAX. Це досі методи, які широко використовуються, але існують й інші більш складні методи, засновані на вейвлет- та інших сучасних частотно-часових перетвореннях, які були розроблені для опису систем із значною нелінійністю і дуже складних лінійних систем. Велика частка складних нелінійних систем може бути представлена моделлю NARMAX, включаючи і системи з екзотичною поведінкою, таких як хаос, біфуркації тощо. [2]

Виявлення структури є найбільш фундаментальною частиною NARMAX. Однак у моделі часто важливі лише кілька складових, а іншими в тому чи іншому вигляді можна знехтувати, без суттєвої втрати описової властивості. Тому виявлення структури системи, що має на меті вибрати один за одним правильні складові, є критично важливим. Для налаштування параметрів цих складових можна використати алгоритми на основі методу найменших квадратів [2] та його похідних. Ці алгоритми також можуть бути адаптовані для

розпізнавання шаблонів та вибору ознак і надають альтернативу аналізу основних компонентів, але з тією перевагою, що їх функції розкриваються як такі, які легко пов'язані з початковою проблемою.

Подібна задача може розв'язувалась за допомогою технологій ройових алгоритмів [3], прихованих марківських моделей [4], нейромереж [5], клітинних автоматів [6] та генетичних алгоритмів [7]. Проте наявні публікації (наприклад [2]) стосуються переважно налагоджування параметрів/коефіцієнтів існуючих апаратних засобів, без модифікації існуючої структури системи.

Генетичні алгоритми також можуть бути використані для вирішення описаної проблеми. Формалізована задача повинна бути таким чином, щоб її рішення могло бути закодовано у вигляді вектора «генів», де кожен ген може бути бітом, числом або складним об'єктом. У типових реалізаціях генетичного алгоритму передбачається, що генотип має фіксовану довжину. Далі, певним чином створюється значна кількість генотипів початкової популяції. Вони оцінюються з використанням «функції пристосованості», в результаті чого з кожним генотипом асоціюється певне значення, яке визначає, наскільки добре фенотип, що ним описується, вирішує поставлене завдання.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Останні результати в описі поведінки нелінійних систем засновані на аналізі їх параметрів і властивостей за допомогою нейронних мереж. До останнього часу була одержана значна кількість позитивних результатів, пов'язана із застосуванням нейромереж, і така реалізація нелінійних систем продовжує поглиблено вивчатися. Головна проблема полягає в тому, що нейромережові методи можна застосовувати лише до дуже особливих форм моделей нелінійних систем і в кожному своєму випадку, в більшості ця форма моделі повинна бути відома до ідентифікації. Таким чином, втрачається сама сутність автоматизованого підходу до ідентифікації систем, коли є можливим створити модель системи в режимі «чорної скриньки». І навіть в цьому випадку, основною складністю

вищеописаних методів ресинтезу є необхідність мати уявлення про будову і особливості системи, яка повинна бути відтворена. Виходячи з цього, типова задача ресинтезу систем, вимагає значних обчислювальних ресурсів, у більшості випадків несумісних із практичною можливістю використання таких методів. Тому невирішеною задачею є потреба в суттєвому скороченні машинних обчислювальних ресурсів при використанні таких методів, і потребою формування нового, гібридного метода, придатного для практичного використання. Еволюційні алгоритми можуть бути використані для вирішення такої проблеми.

Мета і завдання досліджень. Метою цієї роботи є розроблення нового гібридного цифрового методу ресинтезу складних нелінійних систем. Під поняттям «аналітична мережа» будемо розглядати колекцію наперед визначених блоків з відомою функціональністю. Завданням автоматичного алгоритму буде пошук невідомої структури системи і її налаштування за заданими значеннями вхідних і вихідних величин.

Основні результати. В якості досліджуваного об'єкту використаний типовий приклад системи цифрової або аналогової обробки сигналів – синтезатор звукових сигналів – апарат для генерації електричного сигналу

заданого тембру і частоти у відповідь на натискання деяких клавіш управління. Приклад структурної схеми аналогового синтезатора наведено на рис. 1.

