

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І МОНІТОРИНГУ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

І.В. Волков, чл.-кор. НАН України, **С.В. Подольний**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Розглянуто основні положення створення й імплементації спеціалізованого програмного комплексу, розробленого у відділі систем стабілізованого струму Інституту електродинаміки НАН України для моделювання та моніторингу спеціалізованих нелінійних електричних систем. Бібл. 5, рис. 7.

Ключові слова: моделювання, нелінійні електричні кола, синтетичні схеми, адаптивна топологія, *Cloud*-орієнтовані алгоритми.

Створення спеціалізованого програмного забезпечення є комплексною задачею, що включає в себе різноманітні, часто міждисциплінарні, елементи та методи роботи з ними. До таких основних елементів можна віднести: математичні моделі, топологічні методи побудови й аналізу мережевих графів, способи розв'язання рівнянь чисельними методами у часовій і частотній областях, дискретно-неперервні оптимізаційні задачі, стійкість чисельних методів, методики представлення і аналізу великого обсягу отриманої інформації, розробку адекватного інтерфейсу, програмно-апаратне розподілення розрахункового навантаження, програмну гнучкість (можливість простим і прозорим шляхом розширити функціональність пакета), інтеграцію з *Cloud computing* [5] (технології “хмарних” розрахунків), елементи теорії розпізнавання образів і прогнозування, створення набору спеціалізованих функцій для автоматизації деяких типових інженерних задач. Зазначені елементи можна віднести до трьох основних категорій: математичні, програмно-апаратні та мережеві.

У загальному випадку відправною точкою для вибору коректних макромоделей і розрахункових методів є аналіз типових спеціалізованих програмних рішень, особливостей електроенергетичних систем, сучасних програмно-апаратних і мережевих методів. Такий підхід дає змогу формалізувати задачу саме з урахуванням спеціалізації електричної системи, що моделюється.

Вимоги до побудови спеціалізованого програмного забезпечення. Розглянемо рекомендації, які з'явилися як результат практичної інженерної діяльності за тривалий проміжок часу [4] для задач спектрального аналізу і оцінки якості електроенергії морських/прибережних електроенергетичних систем (кораблі, судна, нафтові та газові шельфові платформи, порти, морські бази). Потужність таких систем сягає десятків мегават, вони мають у своєму складі сотні різних типів електрообладнання переважно з нелінійними характеристиками та різкозмінними навантаженнями, що потребує високих вимог до якості електроенергії, серед показників якої особливе місце займають спектральний склад струмів і напруг на шинах низького, середнього та високого рівнів.

У світі існують різні доступні програмні рішення, які можна використовувати для оцінки спектральних характеристик. Часто оцінка якості електроенергії є лише невеликою частиною можливостей цих програмних пакетів. У деяких випадках виробники апаратних засобів подолання гармонік (у першу чергу фільтрів) представляють власне програмне забезпечення, але майже завжди вони надають можливість отримати “грубу оцінку” порівняно з реальними системами. З іншого боку, існують програмні рішення з ширшими можливостями, але зі слабкою базою необхідних елементів.

Програмне забезпечення для спектрального аналізу згаданих систем повинно мати наступні базові риси:

- можливість працювати з великою кількістю вузлів для аналізу як простих, так і складних електричних схем;
- адекватність результатів аналізу за гармонічним складом струмів і напруг для різного типу нелінійних навантажень;
- можливість аналізувати системи з незбалансованою напругою по фазах і з початковим гармонічним спотворенням;
- коректність результатів відносно послідовностей гармонік: прямої, зворотної та нульової;
- здатність частотного аналізу з малим кроком для побудови частотних характеристик і пошуку можливих резонансних точок у системі;
- мати вичерпну бібліотеку моделей нелінійних навантажень: ШІМ-перетворювачі (шести-, 12-, 18- та 24-пульсні), двигуни постійного струму, інвертори, що комутуються навантаженням, різні чотирипровідні системи тощо;
- в якості окремих компонентів мають бути присутні всі відомі засоби покращення гармонічного стану електричної системи. До них входять: *LC*-фільтри, фазокомпенсуючі пристрої, широкосмугові фільтри (лінеатори), активні фільтри, *AFE*-перетворювачі (послідовні активні фільтри з компенсацією реактивної потужності за схемою *AC-DC-AC*) тощо;
- програмне забезпечення має надавати можливість аналізувати спектральний склад напруг і струмів у всіх вузлах системи, принаймні, до 50-ї гармоніки;
- автоматичний перерахунок всіх кутів гармонік при зміні кута базової частоти;
- наявність різного типу трансформаторів, акумуляторів і генераторів (з паралельними еквівалентами включно);
- включати модуль генерації звітів згідно з галузевими стандартами оцінки якості електричної енергії.

