

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ МОНІТОРИНГУ ДОПУСТИМОСТІ ЗАВАНТАЖЕННЯ КОНТРОЛЬОВАНИХ ПЕРЕТИНІВ ЕНЕРГОСИСТЕМ

О.Ф.Буткевич¹, А.В.Левконюк¹, О.І.Стасюк²

¹ – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна, e-mail:butkevych@ied.org.ua

² – Державний економіко-технологічний університет транспорту,
вул. Лукашевича, 19, Київ, 03049, Україна.

Викладено основні положення нового підходу до визначення в реальному часі допустимості завантаження контрольованих перетинів енергосистеми за запасами статичної стійкості. Зазначений підхід базується на моделях, побудованих з використанням методу групового урахування аргументів (МГУА), та результатах синхронізованих вимірювань векторів напруги на визначених об'єктах енергосистеми. Розглянуто особливості формування вибірок даних, критерії та алгоритми побудови та використання моделей. Дано загальну характеристику розробленого програмного комплексу побудови моделей, також зазначено час, потрібний для побудови та обчислення поліноміальних моделей залежно від характеристик комп'ютерів, що використовуються. Бібл. 11, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: моніторинг, енергосистема, запас статичної стійкості, векторні вимірювання напруги, модель.

Вступ. Забезпечення відповідності *запасів статичної стійкості* поточних режимів електроенергетичних систем (ЕС) України нормативним вимогам [9] є однією із основних задач диспетчерського керування ЕС (тут під ЕС розуміємо і об'єднані ЕС – ОЕС), оскільки наявність необхідного *запасу статичної стійкості* як певної *відстані* (визначеної з використанням відповідної метрики) до границі стійкості режиму ЕС є однією із умов існування режимів реальних ЕС. Для контролю зазначених запасів диспетчерським персоналом використовуються відповідні засоби моніторингу.

В ЕС технічно розвинутих країн широко впроваджують пристрої векторних вимірювань параметрів режимів ЕС – PMUs (Phasor Measurement Units), які є основою сучасних систем моніторингу режимів ЕС та ОЕС – WAMSs (Wide Area Measurement Systems). На об'єктах ОЕС України теж впроваджують PMUs вітчизняного виробництва – електровимірювальні реєструючі пристрої (ЕВРП) “Регіна-Ч”, які забезпечують синхронізоване за супутниковими сигналами точного часу вимірювання векторів напруги, попередню обробку та передачу інформації до диспетчерського центру (ДЦ) ОЕС України. З впровадженням таких пристроїв з'являється можливість якісного удосконалення системи керування режимами ОЕС України, однак порівняно незначні обсяги впровадження в ОЕС України ЕВРП “Регіна-Ч” (для порівняння: в ЕС США та КНР кількість встановлених на об'єктах PMUs обчислюється сотнями) роблять процес створення WAMS ОЕС України повільним і певною мірою спорадичним.

З урахуванням вищезазначених реалій було запропоновано [1, 2] підхід до створення проблемно-орієнтованої системи моніторингу режимів ОЕС України, однією із задач якої було визначення допустимості завантаження контрольованих перетинів ЕС за запасами статичної стійкості. Для розв'язання цієї задачі передбачалося використання моделей у формі поліному Колмогорова-Габора (поліноміальних моделей – ПМ), в яких використовуються результати вимірювання векторів напруги на окремих об'єктах ОЕС України, враховуючи, що за наявного стану справ щодо бажаних обсягів і темпів впровадження ЕВРП “Регіна-Ч” на об'єктах ОЕС України можна розраховувати на одержування з необхідною періодичністю інформації в ДЦ ОЕС України від порівняно невеликої кількості ЕВРП “Регіна-Ч”. Підкреслимо, що у загальному випадку задача не зводиться до визначення допустимості завантаження окремих елементів контрольованих перетинів ЕС (це тривіальна задача у разі вимірювання векторів напруги на обох кінцях зазначених елементів) і стосується визначення допустимості завантаження саме контрольованих перетинів, беручи до уваги можливість використання лише інформації, яка надходитиме від обмеженої кількості ЕВРП “Регіна-Ч”. Одночасне використання двох різних способів (і відповідних засобів) моніторингу допустимості завантаження контрольованих перетинів ЕС дозволить підвищити надійність системи оперативного керування ЕС у цілому.

У даній статті розглянуто питання, які не висвітлювалися у попередніх публікаціях – вихідні положення, деякі особливості, окремі алгоритми та характеристики побудови та використання ПМ для визначення допустимості завантаження контрольованих перетинів ЕС за запасами статичної стій-

кості. Оскільки ж саме оперативному визначенню допустимості завантаження контрольованих перетинів ЕС за запасами статичної стійкості, але з використанням іншого підходу, відмінного від “традиційного”, присвячено дану статтю, то для забезпечення можливості порівняння спочатку зупинимося на деяких особливостях та уразливостях “традиційного” підходу. Це доцільно зробити також і тому, що для побудови ПМ використовується інформація (результати відповідних варіантних розрахунків режимів ЕС), підготовка якої є необхідною для реалізації “традиційного” підходу.

“Традиційний” підхід до визначення допустимості завантаження перетинів ЕС. Згідно з [9], запас статичної стійкості характеризується коефіцієнтами запасу з активної потужності в перетинах ЕС та коефіцієнтами запасу з напруги у вузлах навантаження (*перетин* – “сукупність одного чи декількох зв’язків, вимкнення яких призводить до повного розділення ЕС на дві електрично непов’язані частини”). Для визначення коефіцієнтів запасу з активної потужності в перетинах ЕС K_p та коефіцієнтів запасу з напруги у вузлах навантаження (K_U) використовують формули [9]

$$K_p = (P_{зр.} - P - \Delta P) / P_{зр.}, \quad K_U = (U - U_{кр.}) / U_{кр.}, \quad (1, 2)$$

де P , $P_{зр.}$ та ΔP – відповідно значення потоку активної потужності ($P > 0$) в перетині ЕС за конкретного режиму (тут і далі вживаємо “потоку потужності” замість “перетоку потужності”, який часто зустрічається в спеціалізованій літературі і є певною “термінологічною трансформацією” між-системного перетоку [8]), потоку активної потужності в граничному за статичною стійкістю режимі та амплітуда нерегулярних коливань активної потужності у цьому ж перетині; $U_{кр.}$, U – значення напруги у вузлі навантаження – відповідно критичне (в аспекті порушення стійкості навантаження) та за конкретного режиму. Згідно з [9], за нормальних та обважнених режимів слід забезпечувати $K_p \geq 0,2$, $K_U \geq 0,15$, а у разі вимушених (післяварійних) – $K_p \geq 0,08$, $K_U \geq 0,1$.