Синтезатор складається з деяких типових блоків. Клавіатура слугує як джерело управляючої інформації. У відповідь на натискання клавіші електронна система синтезатора повинна генерувати електричний сигнал, що описує звук заданого тембру. Керований напругою генератор (у найпростішому випадку один, однак може бути 2, 3 і навіть 4) формує коливання заданої звукової частоти і заданої форми – пилкоподібний, прямокутний, гармонічний, ШІМ, тощо. Вони можуть бути частково розстроєними один відносно іншого за допомогою сигналу зміщення, що надає природності звучання синтезованого звуку. До складу генератора входить також генератор шуму, який дозволяє імітувати шумові складові музичних звуків. Сумарний сигнал, одержаний від генераторів, надходить на вхід фільтра керованого напругою, який забезпечує зміну спектру по частоті. З виходу фільтра сигнал надходить на вхід підсилювача керованого напругою, який формує обвідну сигналу. Керування фільтром та підсилювачем здійснюється за допомогою генераторів (ADSR),

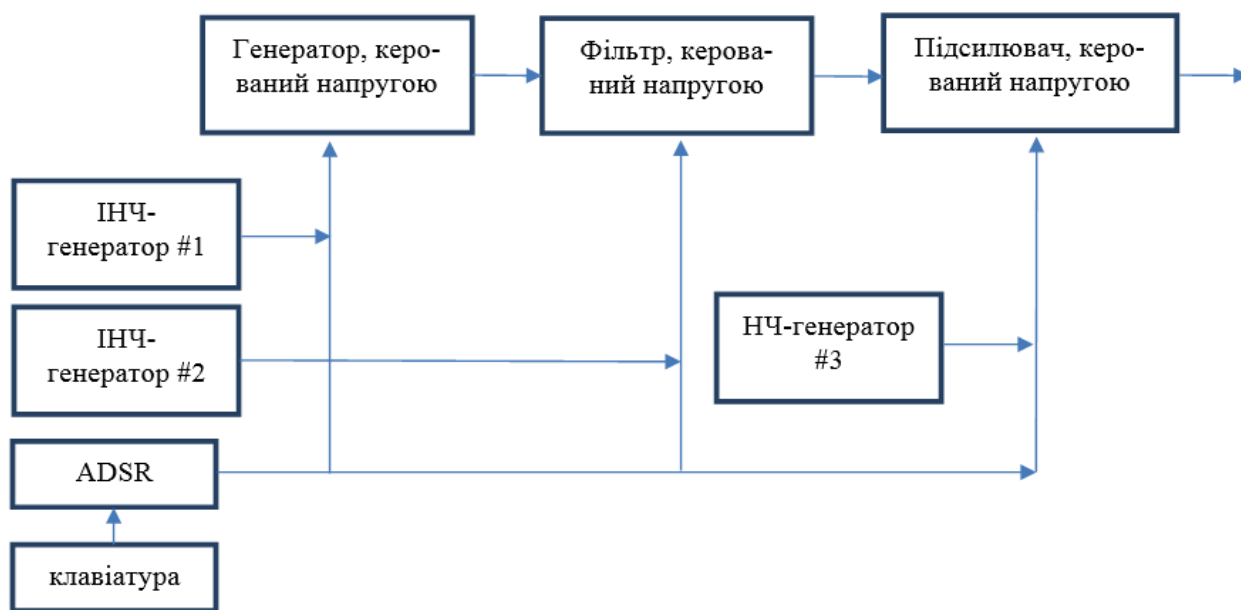


Рисунок 1 – Типова структурна схема одного каналу аналогового синтезатора

які працюють як одинвібратори, формуючи напругу у відповідь на натискання клавіші на

клавіатурі. Форма їх вихідного сигналу визначає час атаки, спадання, утримування та затухання після відпускання клавіші. Додатково інфранизькочастотні генератори здійснюють періодичну модуляцію частоти та амплітуди сигналів

Завдання розробки слід формалізувати таким чином, щоб її рішення могло бути закодовано у вигляді деякого генного вектора, де кожен ген може бути бітом, числом або складним об'єктом. У стандартних реалізаціях еволюційного алгоритму передбачається, що генотип має однакову і незмінну довжину. Далі, використовуючи певний алгоритм створюється значна кількість генотипів початкової популяції. Вони оцінюються з використанням фітнес-функції, внаслідок чого, з кожним генотипом співставляється деяке значення, яке визначає, наскільки якісно алгоритм, що ним описується, вирішує поставлене завдання.