Аналіз відомих програмних варіантів, наприклад: *Simaris Design (Siemens)*, *MyEcodial (Schneider Electric)*, *ERACS (ERA Technology)*, *EROS (ІЕД НАНУ)*, *MatLab (MathWorks)* та інших, показав недостатню їх орієнтованість під зазначені задачі. Наприклад, всупереч значним аналітичним можливостям *Simulink* слабо пристосований для ролі інструменту аналізу якісних показників вказаних електричних систем: можливість роботи з однолінійними моделями лише після тривалого доопрацювання власних бібліотечних компонентів, проблематичність створення моделей з міжланковими взаємоіндуктивними зв'язками, користувач повинен мати досвід у використанні коректних числових методів інтегрування диференціальних рівнянь стану і вміння аналізувати параметри стійкості системи, що моделюється, та інше.

Програмний комплекс, що розробляється у відділі систем стабілізованого струму, має забезпечити всі згадані вище можливості спектрального аналізу спеціалізованих електричних систем, а також (додатково) моніторинг цих систем у реальному часі розробленими програмними і апаратними засобами.

Концептуальна структура. Програмний комплекс базується на ряді міждисциплінарних знань, з котрих виділимо три основні категорії: математичні, програмно-апаратні та мережеві (рис. 1).

Математична частина включає в себе кілька розрахункових модулів, оптимізованих під різні розрахункові задачі. Крім цього, включаються математичні модулі для матричних розрахунків загального і спеціального типів, операції над комплексними числами, частотних інтегральних перетворень, методи діакоптики, методи числової оптимізації, елементи діагностики тощо.

Програмно-апаратна частина об'єднує питання розробки *GUI*-інтерфейсу (*Graphical user interface*), програмних класів на основі методів об'єктно-орієнтованого програмування, способів представлення графічної і текстової інформації, генерації звітів, топологічних алгоритмів аналізу однолінійних і повних електричних схем, набору супровідних інструментів редагування і типових функцій користувача, взаємодії математичної та *GUI*-частини і ряд інших задач.

Програмні компоненти



Рис. 1

У структурі комплексу, що розробляється, застосовуються принципи *Cloud computing*, які є узагальнюючим поняттям для різного роду мережевих технологій, таких як мережево-розподілені обчислення, сервіси і програми з постійним мережевим обміном даними, розподілені бази даних та інше [5].

Основні топологічні аспекти. Варіант *GUI*-інтерфейсу з можливістю довільного створення топологічної структури є найбільш прийнятним для охоплення різноманітних електротехнічних конфігурацій спеціалізованих систем. На основі довільної топології завжди можна побудувати типові схемні рішення. Орієнтиром можуть служити чисельні програми класу *CAD* (*Computer-aided design*), або системи автоматизованого проектування. Традиційно електричні схеми представляються як сукупність елементів і їх зв'язків на площині, але сучасні комп'ютерні системи дають змогу нормально працювати і з їх просторовими (тривимірними) моделями. В задачах побудови і аналізу електричних систем перший варіант є ефективнішим і легшим для візуального сприйняття. Другий варіант може бути корисним для задач моніторингу існуючих систем. Наприклад, як елемент спеціалізованої *Grid*-системи моніторингу, проведення інспекцій обладнання, тренінгів тощо.

Програмне забезпечення включає в себе як традиційні абстрактні елементи *GUI*-інтерфейсу, спроектовані й адаптовані під наші потреби, так і спеціально створені графічні, алгоритмічні та математичні складові.

Із традиційних абстрактних елементів двовимірних *CAD*-систем, у плані створення заданої топології, котрі необхідно включити до складу *GUI*, можна віднести:

- віртуальне робоче поле;
- набори базових спеціалізованих елементів (генератори, трансформатори, двигуни, тощо у випадку електричних мереж);
- набори інструментів створення зв'язків;
- набори інструментів редагування;
- основні інструменти аналізу і перевірки помилок;
- спеціалізовані (додаткові) інструменти, наприклад подібно до різноманітно-орієнтованих модулів *MatLab*.