Щоб забезпечити можливість контролю диспетчерським персоналом ЕС відповідності запасів з активної потужності у контрольованих перетинах ЕС нормативним вимогам, спочатку попередньо виконують в режимі *off-line* низку розрахунків з обважнювання у різний спосіб режимів ЕС з метою визначення максимально допустимого потоку активної потужності ($P_{м.д.}$) для кожного контрольованого перетину. Для цього, використовуючи (1) та відповідне нормативне значення K_p , обчислюють сумарний потік активної потужності в перетині (P), і одержане значення приймають як максимально допустиме ($P_{м.д.i}$) за даного (i -го) способу обважнювання режиму ЕС у перетині. Оскільки для кожного контрольованого перетину ЕС, враховуючи реальні умови функціонування ЕС, існує декілька (q) можливих способів такого обважнювання, то як $P_{м.д.}$ беруть

$$P_{м.д.} = \min \{ P_{м.д.i} \ i = \overline{1, q} \}. \quad (3)$$

Визначені для контрольованих перетинів ЕС $P_{м.д.}$, що відповідають нормальним та вимушеним (післяварійним) режимам, використовують у підготовці інструктивних матеріалів диспетчерському персоналу ЕС (наприклад, інструкції “ОД-10”), з використанням яких під час ведення режимів він повинен забезпечувати відповідність поточних потоків активної потужності (P) у контрольованих перетинах нормативним вимогам щодо запасів статичної стійкості (додатково повинно забезпечуватися виконання й інших, передбачених [9], вимог, наприклад, вимог щодо допустимості струму електричної мережі та збереження динамічної стійкості ЕС за нормативних збурень)

$$P \leq P_{м.д.} \quad (4)$$

Режим ЕС, за якого виконується умова (4) для кожного із контрольованих перетинів, можна класифікувати як *допустимий* (в аспекті допустимості завантаження контрольованих перетинів ЕС), інакше – як *недопустимий*.

Очевидно, що з використанням в (4) для контролю допустимості завантаження перетину найменшого із усіх розрахованих значень $P_{м.д.i}$ буде забезпечуватися виконання нормативних вимог щодо значень K_p за будь-яких реально можливих змін режиму ЕС, але за умови, що під час визначення $P_{м.д.}$ було враховано усі гіпотетично можливі способи обважнювання базового режиму ЕС за відповідних структури контрольованих перетинів та стану тих елементів ЕС, що мають суттєвий вплив на пропускну здатність перетину. Однак, досвід експлуатації ЕС України свідчить про можливість відмов надходження до центрів диспетчерського керування (ДЦ) ЕС інформації, необхідної для контролю поточ-

ного завантаження перетинів за умовою (4) (також не забезпечуються бажані надійність та періодичність розв'язання задачі оцінювання стану ЕС, що дозволило б перейти до визначення запасів статичної стійкості ЕС у режимі квазіреального часу). Відсутність же поточних даних щодо потоку активної потужності навіть в одному із елементів контрольованого перетину може призводити до невизначеності сумарного потоку активної потужності в перетині, наслідком чого буде фактична втрата контролю допустимості режиму за умовою (4). (Іноді, щоб компенсувати “втрату” таких даних, замість них використовують відповідні результати попередніх телевимірювань, але похибка визначення сумарного потоку активної потужності, викликана такою “компенсацією”, може бути суттєвою: вона залежатиме, насамперед, від рівня та “динаміки” завантаження відповідного елемента перетину). “Втрата” ж телеінформації, що є індикатором зміни стану елемента контрольованого перетину (“втрата” телесигналу, який свідчить про вимкнення елемента перетину), призведе до використання диспетчером ЕС під час контролю виконання умови (4) невідповідної поточній структурі перетину значення $P_{м.д.}$. Наслідком цього може бути порушення статичної стійкості, оскільки диспетчер неадекватно оцінюватиме пропускну здатність перетину, орієнтуючися на відмінну від фактичної “повнішу” структуру перетину.

Вихідні положення запропонованого підходу. Розглянемо докладніше окремі питання, пов'язані з побудовою та використанням ПМ, призначених для розв'язання двох різних задач: ідентифікацію структури контрольованих перетинів ЕС та визначення допустимості їхнього поточного завантаження за запасами статичної стійкості ЕС. Оскільки питання, пов'язані із розв'язанням першої із зазначених задач, розглянуто в [5], то далі зупинимося, в основному, на тих питаннях, які стосуються розв'язання обох або ж другої із задач. Зауважимо, що окремі вихідні положення запропонованого підходу до створення проблемно-орієнтованої системи моніторингу режимів ОЕС України попередньо було подано у вигляді гіпотез (що потребували всебічної експериментальної перевірки, яку можна було виконати лише розробивши відповідний інструментарій). Узагальнюючи, зазначені положення можна викласти так.

1. За незмінної структури електричної мережі задачу визначення допустимості поточного завантаження кожного із контрольованих перетинів ЕС можна розв'язувати як задачу класифікації, подавши “простір” режимів ЕС векторами напруги, вимірюваними на окремих об'єктах ЕС, і поділивши його на класи – залежно від відповідності завантаження контрольованого перетину ЕС певним значенням K_p , що характеризують запас статичної стійкості ЕС.

2. Нелінійні гіперповерхні, які у просторі векторів напруги поділяють образи режимів ЕС на класи, можна з необхідною точністю апроксимувати послідовністю відповідних нелінійних функцій (що випливає із узагальнення відомої теореми Вейерштрасса про апроксимування, зроблене Стоуном [11]). За цих умов задача зводиться до побудови та використання відповідних ПМ, які у разі коректно сформованих навчальних вибірок даних забезпечать можливість класифікації поточних режимів ЕС – визначатимуть належність їхніх образів до певних класів, що знаходяться по різні боки відповідних розділювальних гіперповерхонь. Тут слід підкреслити, що лінійне розділення образів режимів ЕС у зазначеному просторі неможливе (для того, щоб збільшити ймовірність лінійного розділення образів режимів ЕС, згідно з теоремою [10], слід було б застосовувати нелінійне перетворення вхідних даних і перейти до простору *більшої* вимірності, що призвело б до зміни початкових умов і унеможливило б практичне розв'язання поставленої задачі), проте є підстави для знаходження зазначених розділювальних гіперповерхонь навіть у разі їхньої суттєвої нелінійності.