З отриманої кількості результатів з врахуванням значення пристосованості вибираються кращі варіанти, до яких застосовуються спеціальні операції, в більшості випадків - схрещування і мутації, результатом чого є отримання нових варіантів. Після чого для них обчислюється значення пристосованості, і потім проводиться відбір рішень, які мають необхідні переваги перед попередніми в наступне покоління.

Цей набір дій повторюється циклічно, і таким чином моделюється еволюційний процес, що триває кілька життєвих часових відрізків, при яких генерується декілька поколінь, аж до поки не буде виконано критерій зупинки алгоритму. Такими критеріями зупинки, як правило, можуть бути:

- вичерпання часу, відпущеного на еволюцію
- знаходження оптимального, або квазі-оптимального рішення
- закінчення числа поколінь, відпущених на еволюцію
- завершення часу, для поліпшення попереднього результату

Основною проблемою в роботі еволюційних алгоритмів є створення ефективного критерію відбору. Механізм

відбору повинен забезпечувати достатню швидкодію та точність селекції поколінь на основі заданих параметрів.

Використання генетичних алгоритмів в поєднанні із змішаним алгоритмом картезіанського генетичного програмування (Mixed Typed Cartesian Genetic Programming) для генерування структури графа розглядалося, наприклад, в [8], однак оскільки початкова структура графа формувалась випадковим чином, загальний час експерименту для 5000 поколінь при виконанні на розподіленому обчислювальному кластері складав 5 годин. Автори пропонують підвищувати швидкодію шляхом ретельного налаштування параметрів алгоритму. Інший шлях, що пропонується в даній роботі, полягає у використанні інформації про типову структуру системи, де окремі блоки є фіксованими і потребують лише налаштування параметрів, а окремі підмережі є повністю варіативними, тобто для них налаштовуються типи блоків, параметри та зв'язки між ними.

Для автоматичного ресинтезу даного пристрою пропонуються структурні блоки АМ, які можуть містити, за потреби, в своєму складі наступні функціональні вузли:

- генератор коливань (білий шум, керована пилка, керований прямокутник, синус, таблиця програмованих значень);
 - математичні операції (+, -, *, /);
 - булеві операції (\wedge , \vee , \neg , \oplus);
 - фільтри високих та низьких частот
- Баттерворта, на основі алгоритму нескінченної імпульсної характеристики;
- блок пам'яті для запам'ятовування 1 сек цифрової інформації з можливістю зсуву та довільної вибірки даних;
 - компаратор значень;
 - корелятор;
 - безінерційний нелінійний елемент з можливістю реалізації поліноміальних нелінійностей;
 - гістерезисний елемент;
 - пряме і зворотне швидке косинусне перетворення;
 - звукові ефекти типу хорус (фезер, флейнджер тощо).

Набір вузлів може бути розширений, враховуючи специфіку систем, що потребують ресинтезу.

Загальна схема ресинтезу системи може мати вигляд, показаний на рис.2.