Програмні топологічні інструменти



Рис. 2

З точки зору математичного забезпечення для зазначених елементів у першу чергу необхідно включити елементи теорії множин і теорію графів, з подальшою алгоритмічною адаптацією необхідних складових. Концептуально це можна представити діаграмою, показаною на рис. 2. Програмні класи згідно з принципами об'єктно-орієнтованого програмування (ООП) дають змогу на абстрактному рівні зв'язувати

об'єкти різної технічної і нетехнічної природи у межах однієї множини, але з варіацією властивостей і методів цих класів. Тобто в загальному випадку існує деяка зліченна множина, яка об'єднує всі електричні та неелектричні підмножини.

Іншим аспектом використання теорії множин у програмному середовищі є їх дворівневе розподілення. Першим рівнем є повністю абстрактна множина вхідних елементів, таких як бібліотеки генераторів, фільтрів, навантажень, текстових або мультимедійних коментарів тощо. Ця множина об'єднує набір всіх можливих компонентів для створення і редагування системи, що досліджується. Другим рівнем і окремою множиною відповідно описуються всі елементи робочого поля. На їх основі виконуються топологічний аналіз, перевірка коректності, генерація документації, генерація підмножин тощо.

Програмні методи класів і спеціалізовані процедури у цьому комплексі включають реалізацію всіх необхідних алгоритмів для забезпечення зазначених функцій. Частина з них формує топологічні підмножини для подальшого аналізу електричних схем у вигляді графів.

Адаптивна матриця інцидентності. Як правило, для отримання топологічного графа використовуються однорідні елементи, однакові за кількістю вхідних та вихідних сигналів. У такому випадку задача побудови топологічного графа зводиться до зручної нумерації вершин та ребер графа, зручного для певного математичного методу, приклади яких були наведені вище.

Зазначена ситуація суттєво ускладниться при аналізі систем змішаного типу. Такі системи будуть мати в множині елементів складові з різнорідною структурою. У цьому випадку під різнорідною структурою маються на увазі трифазні три-/чотирипровідні елементи, елементи постійного струму, елементи з наперед невизначеним станом. Комбінація елементів у цих множинах може бути довільною. Під елементами з наперед невизначеним станом маються на увазі такі складові системи, які можуть наслідувати топологічні властивості елементів з визначеною структурою. Наприклад, з'єднувальна лінія може бути дво-/три-/чотирипровідною, що не визначено одразу (на загальному рівні), а уточнюється шляхом аналізу пов'язаних з нею елементів на подальших етапах. Такий підхід має ряд переваг. По-перше, можна визначити ряд критеріїв фільтрації для вибірки з бази даних бібліотечних елементів. По-друге, використовувати різний ступінь деталізації схем заміщення.

Метод побудови топологічної матриці має задовольняти двом основним вимогам: можливості перевіряти допустимість комбінацій з'єднання елементів у межах одного сегмента мережі; сортувати всі елементи сегмента у межах одного кластера топологічної матриці.

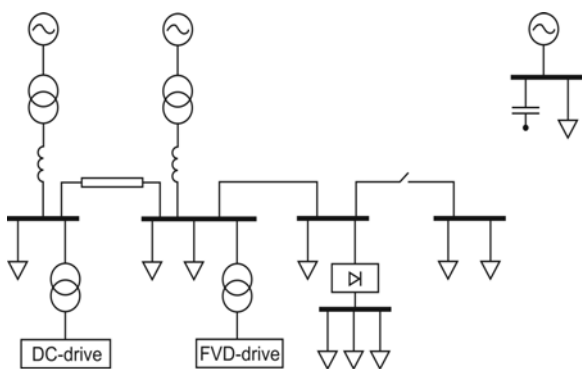


Рис. 3

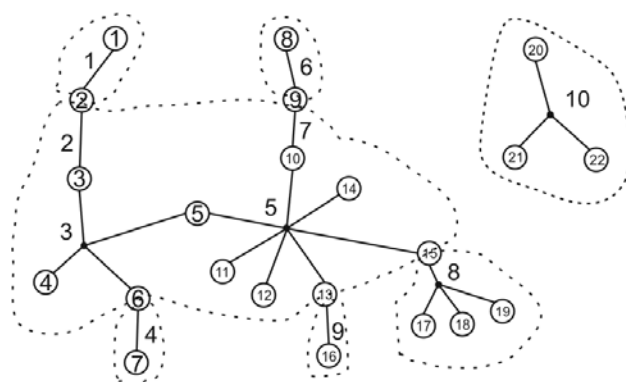


Рис. 4

Розглянемо спосіб формування топологічної матриці спеціальної структури на прикладі рис. 3. Генератори, трансформатори, випрямляч, двигун постійного струму і частотно-керований перетворювач є сегментоутворюючими елементами. Лінійні навантаження, реактори, кабельні лінії, конденсатори є елементами з наперед невизначеною структурою.