3. Поділ образів режимів ЕС на *класи допустимості* можна здійснювати залежно від інтервальних значень коефіцієнтів запасу з активної потужності у контрольованому перетині ЕС (K_p^d). Інтервальні значення K_p^d (індекс d є ідентифікатором певного *класу допустимості*) можуть бути, наприклад, такими:

$$0,2 \leq K_p^1 < 0,3; \quad 0,3 \leq K_p^2 < 0,4; \quad 0,4 \leq K_p^3; \quad 0,08 \leq K_p^4 < 0,2; \quad 0,05 \leq K_p^5 < 0,08; \quad K_p^6 < 0,05. \quad (5)$$

У загальному випадку, у разі поділу образів режимів ЕС на l класів (кожен з яких відповідає режимам з певним інтервальним значенням K_p^d) слід мати ансамбль з $(l-1)$ відповідних ПМ (на питаннях використання таких ансамблів ПМ та моделей-дублерів зупинимося дещо далі). Тут слід вказати на, здавалося б, певну надлишковість зазначеної кількості класів (5), тим більше, що це не передбачено [9]. Однак, така надлишковість, з одного боку, не суперечить вимогам [9], а з іншого – дозволяє диспетчерові ЕС “кількісно” оцінювати “відстань”, що існує між поточним режимом та “нормативно допустимим” (згідно з [9]). Що ж стосується класів допустимості, які характеризуються коефі-

цієнтами запасу, меншими від нормативно допустимих (серед наведених в (5) у разі нормальної схеми електричних з'єднань перетину ЕС до таких належатимуть K_p^4 , K_p^5 , K_p^6), то тут слід зауважити, що в історії ОЕС України (на той час – ОЕС Півдня, що об'єднувала енергосистеми УРСР та МРСР колишнього СРСР) були періоди, коли диспетчерський персонал вимушений був вести режими ОЕС, що характеризувалися коефіцієнтами запасу з активної потужності в контрольованому міждержавному перетині значно меншими від нормативних (на рівні 0,05), тому введення зазначених вище “нормативно недопустимих” класів не видається зайвим.

Слід зауважити, що моделі для класифікації допустимості завантаження контрольованих перетинів ЕС можна реалізовувати і на нейромережевому базисі, адже штучні нейронні мережі (ШНМ) мають хороші можливості щодо їхнього налаштування для урахування особливостей конкретних задач (насамперед, завдяки можливості вибору та налаштування як архітектури, так і функцій активації). Згідно з [6], можна створити та налаштувати ШНМ відповідної архітектури, щоб отримати як завгодно точне наближення будь-якої неперервної функції багатьох змінних. Отже, теоретично, на базі ШНМ можна було б створити близькі до умовно “еталонних” моделі для класифікації допустимості завантаження контрольованих перетинів ЕС. Однак, керуючися міркуваннями надійності та простоти практичного використання в виробничих умовах як засобів побудови моделей, так і подальшого використання самих моделей, початковий вибір було зроблено на користь ПМ, а не ШНМ (згодом було виконано порівняння ПМ та ШНМ за критерієм мінімуму помилок класифікації, яке підтвердило правильність зробленого вибору [4]). Для побудови ПМ використано індуктивний метод самоорганізації моделей складних систем (методу групового урахування аргументів – МГУА) [7].

Поліноміальні моделі повинні апроксимувати гіперповерхні, що розділяють класи образів режимів ЕС. Якщо припустити, що апроксимацію гіперповерхонь ПМ забезпечують з достатньою точністю, то для точок, розташованих на таких гіперповерхнях, повинні виконуватися умови

$$F(X) = 0, \quad W(V) = 0, \quad (6, 7)$$

де $F(X)$ – це ПМ; X – вектор вхідних змінних ПМ; (7) – система рівнянь усталеного режиму ЕС, а V – відповідний вектор її режимних параметрів ($X \subset V$).

ПМ має форму поліному Колмогорова-Габора

$$F(X) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i x_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots, \quad (8)$$

коефіцієнти та остаточна структура якого визначаються в результаті побудови ПМ; N – початкова кількість вхідних змінних до початку селекції.

Для побудови як ПМ, призначених для визначення допустимості завантаження контрольованих перетинів ЕС, так і ПМ, призначених для ідентифікації структури контрольованих перетинів ЕС [5], використовуються ті ж самі результати розрахунків режимів ЕС, на базі яких формуються вибірки даних. Такі вибірки стисло “представляють” множину усталених режимів ЕС (значеннями модулів та кутів векторів напруги в окремих вузлах розрахункової схеми ЕС), одержуваних на різних траєкторіях (у різний спосіб) обважнювання базового режиму ЕС, і мають таку структуру:

$$D = \{ (Z_i, C_i) \}_{i=1}^M, \quad (9)$$

де Z_i – один із M векторів вибірки даних, який є “представником” певного режиму ЕС, його *образом* (елементи кожного такого вектору – це значення модулів та кутів векторів напруги певних вузлів розрахункової схеми ЕС; усі вектори вибірки даних D (9) мають однакову вимірність і склад елементів); C_i – вектор ідентифікаторів, з використанням значення першого елемента якого встановлюється належність режиму ЕС до певного класу допустимості, що характеризується *інтервальним* значенням коефіцієнта запасу з активної потужності у контрольованому перетині ЕС; другий елемент вектора C_i містить номер траєкторії обважнювання режиму ЕС (ця інформація під час побудови ПМ не використовується і має допоміжне призначення); третій елемент вектора C_i – це ідентифікатор структури контрольованого перетину, а четвертий – вказує на границю інтервалу, по відношенню до якої за значенням першого елемента вектора ідентифікаторів встановлюється клас допустимості режиму.

Між вказаними вище векторами існують співвідношення $X \subset Z \subset V$.

Деякі особливості формування вибірок даних та алгоритму побудови ПМ. Для формування вибірок даних (9) використовуються результати варіантних розрахунків обважнених режимів ЕС, які обов'язково виконуються відповідними технологічними службами ЕС з метою визначення

P. м.о. (3) контрольованих перетинів ЕС та підготовки інструкцій диспетчерському персоналу. До складу вектора Z слід відбирати ті модулі та кути (не обов'язково парами) векторів напруги вузлів розрахункової схеми ЕС, які можуть впливати на значення потоку активної потужності в контрольованому перетині. У складі векторів Z вибірки даних D (9) обов'язково слід використовувати модулі та кути векторів напруги тих вузлів розрахункової схеми ЕС, які утворюють перший та другий яруси по різні боки контрольованого перетину (перший ярус утворюють вузли приєднання зв'язків перетину, а другий – вузли, що безпосередньо з'єднано через зв'язки з вузлами першого ярусу). Розроблений комплекс засобів побудови ПМ для розв'язання обох із зазначених вище задач (ідентифікації структури та визначення допустимості завантаження контрольованих перетинів ЕС) забезпечує автоматизацію як процесу формування вибірок даних, так і процесу побудови ПМ.