Сірим позначені фіксовані блоки, які не можуть змінюватись в процесі генезису. Тут: keyboard – вхідна клавіатура яка є початковим джерелом збудження. ADSR – блок формування сигналів атаки, встановлення, затримки і затухання. Ці сигнали формуються в залежності від того як і з якою швидкістю натиснуті клавіші на клавіатурі, і в залежності від характеру звуку. LFO – блок генератора інфразвукової частоти, який використовується для формування вібрацій звукового сигналу. Filt – керований фільтр, частота зрізу якого і значення резонансу можуть бути змінені. OSC – керований генератор сигналів звукової частоти. Amp – керований підсилювач сигналу. Для таких блоків можуть підбиратись коефіцієнти, проте функціональне призначення блоку не змінюється, тобто, наприклад, генератор залишається генератором, але форма і спектр генерованого сигналу змінюються. Така схема визначає скелетну будову ресинтезованої системи, навколо якого відбувається мінливий підбір структури додаткових підсистем, які

реалізують нюанси функціонування, які неможливі у реалізації тільки «скелетною» схемою. Таким чином в процесі адаптивного підбору відбувається фактично автоматичне вдосконалення початкової скелетної схеми і налаштування її параметрів.

Структура хромосоми для еволюційного алгоритму, відповідно до викладеного, повинна включати як інформацію про структуру системи (типи блоків та зв'язки між ними), так і інформацію про параметри окремих блоків.

Параметри в загальному випадку є дійсними числами. Класичні генетичні алгоритми передбачали формування бітових векторів двійкових представлень цілочислених параметрів, при цьому мутації реалізуються як випадкові заміни бітів, а рекомбінація – як перестановка фрагментів бітових векторів. Подібний метод можна використати і для дійсних параметрів (тобто використовувати двійкові представлення чисел із плаваючою комою), однак це значно погіршує контрольованість процесу мутації (наприклад, зміна одного біту у порядку числа може призвести до непропорційно значних змін параметрів і виходу їх за допустимі межі, а рекомбінація може призводити до

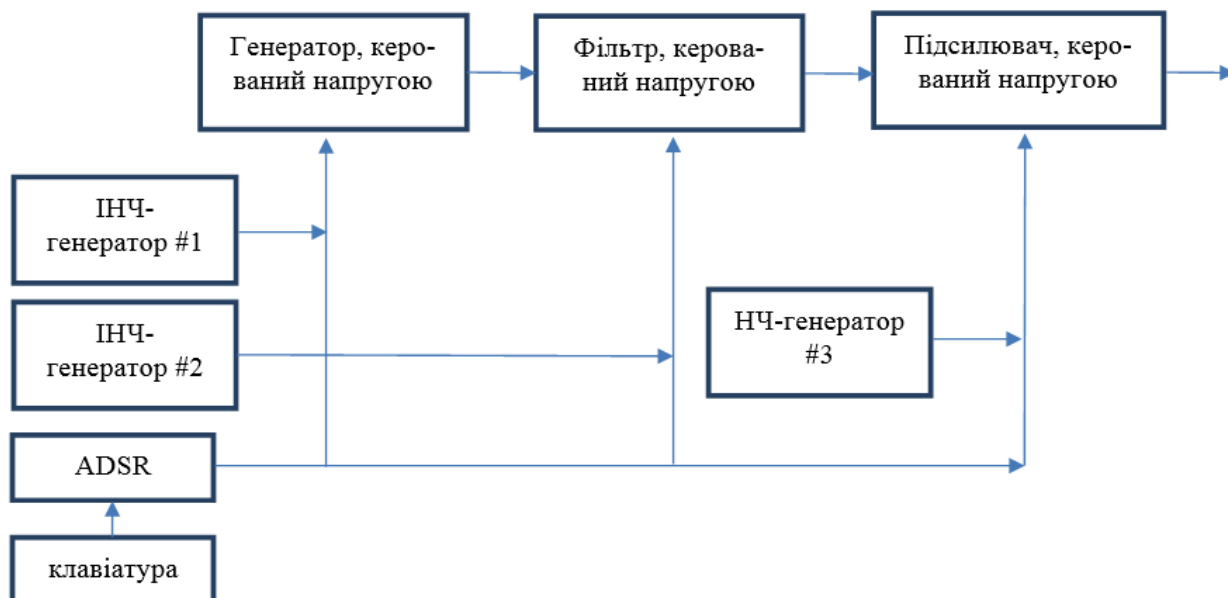


Рисунок 2 – Типова структурна схема ресинтезу одного каналу аналогового синтезатора