Першою стадією є автоматичне формування трьох множин: множина елементів $\{E\}$, множина ліній нульового опору (ідеальних провідників) $\{L\}$ та шин $\{B\}$. Такий підхід дає змогу використовувати однолінійне представлення електричних схем з різнорідною топологічною структурою. В якості прикладу для схеми на рис. 3 сформуємо допоміжну матрицю з

структурою, наведеною в таблиці. На рис. 4 представлено пронумерований і розбитий на зони граф однолінійної схеми, зображеної на рис. 3.

N_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_i	{1,2}	{2,3}	{3,4,5,6}	{6,7}	{5,10,11,12,13,14}	{8,9}	{9,10}	{15,17,18,19}	{13,16}	{20,21,22}
Seg	1	2	2	3	2	4	2	5	6	7
Dim	4W	3W	3W	3W	3W	3W	3W	2W	3W	4W

Формування матриці проходить у кілька етапів. За допомогою процедур рекурсивного аналізу або їх альтернатив знаходять елементи, не з'єднані з жодним із генераторів. Такі елементи виключаються з подальшого аналізу. Це дає змогу аналізувати схеми з перемикачами, а саме у ситуаціях, коли частина навантаження відключена, що часто зустрічається в реальних схемах як окремий випадок робочого режиму.

За допомогою відповідних програмних класів $\forall Li \in \{L\}, \forall Vi \in \{B\}$ знаходять множину структур з мінімальними з'єднаннями ($\{C\}$), тобто такі мінімальні кількості вузлів, кожен з яких принаймні є точкою з'єднання двох елементів. Далі визначається топологічна розмірність наперед невизначених елементів. На цьому етапі перевіряється коректність з'єднань топологічно-утворюючих компонентів. Якщо відсутні неправильні з'єднання, відбувається сегментація мережі на чотири-/три-/двопровідні (рис. 4). Властивості елементів з наперед невизначеною структурою наслідуються з даних сегментів.

Якщо в GUI представлено більше однієї схеми або присутні трансформатори (з гальванічно незв'язними обмотками), структура похідної матриці інцидентності набуває кластерних властивостей, що надає ряд переваг з точки зору оптимізації в чисельних методах. Але для цього необхідна правильна нумерація вершин та ребер топологічного графа.

На рис. 5 показано фрагмент із схемами змішаного типу, де 3W – трипровідні мережі; 4W – чотирипровідні.