Усі вибірки даних, підготовлені на базі використання нормальної схеми ЕС, незалежно від особливостей траєкторій об'єктування режиму, використання шунтувальних реакторів, положень відгалужень трансформаторів поперечного регулювання тощо, об'єднують в одну *нормальну* вибірку (вибірку, що стосується повної схеми електричних з'єднань ЕС). Використання модулів і кутів векторів напруги у складі вектора X дає можливість ПМ адекватно "реагувати" на структурні зміни в ЕС, однак у разі ремонтних схем для побудови моделей слід використовувати відповідні *ремонтні* вибірки. Кінцевим етапом формування вибірок даних є їхня нормалізація, яка виконується для кожного елемента z_i ($i = \overline{1, N}$) векторів Z_j ($j = \overline{1, M}$) вибірки даних D (9)

$$z_i^H = (z_i - \bar{z}_i) / (z_{i\max} - z_{i\min}) \quad (z_i^H \in [-1; 1]), \quad (10)$$

де z_i^H , \bar{z}_i , $z_{i\max}$, $z_{i\min}$ – відповідно нормалізоване, середнє, максимальне та мінімальне значення z_i вибірки даних.

У процесі побудови ПМ (8) із початкової кількості (N) "претендентів" на входження до вектора її вхідних змінних (X), яка визначається кількістю елементів вектора Z навчальної вибірки даних, відбирається лише частина. В результаті побудови ПМ (разом із визначенням складу вектора X) уточнюється і перелік електроенергетичних об'єктів ЕС, яким "належать" модулі та кути векторів напруги, що входять до складу вектора X , тобто тих об'єктів, на яких слід встановлювати ЕВРП "Регіна-Ч" для забезпечення ПМ вхідною інформацією. Разом з тим, серед об'єктів ЕС, вектори напруги яких попередньо відбираються до складу вектора Z навчальної вибірки даних, можуть бути і ті, де вже встановлено ЕВРП "Регіна-Ч". Очевидно, що з точки зору мінімізації витрат на створення проблемно-орієнтованої системи моніторингу режимів ЕС бажано мати у складі вектора вхідних змінних X побудованої ПМ насамперед ті вектори напруги, що вже вимірюються встановленими на об'єктах ЕС ЕВРП "Регіна-Ч". Якщо є підстави вважати, що такі вектори напруги можуть бути інформативними в аспекті розв'язання поставленої задачі, то їх можна "убезпечити" від попередньої процедури селекції змінних. Справа у тому, що безпосередньо процес побудови ПМ починається процедурою селекції потенційно інформативних змінних (відсіваючи неінформативні), для чого використовується "кореляційний поріг" (λ), який долають ті змінні (z_i), для яких обчислені коефіцієнти кореляції

$$r_{yz_i} = \left[\sum_{j=1}^M (y_j - \bar{y})(z_{ij} - \bar{z}_i) \right] / \left[\sum_{j=1}^M (y_j - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^M (z_{ij} - \bar{z}_i)^2 \right]^{0.5}, \quad (11)$$

що стосуються вхідних (z) і вихідних (y) змінних, перевищують λ ($r_{yz_i} > \lambda$).

Оскільки за такої селекції існує ймовірність "відсіювання" окремих модулів та кутів векторів напруги, що гіпотетично можуть впливати на результати класифікації завантаження контрольованого перетину ЕС (до таких можуть належати і ті, що вже вимірюються встановленими на об'єктах ЕС ЕВРП "Регіна-Ч"), то щоб уникнути цього, застосовується "проведення" таких режимних параметрів ЕС в обхід зазначеного "порогу" λ . На рис. 1 наведено ілюстративний приклад структури алгоритму (зі зменшеною кількістю рядів) побудови ПМ оптимальної складності, з якого видно, що змінна Z_1 "проводиться" до наступного ряду алгоритму побудови ПМ в обхід "кореляційного порогу" λ , у той час як змінні Z_3 , Z_i , та Z_k долають такий поріг.

На відміну від задач класифікації в тих предметних областях, де окремі помилки класифікації не призводять до фатальних наслідків, помилки у визначенні допустимості завантаження контрольованих перетинів ЕС можуть призвести до порушення статичної стійкості ЕС (якщо *недопустимий*

режим за запасом статичної стійкості буде класифіковано як *допустимий*). Тому однією із основних вимог до визначення допустимості режимів ЕС за запасами статичної стійкості є вимога забезпечення *безпомилковості* такого визначення, незалежно від методів та засобів, які для цього використовуються. Отже, побудовані ПМ повинні забезпечувати необхідну точність (безпомилковість) класифікації допустимості завантаження контрольованих перетинів ЕС.