"перемішування" бітів різних параметрів, розташованих поруч у хромосомі). Більш ефективно в якості неподільної генетичної одиниці розглядати значення окремого

параметру, а мутацію реалізувати як додавання випадкової величини з керованим законом розподілу (наприклад, для нормально розподіленої величини швидкість мутації буде контролюватися параметром дисперсії закону розподілу). Також доцільно використовувати нормовані значення параметрів, щоб швидкість мутацій кожного із параметрів була приблизно однаковою. Таким чином, процедуру мутації можна описати наступним чином:

$$\bar{C}_M = \bar{C} + \bar{R},$$

де

$$C = \{c_{0,1}; c_{0,2}; \dots; c_{0,N_0}; c_{1,0}; c_{1,1}; \dots; c_{1,N_1}; \dots; c_{m,0}; c_{m,1}; \dots; c_{m,N_m}\}$$

- хромосома, утворена із параметрів блоків з номерами 0, 1, ..., m;

N_j – кількість параметрів j-го блоку;

\bar{R} - вектор значень випадкової величини із заданим законом розподілу;

c_{ij} – i-й параметр j-го блоку, нормований на допустимий діапазон зміни:

$$c = \frac{V - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}},$$

де V – значення параметру, V_{\min} , V_{\max} – відповідно мінімальне та максимальне значення діапазону допустимої зміни параметру.

Для кодування структури можна використати представлення графу зв'язків на основі матриці інцидентності, матриці суміжності або списку суміжності. Оскільки передбачається, що в більшості випадків матриця інцидентності буде розрідженою (кожен блок може бути з'єднаний по входам максимально із такою кількістю блоків, скільки у нього параметрів, і керує як правило лише одним вихідним блоком або невеликою їх кількістю), доцільно використати матрицю або список суміжностей. У матриці суміжностей рядки і стовпці відповідають вершинам графу, а значення відповідного елемента кодує наявність зв'язку між двома вершинами. Для вирішуваної задачі доцільно за наявності зв'язку призначати елементам не кількість зв'язків між вершинами, як у звичайній матриці суміжності, а значення, що кодують номер параметра, у який входить зв'язок. Тоді кожен рядок матриці буде містити інформацію про те, до яких входів підключений вихід блоку, номер якого дорівнює номеру

рядка, а кожен стовпець – інформацію про те, від яких блоків отримуються значення вхідних параметрів. Слід зазначити що така матриця не буде симетричною, однак дозволяє зберігати інформацію в тому числі про зворотні зв'язки у структурі пристрою. Також важливо, що нумерація входів повинна відлічуватись від 1, оскільки 0 використовується для позначення відсутності зв'язку.

Для прикладу, схема зв'язків між блоками на рис.3 може бути представлена наступною матрицею:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \end{bmatrix}$$

Хромосома в такому разі може бути утворена шляхом перетворення такої матриці у вектор-рядок.

Процедура мутації, що призводить до перебудови зв'язків, може бути реалізована шляхом обміну місцями елементів матриці у межах окремих стовпців: обмін ненульових елементів у межах стовпця призводить до зміни порядку подачі сигналів на різні параметри одного блоку, а обмін нульового і ненульового елемента – до зміни джерела сигналу для деякого параметра з одного блоку на інший.

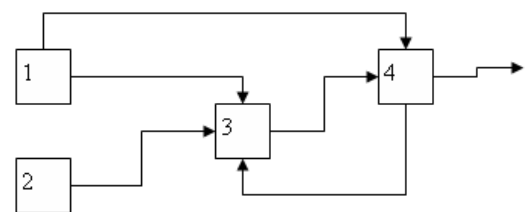


Рисунок 3 – Приклад схеми зв'язків між блоками

Наприклад, у наведеному вище прикладі можна виконати наступні мутації:

- обмін елементів $M_{0,2}$ та $M_{1,2}$ – призводить до того, що блок 1 буде керувати параметром 2, а блок 2 – параметром 1 блоку 3 (до обміну блок 1 керував параметром 1, а блок 2 – параметром 2);

- обмін елементів $M_{1,3}$ та $M_{2,3}$ – призводить до того, що другий параметр блоку 4 буде керуватися блоком 2, а не блоком 3

Також повинна бути можливість зміни типу блоку в межах існуючої структури. Відповідна хромосома може містити послідовність числових значень, кожне із яких кодує тип блоку, а процедура мутації передбачатиме випадкову заміну одного типу на інший допустимий тип. Враховуючи необхідність збереження "скелетної" структури пристрою, деякі елементи хромосоми повинні бути фіксованими – тобто тип відповідного блоку не повинен змінюватися, а лише підбиратись його параметри.

Слід зазначити що якщо кількість вхідних параметрів у нового і старого блоку після мутації не співпадає, це призведе також і до зміни структури зв'язків. В свою чергу, зміна структури зв'язків призведе до зміни вектору параметрів. Підсумовуючи вищеописане, можна сформулювати наступні правила:

1) генотип повинен містити три хромосоми, які кодують відповідно типи блоків, структуру зв'язків між блоками та набір параметрів блоків;

2) для кожної із трьох хромосом передбачена окрема процедура мутації;

3) мутації повинні виконуватись узгоджено для збереження інваріанту допустимості отриманої структури, а саме: на першому кроці виконується мутація типів, на другому – мутація структури із врахуванням обмежень, що накладаються в результаті мутації типів, на третьому – мутація параметрів, з попередньою перебудовою вектору параметрів відповідно до змін у структурі.

Процес підбору включає в себе адаптивне формування структури підмереж відомих вузлів навколо скелетної схеми, заданої початково вручну, у випадку, коли частково відома структура пристрою, який необхідно ресинтезувати. Процес циклічно проходить декілька фаз, кількість яких відповідає кількості заданих сигналів. Після додавання нового апаратного блоку X з типом, що можливо можуть застосовуватись поруч із блоками базової схеми, проводиться повне налаштування всіх параметрів для всіх блоків системи, для досягнення максимального співпадіння вихідного сигналу із еталонним. Якщо сигнали

не достатньо співпадають, змінюється тип блоку X на інший і проводиться повторне налаштування одержаної системи. Після досягнення заданого значення співпадіння на корпусі навчальної вибірки одного типу, приймається рішення про додавання нового блоку в підмережу. Далі процес повторюється, аж до максимального досягнення співпадіння одержаних сигналів з еталонними на всій вибірці. В наступній фазі – спробі синтезу наступного сигналу іншого типу, спочатку змінюються всі параметри синтезованої системи, і в разі, якщо заданими апаратними засобами неможливо відтворити заданий сигнал – починається додавання нових системних вузлів. При цьому старі системні блоки фіксуються і залишаються незмінними в наступному циклі ресинтезу.

Для функції відбору пропонується використати двофазний алгоритм для грубої і точної оцінок одержаного результату. В початковій, наближеній фазі, генерований сигнал порівнюється з еталонним за допомогою мел-частотних кепстральних коефіцієнтів (МЧКК).

Мел-частотний кепстр - це короткочасний спектр потужності звукового сигналу, що ґрунтується на лінійному косинусному перетворенні логарифмічного спектру потужності, що представлений на нелінійній частотній мел-шкалі.

Мел-частотні кепстральні коефіцієнти - це коефіцієнти, які разом складають мел-частотний кепстр. Різниця між кепстром і мел-частотним кепстром полягає в тому, що в МЧК діапазони частот однаково розташовані на мел-шкалі, яка описує особливості чутливості людської слухової системи більш повно, ніж лінійно розташовані частотні діапазони, що використовуються в нормальному кепстрі [9].