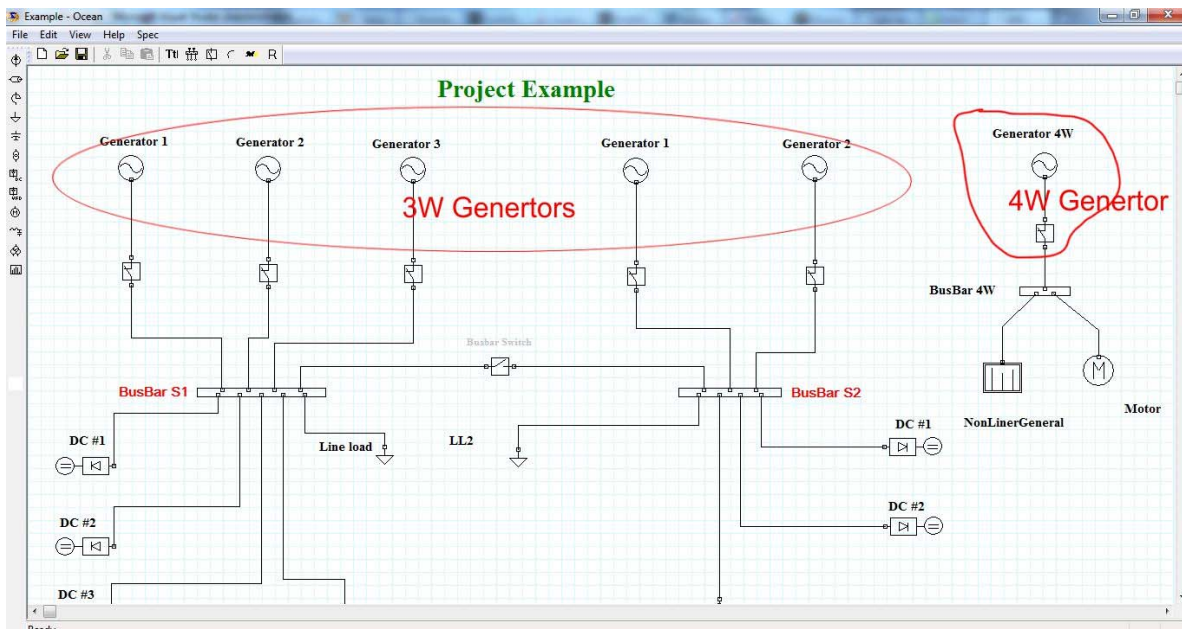


Рис. 5

Основні математичні аспекти розрахункового ядра. Найбільш загальним методом розрахунку процесів у лінійній частині електричних кіл у часовій області та орієнтований на використання обчислювальної техніки є метод змінних стану [3]. У випадку нелінійних кіл він об'єднується з методами розв'язання нелінійних рівнянь відносно його вхідних і вихідних матриць. Але його пряме використання не завжди є оптимальним, тому в якості основного використано похідний від цього методу – метод синтетичних схем [1].

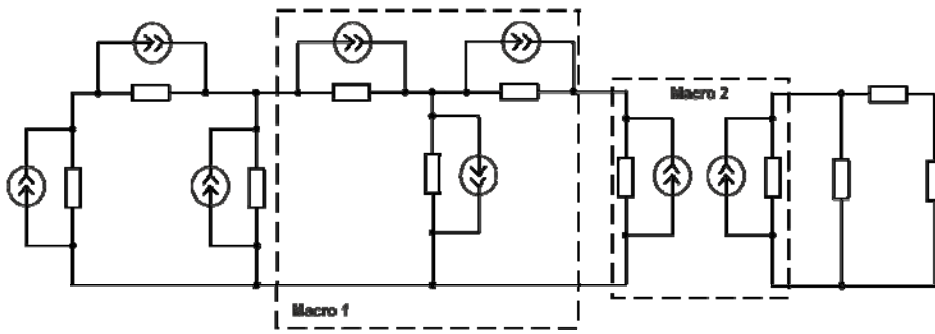


Рис. 6

Значною перевагою методу синтетичних схем є відсутність необхідності мінімізації кількості змінних, що недопустимо при використанні методу змінних стану. Топологічні матриці можна використовувати при довільному ступені де-

талізації схем заміщення електричних елементів.

При аналізі лінійних схем важливою особливістю методу є незмінність у процесі розрахунку матриці опорів/провідностей системи різницевих рівнянь при постійному кроці інтегрування. Ця обставина дає змогу значно прискорити процес розрахунку. Якщо схема нелінійна, то на кожному кроці інтегрування необхідно змінювати складові матриці провідностей, оскільки будуть змінюватися динамічні опори нелінійних елементів. Тобто метод є коректним для нелінійних схем внаслідок їх лінеаризації на кожному кроці моделювання. Ефективність розрахунку перехідних процесів цим методом можна підвищити за рахунок зменшення порядку системи рівнянь, складеної за методом вузлових напруг для синтетичної схеми всього кола. Це досягається побудовою синтетичної схеми ділянки кола, що містить кілька елементів. Еквівалентні дво- або багатополюсні моделі параметрів такої синтетичної схеми називають макромоделями методу синтетичних схем.

У рамках макромоделі ділянки кола, що містить кілька елементів, виділяють макромоделі вищого і нижчого рівнів. Макромодель вищого рівня являє собою еквівалентний дво- або багатополюсник для ділянки кола без визначення струмів і напруг у кожному елементі моделі. Макромодель нижчого рівня дає змогу знаходити всі струми і напруги в повній ("розгорнутій") схемі заміщення. На рис. 6 показано приклад схеми заміщення деякої синтетичної схеми з еквівалентними дво- та багатополюсними елементами. Наприклад, макромодель чотириполюсника *Macro 1* може бути як нижчого, так і вищого рівнів. Макромоделлю вищого рівня *Macro 1* буде у випадку, коли Т-подібна схема у спрощеному виді узагальнює топологічно складнішу схему, в протилежному випадку вона буде макромоделлю нижчого рівня.