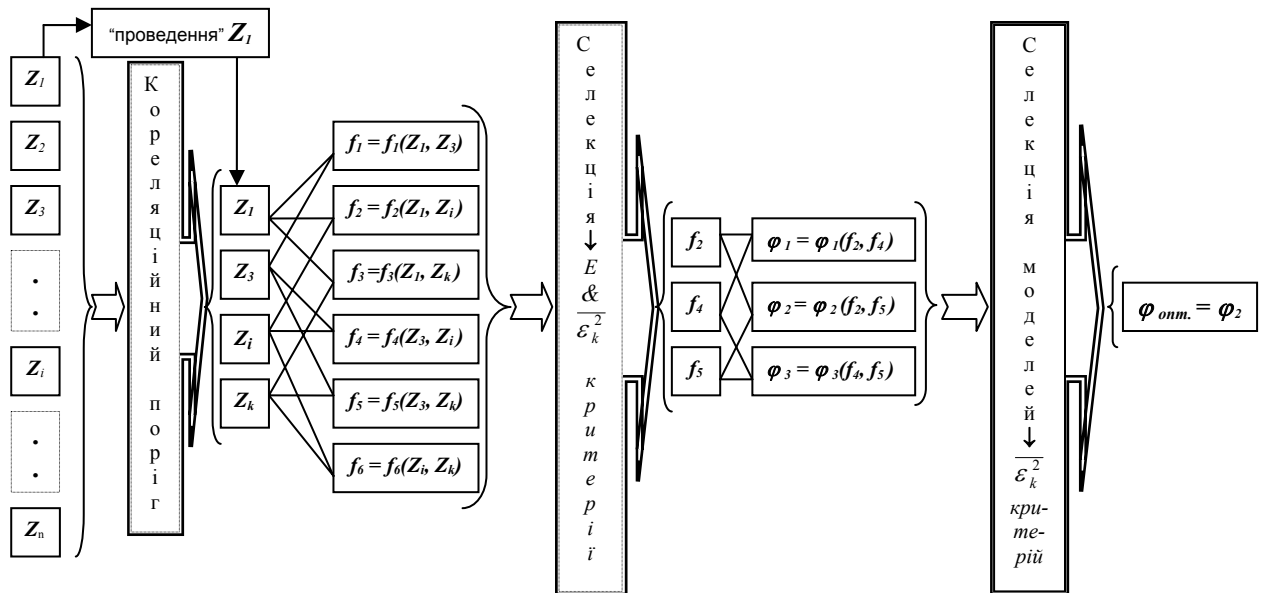


Рис. 1

В результаті досліджень встановлено, що цьому сприяє використання двох критеріїв для селекції моделей на рядах алгоритму побудови ПМ (8) (на рис. 1 моделями першого ряду є моделі $f_1 \div f_6$, а моделі наступного ряду – $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$): з використанням першого (“допоміжного”, назовемо його E -критерій) спочатку відбираються моделі, які не дали помилок на точках тестової вибірки, а потім вже серед них до наступного ряду відбираються моделі з найменшими значеннями критерію регулярності (12) – одного із хрестоматійних зовнішніх критеріїв у теорії самоорганізації моделей складних систем

$$\overline{\varepsilon_k^2} = \frac{1}{M_{\text{тест}}} \sum_{i=1}^{M_{\text{тест}}} (y_i - y_i^{(k)})^2, \quad (12)$$

де $\overline{\varepsilon_k^2}$ – середньоквадратична похибка, обчислена на $M_{\text{тест}}$ точках тестової вибірки даних (точках, які не використовувалися під час оцінювання коефіцієнтів поліному k -ї моделі); y_i – ознака режиму, заданого i -ю точкою вибірки даних під час її формування, з використанням якої встановлюється належність режиму ЕС до певного класу допустимості; $y_i^{(k)}$ – результат обчислення поліному k -ї моделі за інформацією i -ї точки тестової вибірки даних.

Експериментально встановлено, що застосування двох зазначених критеріїв для “проміжної” селекції моделей забезпечує більшу точність класифікації режимів ЕС побудованими ПМ. Процес селекції кращих моделей на кожному ряді алгоритму побудови ПМ (8) продовжується доти, доки зменшується значення критерію регулярності (11), тобто $\overline{\varepsilon_k^2} \rightarrow \min$.

Тут слід додатково пояснити, що під час формування вибірки даних першому елементу вектора ідентифікаторів C_i (9) i -ї точки вибірки присвоюється значення +1 ($y_i = +1$) або -1 ($y_i = -1$) – залежно від того, до якого із класів допустимості, що знаходяться по різні сторони гіперповерхні, належить режим ЕС, “представлений” вектором Z_i (9). Ідентифікатором такої гіперповерхні (точки на ній задовольняють умовам (6)–(7)) слугує значення четвертого елемента вектора C_i , що вказує на границю інтервалу, по різні сторони якої знаходяться різні класи допустимості. Результат обчислення поліному k -ї моделі за інформацією i -ї точки тестової вибірки даних $y_i^{(k)}$ набуває значень, відмінних від ± 1 , тому належність режиму ЕС до певного класу допустимості фактично визначається за

$sgn(y_i^{(k)})$. Отже, різні моделі можуть правильно визначати належність режиму ЕС до певного класу допустимості і одночасно характеризуватися різними значеннями критерію регулярності (12).

Щоб бути “працездатною”, ПМ повинна бути, насамперед, робастною. Виконані дослідження зі штучного “зашумлення” вибірок даних (використовувалися вибірки даних для перетинів ОЕС України “Захід-Вінниця” та “ЮУАЕС-Дніпро”) та побудови ПМ з використанням як критерію міні-

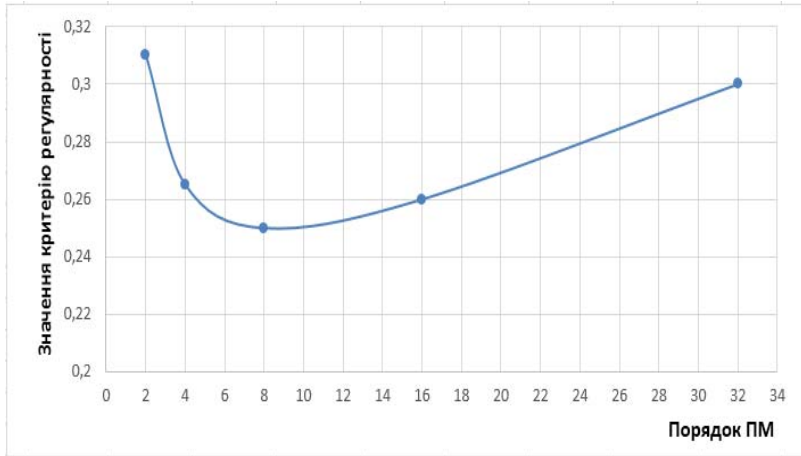


Рис. 2

муму зсуву (критерію несуперечності) [7], так і зазначених вище двох критеріїв ($\overline{\varepsilon_k^2}$ та E), дозволили встановити, що побудовані з використанням зазначених “зашумлених” тестових вибірок даних ПМ залишалися стійкими до відповідного (на рівні 2% шуму) викривлення вхідних даних.

Стійку залежність критерію регулярності від порядку ПМ показано на рис. 2, з якого видно, що мінімального значення критерій регулярності набуває у разі 8-го порядку ПМ, тобто порядок ПМ оптимальної складності дорівнює 8 (незалежно від того, “зашумлювалися” вибірки

даних чи ні).

Загальна характеристика програмного комплексу побудови ПМ. Враховуючи вимоги доступності, поширеності та швидкодії, для реалізації базового варіанту програмного комплексу побудови ПМ обрано платформу на базі комп’ютерної системи з процесорами серій x86/x64 та операційною системою Microsoft Windows (серверні або персональні версії Server 2003, XP або новіші). Програмний комплекс розроблено з використанням середовища Visual Studio, мови програмування C# та програмної платформи .NET Framework. Під час розробки використано об’єктно-орієнтований підхід та принцип розділення інтерфейсу користувача та функціонального коду. Структуру класів розробленого програмного комплексу показано на рис. 3. Клас GMDHObject є “розрахунковим ядром” і використовує низку інших службових класів: StaticMethods (клас-контейнер різних статичних службових функцій), Parallel (клас для реалізації паралельних обчислень на багатоядерних/багатопроесорних платформах), Matrix-

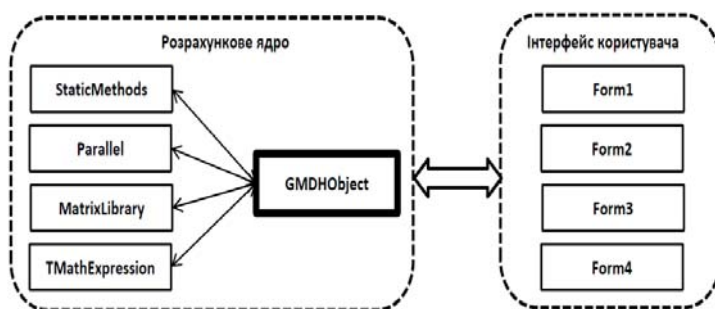


Рис. 3

Library (клас, що містить функції для роботи з матрицями), TMath-Expression (клас для обчислення виразів у вигляді рядкових змінних). Інтерфейс повністю відділений від “обчислювальної” частини комплексу і реалізується через діалогові вікна Form1-Form4 та відповідні класи, що містять функції обробки подій інтерфейсу.