Друга фаза порівняння базована на аналізі різниці спектральних характеристик, одержаних в діапазоні 50Гц – 10кГц. Даний діапазон вибраний як найбільш суттєвий з точки зору різниці тембрів. Така фаза потребує більшу кількість операцій, ніж МЧКК, тому використовується тільки на етапі фінального точного підстроювання регуляторів (управляючих коефіцієнтів) системи.

Реалізація алгоритму роботи аналітичної мережі здійснюється за допомогою

управляючого блоку, який здійснює вибір блоків аналітичної мережі та налаштування всіх коефіцієнтів системи. Реалізація такої системи може бути здійснена повністю програмно за допомогою комп'ютера, або за допомогою масиву цифрових сигнальних процесорів, що реалізують аналітичну мережу, та процесора загального призначення в якості управляючого блоку.

Висновки. В якості засобу цифрового моделювання складних нелінійних систем запропоновано використати аналітичні мережі, що показано на прикладі ресинтезу одного каналу аналогового синтезатора звукових сигналів. В загальному це забезпечить покращену точність при ресинтезі звукових генеративних схем, оскільки під час такого ресинтезу відбувається не тільки підбір параметрів схем, але й динамічне вдосконалення самої схеми генерації. В результаті використання такого підходу можна створювати нові числові моделі для існуючих механічних процесів, представлених синхронним записом вхідних і вихідних параметрів представлених у вигляді великих таблиць.

Література

1. Billings S.A. "Identification of Nonlinear Systems: A Survey". IEE Proceedings Part D 127(6), 272–285,1980
2. Rugh W.J. "Nonlinear System Theory – The Volterra Wiener Approach". Johns Hopkins University Press,1981
3. Billings S.A. "Identification of Nonlinear Systems: A Survey". IEE Proceedings Part D 127(6), 272–285,1980
4. Haber R., Keviczky L "Nonlinear System Identification-Input Output Modeling Approach". Vols I & II, Kluwer,1980
5. M.Poluektov and A.Polar. Modelling non-linear control systems using the discrete urysohn operator. 2018. Submitted arXiv:1802.01700.
6. A.Polar.
<http://ezcodesample.com/urysohn/urysohn.html>
7. M.Poluektov and A.Polar. Urysohn Adaptive Filter. 2019.
8. Haykin S. "Neural Networks: A Comprehensive Foundation". McMillan,1999
9. Warwick K, Irwin G.W., Hunt K.J. "Neural Networks for Control and Systems". Peter Peregrinus, 1992

10.Lennart., Ljung (1999). System identification : theory for the user (2nd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR. ISBN 978-0136566953. OCLC 38884169.

11.Schön, Thomas B.; Lindsten, Fredrik; Dahlin, Johan; Wågberg, Johan; Naesseth, Christian A.; Svensson, Andreas; Dai, Liang (2015). "Sequential Monte Carlo Methods for System Identification**This work was supported by the projects Learning of complex dynamical systems (Contract number: 637-2014-466) and Probabilistic modeling of dynamical systems (Contract number: 621-2013-5524), both funded by the Swedish Research Council". IFAC-PapersOnLine. 48 (28): 775–786. arXiv:1503.06058. doi:10.1016/j.ifacol.2015.12.224.

12.M. Abdalmoaty, 'Learning Stochastic Nonlinear Dynamical Systems Using Non-stationary Linear Predictors', Licentiate dissertation, Stockholm, Sweden, 2017. Urn:nbn:se:kth:diva-218100

13.Abdalmoaty, Mohamed Rasheed; Hjalmarsson, Håkan (2017). "Simulated Pseudo Maximum Likelihood Identification of Nonlinear Models". IFAC-PapersOnLine. 50 (1): 14058–14063. doi:10.1016/j.ifacol.2017.08.1841.

14.Abdalmoaty, Mohamed (2019). "Identification of Stochastic Nonlinear Dynamical Models Using Estimating Functions".

15.Abdalmoaty, Mohamed Rasheed-Hilmy; Hjalmarsson, Håkan (2019). "Linear prediction error methods for stochastic nonlinear models". Automatica. 105: 49–63. doi:10.1016/j.automatica.2019.03.006.