Використання моделей елементів різних рівнів дає змогу в деяких випадках оптимізувати процеси моделювання, а в інших – виконувати більш детальний аналіз в електричних елементах схем.

Діакоптичні розрахункові алгоритми. Суть діакоптики [2] полягає в можливості розділення електричного кола на окремі частини, аналізу кожної з окремих частин окремо одну від одної і за допомогою певних правил об'єднання і розрахунку початкової схеми.

Методи діакоптики включають три групи. До першої групи належать методи, які застосовуються до математичної моделі кола у вигляді вибраної системи рівнянь. Методи другої групи працюють безпосередньо зі схемою. Третя група є комбінацією перших двох підходів. У цьому випадку доцільніше використовувати третій підхід, оскільки перші два фактично є граничними випадками такого підходу.

Для реалізації діакоптичних принципів розрахунку великих схем програмні класи повинні включати такі основні чотири групи алгоритмів: 1) розбиття схеми на підсхеми; 2) розрахунок ізольованих підсхем; 3) розрахунок сумарної схеми; 4) врахування з'єднання підсхем.

Не вдаючись до деталей методу, зазначимо, що в кінцевому варіанті розрахункові алгоритми нелінійних кіл змішаного типу з використанням діакоптичних підходів у межах чотирьох основних груп мають включати такі елементи:

- критерії вибору місць розбиття схем на підсхеми як на однолінійних макромоделях, так і на їх повних схемах заміщення;
- стандартизовані бібліотечні перетворення субматриць головної топологічної матриці, що тотожно виділенню підсхем, у еквівалентні багатополіусники;
- стандартизовані перетворення систем рівнянь стану в їх еквіваленті електричні представлення;
- алгоритм узгодження методу синтетичних схем з діакоптичним підходом;
- алгоритм оцінки стійкості ітераційного рішення;
- алгоритми прискореного знаходження сталого режиму електричних систем;
- алгоритми спеціального призначення при функціонуванні програми в якості окремого елемента *GRID*-системи або *Cloud*-розрахунків.

Елементи *Cloud*-розрахунків. Разом з розробкою вказаного програмного забезпечення було створено систему (попередня робоча назва – *PQGuard*) для моніторингу параметрів електричної енергії в реальному часі, інформація про які доступна через локальну або глобальну мережу (рис. 7).

Система моніторингу *PQGuard* використовує вимірювальний німецький пристрій *Janitza UMG605* з вмонтованим внутрішнім сервером. Тестова версія *PQGuard* встановлена на одному з живлячих трансформаторів Інституту електродинаміки НАН України 6/0,4 кВ потужністю 1 МВА і доступна за адресою <http://193.110.163.126>.

Система забезпечує широкий набір даних у текстовому і графічному представленнях як у реальному часі (напруги, струми, потужності, коефіцієнти гармонічних спотворень тощо), так і у вигляді часового тренду за тривалий проміжок часу. Згідно з наперед заданими критеріями доступна інформація про певну кількість перехідних електричних режимів в електричній схемі. Існує можливість ручного або автоматичного настроювання дворелейних (24 В) виходів.

Можливість прямого обміну даними між *PQGuard* і розробленим розрахунковим програмним забезпеченням дає змогу оперативно обробляти інформацію щодо нормальних, пе-