Показники швидкодії розробленого комплексу – витрати часу на побудову ПМ ($T_{\text{поб.}}$) наведено нижче в таблиці.

Деякі особливості та алгоритми використання ПМ у режимі квазіреального часу. Дамо необхідні пояснення щодо процедури визначення класу допустимості завантаження контрольованого перетину ЕС з використанням ансамблю ПМ. Нехай під час формування вибірок даних передбачалися класи, зазначені в (5), тоді кожну із п’яти ПМ ансамблю (позначимо результати обчислення їхніх поліномів Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5) слід “орієнтувати” на відповідні границі інтервальних значень K_p^d : 0,2; 0,3; 0,4; 0,08; 0,05. Тоді визначення класу допустимості поточного завантаження контрольованого перетину ЕС (відповідно до значення K_p^d) може відбуватися, наприклад, за алгоритмом, що передбачає послідовне обчислення поліномів моделей та перевірку знаків одержаних результатів. Нижче на-

ведено у загальному вигляді “скелетний” варіант такого алгоритму, результатом реалізації якого є визначення коефіцієнта запасу з активної потужності (K_p^d) в контрольованому перетині (в результаті такого визначення індекс d набуває конкретного значення).

1. Початок (Вхід)
2. Якщо $Y_1 < 0$, то $K_p^d < 0,2$ і перехід до п. 6, інакше перехід до п. 3
3. Якщо $Y_2 < 0$, то $0,2 \leq K_p^1 < 0,3$ і перехід до п. 10, інакше перехід до п. 4
4. Якщо $Y_3 < 0$, то $0,3 \leq K_p^2 < 0,4$, перехід до п. 10, інакше перехід до п. 5
5. $K_p^3 \geq 0,4$, перехід до п. 10
6. Якщо $Y_4 < 0$, то $K_p^d < 0,08$ і перехід до п. 8, інакше перехід до п. 7
7. $0,08 \leq K_p^4 < 0,2$, перехід до п. 10
8. Якщо $Y_5 < 0$, то $K_p^6 < 0,05$, перехід до п. 10, інакше перехід до п. 9
9. $0,05 \leq K_p^5 < 0,08$
10. Кінець (Вихід)

Використання будь-якої із *моделей-дублерів* [3], яка дещо відрізнятиметься від найкращої (за критерієм регулярності) ПМ оптимальної складності значенням критерію регулярності та складом вектора вхідних змінних (X), відбувається за таким самим алгоритмом.

Реалізацію побудованих ПМ в режимі квазіреального часу передбачено на верхньому рівні *системи* проблемно-орієнтованого моніторингу ЕС (далі *системи*), нижній (об’єктний) рівень якої утворюють ЕВРП “Регіна-Ч”. Результатом зазначеної реалізації ПМ є уточнення поточної структури контрольованого перетину ЕС [5] (для чого використовується відповідний ансамбль ПМ), після чого (за допомогою іншого ансамблю ПМ) визначається допустимість завантаження контрольованого перетину ЕС. Очевидно, що використанню ПМ повинні передувати як оцінювання наявності поточної інформації, необхідної для обчислення поліномів моделей, так і попереднє “дообертання” вимірних ЕВРП “Регіна-Ч” векторів напруги та нормалізація змінних (10). Зазначене “дообертання” пов’язане з тим, що для формування вибірок даних розрахунки усталених режимів ЕС виконують з наявністю у розрахунковій схемі ЕС балансувального вузла (і він же опорний за напругою), по відношенню до вектора напруги якого визначаються кути векторів напруги усіх інших вузлів розрахункової схеми ЕС. Синхронізовані вимірювання векторів напруги відбуваються в іншій “системі координат”, тому для їхнього узгодження з розрахунковою моделлю ЕС (і побудованими ПМ) слід виконати відповідну процедуру “дообертання” векторів напруги з попереднім “призначенням” одного із об’єктів, де встановлено ЕВРП “Регіна-Ч”, “опорним за кутом вектора напруги” (пояснення такої процедури коротко дано в пункті 11 наведеного нижче алгоритму). Передбачається, що керування функціонуванням програмних засобів *системи* здійснює керуюча програма (супервайзер) *системи*.

Алгоритм використання ПМ в режимі квазіреального часу у складі *системи* викладено у спрощеному вигляді на вербальному рівні (пояснень щодо допоміжних векторів-ідентифікаторів не наводимо, оскільки їхнє призначення зрозуміло з контексту). Передбачено випадки втрати оглядовості об’єктів, що призводитимуть до втрати (відсутності) інформації, необхідної для використання як основних моделей (кращих), так і моделей-дублерів. Окремі пояснення дано курсивом безпосередньо в пунктах алгоритму. Великими літерами наведено повідомлення, які видаються *системою* для персоналу.

Алгоритм використання ПМ в режимі квазіреального часу у складі *системи*

1. Початок (Вхід)
2. Виконується аналіз повноти отриманої від ЕВРП “Регіна-Ч” інформації (*аналіз оглядовості об’єктів ЕВРП “Регіна-Ч”*) та формується вектор ідентифікаторів “оглядових об’єктів”.
3. Використовуючи вектор ідентифікаторів “оглядових об’єктів”, виконується аналіз оглядовості стану електричних приєднань, що впливають на визначення запасу з активної потужності в контрольованому перетині (*перелік таких електричних приєднань відомий, він попередньо задається у вигляді вектора ідентифікаторів таких приєднань*).

4. Чи забезпечена оглядовість стану електричних приєднань, що впливають на визначення запасу з активної потужності в контрольованому перетині ?

ТАК → *перехід до п. 5,* **НІ** → *перехід до п. 18*

5. Серед оглядових електричних приєднань є відключені?