16.Ровінський В.А., Євчук О.В.,Стрілецький Ю.Й.,Використання цифрових хвильових фільтрів у задачах технічної вібродіагностики. Метрологія та прилади. – 2011. - №6(32). – С.67-70

17.Ровінський В.А., Євчук О.В.,Стрілецький Ю.Й.,Особливості реалізації нелінійних опорів в системах цифрової обробки сигналів. Методи та прилади контролю якості. - 2011. - №27. - С. 91-95

18.A. Vladimirescu.The Spice Book. Wiley, New York, 1994

References

1. Billings S.A. "Identification of Nonlinear Systems: A Survey". IEE Proceedings Part D 127(6), 272–285,1980

2. Rugh W.J. "Nonlinear System Theory – The Volterra Wiener Approach". Johns Hopkins University Press, 1981
3. Billings S.A. "Identification of Nonlinear Systems: A Survey". IEE Proceedings Part D 127(6), 272–285, 1980
4. Haber R., Keviczky L "Nonlinear System Identification-Input Output Modeling Approach". Vols I & II, Kluwer, 1980
5. M.Poluektov and A.Polar. Modelling nonlinear control systems using the discrete urysohn operator. 2018. Submitted arXiv:1802.01700.
6. A.Polar.
<http://ezcodesample.com/urysohn/urysohn.html>
7. M.Poluektov and A.Polar. Urysohn Adaptive Filter. 2019.
8. Haykin S. "Neural Networks: A Comprehensive Foundation". McMillan, 1999
9. Warwick K, Irwin G.W., Hunt K.J. "Neural Networks for Control and Systems". Peter Peregrinus, 1992
10. Lennart., Ljung (1999). System identification : theory for the user (2nd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR. ISBN 978-0136566953. OCLC 38884169.
11. Schön, Thomas B.; Lindsten, Fredrik; Dahlin, Johan; Wågberg, Johan; Naesseth, Christian A.; Svensson, Andreas; Dai, Liang (2015). "Sequential Monte Carlo Methods for System Identification**This work was supported by the projects Learning of complex dynamical systems (Contract number: 637-2014-466) and Probabilistic modeling of dynamical systems (Contract number: 621-2013-5524), both funded by the Swedish Research Council". IFAC-PapersOnLine. 48 (28): 775–786. arXiv:1503.06058. doi:10.1016/j.ifacol.2015.12.224.
12. M. Abdalmoaty, 'Learning Stochastic Nonlinear Dynamical Systems Using Non-stationary Linear Predictors, Licentiate dissertation, Stockholm, Sweden, 2017. Urn:nbn:se:kth:diva-218100
13. Abdalmoaty, Mohamed Rasheed; Hjalmarsson, Håkan (2017). "Simulated Pseudo Maximum Likelihood Identification of Nonlinear Models". IFAC-PapersOnLine. 50 (1): 14058–14063. doi:10.1016/j.ifacol.2017.08.1841.
14. Abdalmoaty, Mohamed (2019). "Identification of Stochastic Nonlinear Dynamical Models Using Estimating Functions".
15. Abdalmoaty, Mohamed Rasheed-Hilmy; Hjalmarsson, Håkan (2019). "Linear prediction error methods for stochastic nonlinear models". Automatica. 105: 49–63. doi:10.1016/j.automatica.2019.03.006.
16. Rovinskyi V.A., Yevchuk O.V., Striletskyi Yu.I., Vykorystannia tsyfrovyykh khvylovykh filtriv u zadachakh tekhnichnoi vibrodiahnostyky. Metrolohiia ta prylyady. – 2011. - №6(32). – S.67-70
17. Rovinskyi V.A., Yevchuk O.V., Striletskyi Yu.I., Osoblyvosti realizatsii neliniinykh oporiv v systemakh tsyfrovoy obrobky syhnaliv. Metody ta prylyady kontroliu yakosti. - 2011. - №27. - S. 91-95
18. Vladimirescu. The Spice Book. Wiley, New York, 1994