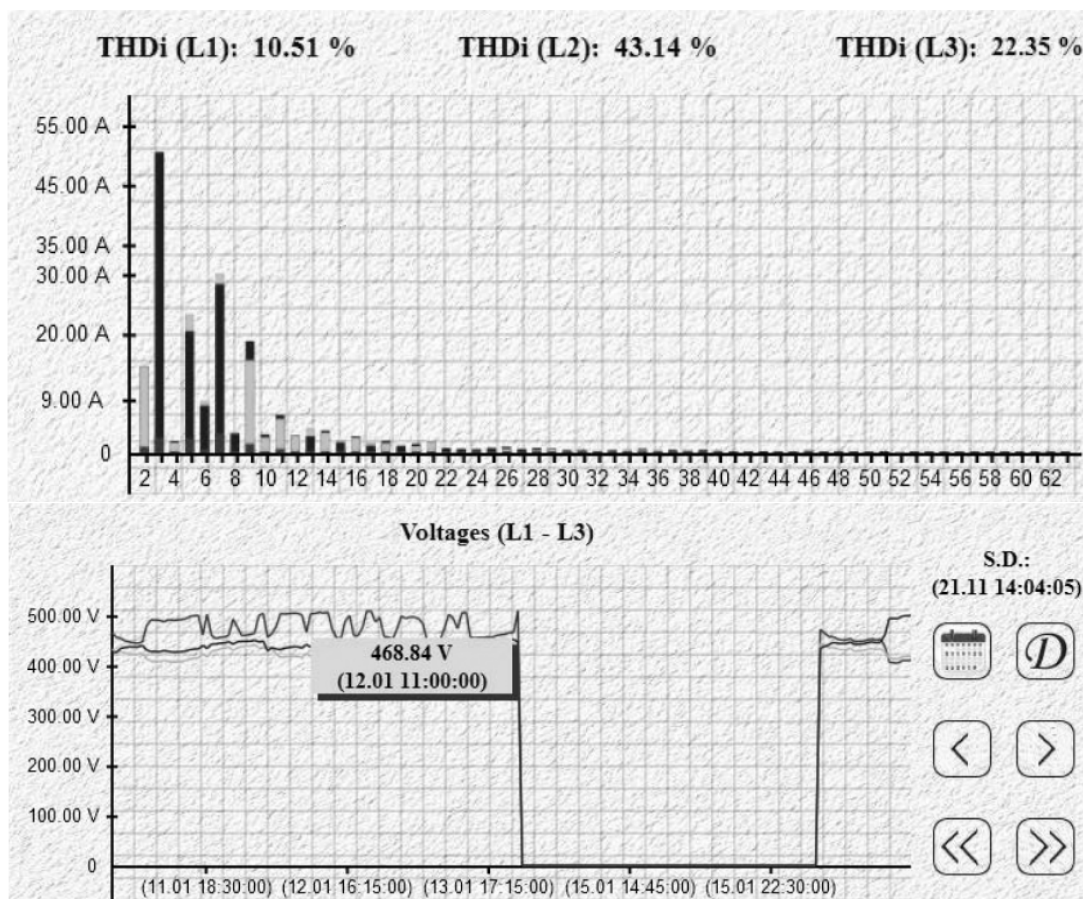


Рис. 7

рехідних та аварійних режимів роботи спеціалізованих енергосистем, оцінювати відповідність показників якості електроенергії відповідно до галузевих стандартів, моделювати можливі їх відхилення в тих чи інших ситуаціях, слідкувати за станом електрообладнання, рекомендувати режимні чи схемні засоби в критичних ситуаціях та виконувати ряд суміжних задач.

1. Демирчян К., Нейман Л. Теоретические основы электротехники. – СПб.: Питер, 2006.
2. Крон Г. Тензорный анализ сетей. – М.: Сов. радио, 1978. – 719 с.
3. Матханов Х.Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи: Учеб. для электротехн. и радиотехн. спец. / 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. –400 с.
4. *ABS guidance notes on control of harmonics in electrical power systems.* – www.eagle.org.
5. <http://computer.howstuffworks.com/cloud-computing/cloud-computing.htm>

УДК 004.45

И.В. Волков, чл.-корр. НАН Украины, **С.В. Подольный**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Разработка программного комплекса для математического моделирования и мониторинга специализированных нелинейных электрических систем

Рассмотрены основные положения создания и имплементации специализированного программного комплекса, разработанного в Институте электродинамики НАН Украины для моделирования и мониторинга специализированных нелинейных электрических систем. Библ. 5, рис. 7.

Ключевые слова: моделирование, нелинейные электрические цепи, синтетические схемы, адаптивная топология, *Cloud*-ориентированные алгоритмы.

I.V. Volkov, S.V. Podolnyi

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

The specialized nonlinear electrical systems software development for mathematical modeling and monitoring purposed

The main developing and implementation aspects of the specialized modeling and monitoring software solution designed for specialized nonlinear electrical systems have been described. The software were developed in Institute of electrodynamics NAS of Ukraine. References 5, figures 7.

Key words: nonlinear electrical circuits modeling, synthetic schemes method, adaptive topology, *Cloud*-oriented algorithms.

Надійшла 15.04.2014

Received 15.04.2014