ТАК → *перехід до п. 6,* **НІ** → *перехід до п. 7.*

6. Використовуючи інформацію про склад відключених електричних приєднань, визначається склад попередньо відібраних ПМ і формується вектор ідентифікаторів “попередньо відібраних ПМ”, які використовуються за поточного складу відключених електричних приєднань, що впливають на визначення запасу з активної потужності в контрольованому перетині.

Перехід до п. 8.

7. Визначається склад попередньо відбираємих ПМ і формується вектор ідентифікаторів “попередньо відбираємих ПМ”, що використовуються за ввімкненого стану усіх електричних приєднань, які впливають на визначення запасу з активної потужності в контрольованому перетині.

8. Використовуючи вектор ідентифікаторів “попередньо відбираємих ПМ” (*містить інформацію про склад попередньо відбираємих ПМ*) та вектор ідентифікаторів “оглядових об'єктів” (*містить інформацію про склад оглядових об'єктів*), визначається склад відібраних ПМ та формується вектор ідентифікаторів “відібраних ПМ”.

9. Чи сформовано вектор ідентифікаторів “відібраних ПМ”?

ТАК → *перехід до п. 10,* **НІ** → *перехід до п. 16.*

10. Формування векторів вхідних змінних (модулів та кутів векторів напруги) для кожної відібраної ПМ.

11. “Дообертання” векторів напруги: із усіх значень кутів векторів напруги, що використовуються у відібраних (активованих) ПМ, віднімається значення кута вектора напруги об'єкта, “опорного за кутом вектора напруги” (*таким об'єктом априорі “призначається” один із об'єктів енергосистеми, забезпечення оглядовості якого характеризується найвищою надійністю*).

12. Для кожної відібраної ПМ перевіряється відповідність поточних значень кожного i -го режимного параметра, який використовується як вхідна змінна (x_i) моделі, його “граничним” значенням ($x_{i \min}$ та $x_{i \max}$), визначеним на вибірці даних, з використанням якої побудовано відповідну ПМ: **Поточні значення режимних параметрів (модулів та кутів векторів напруги) знаходяться в межах, визначених вибірками даних?**

ТАК → *перехід до п. 13,* **НІ** → *перехід до п. 19.*

13. Нормалізація вхідних змінних для кожної із відібраних ПМ.

14. Обчислення поліномів відібраних ПМ.

15. Інтерпретація результатів обчислень, їхнє збереження та надання диспетчерському персоналу (оператору) інформації щодо значення коефіцієнту запасу з активної потужності у контрольованому перетині енергосистеми.

Перехід до п. 2 (для обробки чергової “порції” інформації, що надійшла від ЕВРП “Регіна-Ч”).

16. Видача повідомлення диспетчерському персоналу: “**ВІДСУТНЯ ІНФОРМАЦІЯ, НЕОБХІДНА ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЕЙ, ОСКІЛЬКИ НЕ ЗАБЕЗПЕЧУЄТЬСЯ ОГЛЯДОВІСТЬ ОБ'ЄКТІВ**” із зазначенням диспетчерських найменувань об'єктів.

17. Підготовка відповідної інформації для супервайзера системи про причину завершення виконання алгоритму.

Перехід до п. 20.

18. Видача повідомлення диспетчерському персоналу “**ВІДСУТНЯ ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАН ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРИЄДНАНЬ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ВИЗНАЧЕННЯ ЗАПАСУ З АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В КОНТРОЛЬОВАНОМУ ПЕРЕТИНІ**” та переліку диспетчерських найменувань відповідних електричних приєднань.

Перехід до п. 17.

19. Формування списку режимних параметрів, значення яких вийшли за межі, передбачені вибірками даних для побудови моделей, та відповідних “граничних” значень режимних параметрів ($x_{i \min}$ та $x_{i \max}$). Видача повідомлення “**ВИЯВЛЕНО ЗНАЧЕННЯ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ, ЯКІ НЕ УЗГОДЖУЮТЬСЯ ЗІ ЗНАЧЕННЯМИ ВИБІРОК ДАНИХ, ЩО ВИКОРИСТОВУВАЛИСЯ ДЛЯ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ**” (значення виходять за передбачені вибірками даних “межі”) та переліку відповідних найменувань і значень режимних параметрів, а також “граничних” значень цих параметрів ($x_{i \min}$ та $x_{i \max}$).

Видача повідомлення: “**ПЕРЕКОНАТИСЯ В ДОСТОВІРНОСТІ ЗНАЧЕНЬ ЗАЗНАЧЕНИХ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ПЕРЕВІРИТИ ЇХНЮ ВІДПОВІДНІСТЬ ВИБІРКАМ ДАНИХ, МОЖЛИВО, ОСТАННІ ПОТРЕБУЮТЬ ОНОВЛЕННЯ**”.

Підготовка інформації для супервайзера системи про причину завершення виконання алгоритму.
20. Кінець (Вихід).

Оцінки витрат часу на побудову ПМ ($T_{поб.}$) та на обчислення відповідних ПМ 8-го порядку ($T_{обч.}$) в режимі інтерпретації із визначенням коефіцієнту запасу з активної потужності в перетині ЕС наведено в таблиці. Зазначені оцінки одержано під час побудови ПМ для контрольованого перетину ОЕС України “Захід-Вінниця”, кількість елементів у векторі вибірки становила 42.

Очевидно, що у разі попереднього подання ПМ у вигляді машинного коду час обчислення ПМ буде значно меншим, хоча і наведені оцінки свідчать про можливість практичного використання ПМ у режимі реального (квазіреального) часу. Надійність класифікації режимів ЕС побудованими ПМ перевірено на тестовій 6-машинній моделі ЕС та на моделі ОЕС України (для контрольованих перетинів “Захід-Вінниця” та “ЮУАЕС-Дніпро”).

Характеристика персонального комп'ютера	$T_{поб.}$, хв.	$T_{обч.}$, с.
AMD Athlon Neo X2 L325 1.5 GHz, 3 Gb DDR-2 800, Win 7 32-bit	48,0	2,50
Intel Core Duo T2600 2.3 GHz, 2 Gb DDR-2 667, Win XP 32-bit	24,0	1,20
Intel Core i5 2.27 GHz, 3 Gb DDR-3 1333, Win-7 64-bit	14,0	0,68
Intel Core 2 Quad 2.33 GHz, 4 Gb DDR-2 800, Win 7 32-bit	17,0	0,80
Intel Core i7 2,66 2.66 GHz, 4 Gb DDR-3 1333, Win 7 64-bit	10,50	0,51
Intel Core i7 x6 4.1 GHz, 8 Gb DDR-3, Win-7 64-bit	5,16	0,27

Використання в режимі реального (квазіреального) часу ансамблів ПМ та результатів синхронізованих вимірювань векторів напруги на попередньо визначених об'єктах ЕС поряд із “традиційним” підходом дозволить підвищити надійність моніторингу допустимості режимів ЕС за запасами статичної стійкості (запасами з активної потужності у контрольованих перетинах ЕС).

1. Буткевич О.Ф., Зорін М.С. Деякі аспекти інтеграції ОЕС України в об'єднання енергосистем європейських країн // Техн. електродинаміка. Тем. випуск „Силова електроніка та енергоефективність”. – 2006. – Ч.1. – С. 73–78.
2. Буткевич О.Ф. Проблемно-орієнтований моніторинг режимів ОЕС України // Технічна електродинаміка. – 2007. – №5. – С. 39–52.
3. Буткевич О.Ф., Левколюк А.В., Зорін Є.В., Буланая В.С. Про використання синхронізованих вимірів кутів векторів напруги з об'єктів ОЕС України при визначенні допустимості її поточних режимів за запасами статичної стійкості // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 51–58.
4. Буткевич О.Ф., Левколюк А.В., Рибіна О.Б. Моніторинг запасів статичної стійкості енергосистеми на базі вимірів векторів напруги // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 23–24.
5. Буткевич О.Ф., Левколюк А.В. Оперативне визначення структури перетинів енергосистеми з використанням поліноміальних моделей та результатів синхронізованих вимірювань векторів напруги // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Зб. наук. праць. – 2013. – Вип. 36. – С. 25–31.
6. Горбань А.Н. Обобщенная аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей // Сибирский журнал вычислительной математики. – 1998. – Т. 1. – № 1. – С. 12–24.
7. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. – К.: Наук. думка, 1982. – 296 с.
8. ГОСТ 21027-75 “Системы энергетические. Термины и определения”. – Дата издания: 01.04.2005.
9. СОУ – Н МЕВ 40.1 – 00100227 – 68:2012 “Стійкість енергосистем. Керівні вказівки”. – Київ: ГРІФРЕ, 2012. – 35 с.
10. Cover T.M. Geometrical and statistical properties of system of linear inequalities with applications in pattern recognition // IEEE Transaction on Electronic Computers. – 1965. – Vol. EC-14. – Pp. 326–334.
11. Stone M.H. The generalized Weierstrass approximation theorem // Mathematics Magazine. – 1948. – Vol. 21. – No 4, Mar.-Apr. – Pp. 167–184, 237–254.

Изложены основные положения нового подхода к определению в реальном времени допустимости загрузки контролируемых сечений энергосистемы по запасам статической устойчивости. Указанный подход основывается на моделях, построенных с использованием метода группового учета аргументов (МГУА), и результатах синхронизированных измерений векторов напряжения на определенных объектах энергосистемы. Рассмотрены особенности формирования выборок данных, критерии и алгоритмы построения и использования моделей. Дана общая характеристика разработанного программного комплекса построения моделей, а также указано время, требуемое для построения и вычисления полиномиальных моделей в зависимости от характеристик используемых компьютеров. Библ. 11, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: мониторинг, энергосистема, запас статической устойчивости, векторные измерения напряжения, модель.

INCREASING RELIABILITY OF MONITORING OF ACCEPTABILITY OF LOADING OF POWER SYSTEM'S CONTROLLED CUTSETS

O.F.Butkevych¹, A.V.Levkonyuk¹, O.I.Stasiuk²¹ – Institute of Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine,

² – State Economic and Technological University of Transport,

str. Lukashevicha, 19, Kyiv, 03049, Ukraine,

e-mail:butkevych@ied.org.ua

The basic regulations of the new approach to determine in real-time acceptability of loading of power system's controlled cutsets in depending on steady-state stability margins are presented. Mentioned approach is based on the models constructed using the group method of data handling (GMDH) and the results of synchronized measurements of voltage phasors of certain objects of power system. The features of the formation of data samples, criteria and algorithms of models' construction and application are considered. The general characteristic of the developed software for construction of models is presented, and time required for construction and computation of polynomial models in depending on the characteristics of the used computers is also presented. References 11, table 1, figures 3.

Key words: monitoring, cutset of power system, steady-state stability margin, voltage phasors' measurements, polynomial model, GMDH.

1. Butkevych O.F., Zorin M.E. Some aspects of integration of IPS of Ukraine in European association of power systems // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist". – 2006. – Vol.1. – Pp. 73–78. (Ukr)
2. Butkevych O.F. Problem-oriented monitoring of Ukrainian IPS's conditions // Tekhnichna elektrodynamika. – 2007. – No 5. – Pp. 39–52. (Ukr)
3. Butkevych O.F., Levkonyuk A.V., Zorin E.V., Bulanaya V.S. About the use of synchronized measurements of voltage phasors' angels from the objects of IPS of Ukraine in the time of determination of acceptability of current IPS's operational conditions in depending on steady-state stability margins // Tekhnichna elektrodynamika. – 2010. – No 6. – Pp. 51–58. (Ukr.)
4. Butkevych O.F., Levkonyuk A.V., Rybina O.B. Power system steady-state stability margins' monitoring based on voltage phasors' measurements // Tekhnichna elektrodynamika. – 2012. – No 2. – Pp. 23–24. (Ukr)
5. Butkevych O.F., Levkonyuk A.V. The prompt structure identification of power systems' cutsets by using polynomial models and the results of synchronized measuring of voltage phasors // Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2013. – Vol. 36. – Pp. 25–31. (Ukr)
6. Gorban A.N. Generalized approximation theorem and the computational capabilities of neural networks // Sibirskii Zhurnal Vychislitelnoi Matematiki. – 1998. – Vol. 1. – No 1. – Pp. 12–24. (Rus)
7. Standard 21027-75 "Power systems. Terms and definitions". – Date of publication: 01.04.2005. (Rus)
8. Ivakhnenko A.G. Inductive method of self-organizing models of complex systems. – Kyiv: Naukova dumka, 1982. – 296 p. (Rus)
9. Regulatory Document of Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine: COY – H MEB 40.1 – 00100227 – 68 : 2012 "Stability of power systems. Guidelines". – Kyiv: GRIFRE, 2012. – 35 p. (Ukr)
10. Cover T.M. Geometrical and statistical properties of system of linear inequalities with applications in pattern recognition // IEEE Transaction on Electronic Computers. – 1965. – Vol. EC-14. – Pp. 326–334.
11. Stone M.H. The generalized Weierstrass approximation theorem // Mathematics Magazine. – 1948. – Vol. 21. – No 4, Mar.-Apr. – Pp. 167–184, 237–254.

Надійшла 27.05.2013

Остаточний варіант 24.10.2013