

be used as a hallmark by which is possible to distinguish regime asymmetry caused by asymmetrical loading, the mode asymmetry caused by ground fault in the electrical network insulation damage.

**Keywords:** electrical network insulation monitoring, single-phase ground fault, unbalanced loads.

Дата надходження до редакції: 04.02.2016

Рецензент: д.ф.-м.н., проф. Кузема О.С.

УДК 621.311.001.57

## МЕТОДОЛОГІЯ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ РОЗРАХУНКУ СКЛАДНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ ТА ЇХ ОБ'ЄДНАНЬ

**В. М. Лисенко**, к.т.н.,

**В. В. Гімпель**, к.е.н.,

Сумський національний аграрний університет

У статті досліджені математичні моделі енергосистем, виявлені їх особливості та взаємозв'язки. Проаналізована теорія фізичного моделювання та управління режимами енергосистем та розглянуто її застосування для вирішення різноманітних задач. Виконана систематизація методів розрахунку установлених режимів, статичної стійкості та перехідних процесів енергосистем та їх об'єднань.

**Ключові слова:** енергосистема, модель, надійність, керування, моделювання.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** У процесі створення та експлуатації енергосистем та енергооб'єднань вельми гостро виникло питання кількісної оцінки рівня надійності окремих об'єктів та енергосистем в цілому, а його вирішення на якісному рівні («надійно», «ненадійно») нерідко призводить до неекономічних результатів зважаючи на капіталоємність сучасних енергосистем.

Проблема надійності сучасних складних енергосистем як в аспекті аналізу, так і синтезу проектних та експлуатаційних схем є складною комбінаторною багатофакторною задачею стохастичного характеру надзвичайно великої розмірності, що не має аналогів вирішення в інших галузях техніки.

Научною основою в галузі надійності систем енергетики є:

- Розробка теорії вирогідності процесів моделей функціонування автоматизованих людино-машинних розподілених енергосистем з відображенням явищ фізико-технічного та соціально-економічного характеру в їх нерозривному зв'язку та єдності.

- Розробка та адаптація методів та прийомів кількісного аналізу надійності складних систем, направлених на синтез по технічним та техніко-економічним критеріям.

- Розробка математичних моделей функціонування енергосистем, адаптованих до існуючих високосервісних технологій комп'ютерних інструментів аналізу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Аналіз фахової літератури свідчить, що дослідження, які присвячені надійності енергосистем, висвітлюють окремі положення з цього напрямку. Результати дослідження цього напрямку [1-3] свідчать про те, що не всі аспекти повною мірою висвітлюють проблему надійності сучасних

складних енергосистем як в аспекті аналізу, так і синтезу проектних та експлуатаційних схем

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження математичних моделей енергосистем, виявлення їх основних властивостей та взаємозв'язків.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Мірою надійності енергетичних систем є вирогідність недовідпуску електричної енергії, а також техніко-економічний показник, як збиток або недоотриманий прибуток.

Надійність системи забезпечується такими її властивостями та властивостями елементів, як працездатність, безвідмовність, керованість, ремонтпридатність, довговічність.

Задача оптимального управління режимами енергосистем у загальному випадку може бути сформульована як задача теорії оптимального управління, в якій необхідно оптимізувати цільову функцію:

$$J = \Theta[x(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} \Phi[x(t), u(t), t] dt \quad (1)$$

Для динамічних систем цільова функція описується рівнянням:

$$\dot{x} = f[x(t), u(t), t], \quad x(t_0) = x_0, \quad (2)$$

де  $x$  – вектор змінних станів

$u$  – вектор керування

Для вирішення задач оптимального керування застосовуються наступні основні методи: метод дискретного динамічного програмування, градієнтний метод, метод варіацій другого порядку, метод квазілінеаризації, методи математичного програмування. Для вирішення задач оптимального управління стаціонарними режимами енергосистем використовуються, в основному, три модифікації градієнтного методу: метод безумовної

оптимізації, в якому облік обмежень у формі нерівностей здійснюється за допомогою штрафних функцій, метод приведенного градієнту та метод проєкції градієнту.

Оптимізація режимів Об'єднаної енергосистеми держави досягається шляхом декомпозиції за часовою та територіальною ієрархією відповідно з принципом оптимальності Беллмана, згідно з яким, завдання, отримані від більш високого рівня рівняння, реалізуються при забезпеченні оптимального режиму на данному рівні.

Для вирішення вказаних завдань був розроблений ряд комп'ютерних програм, які дозволяють вирішувати завдання оптимізації стаціонарних режимів енергосистем на різних ієрархічних рівнях.

Вирішення завдання обрання оптимального плану розвитку електроенергетики здійснюється на основі використанні математичних моделей оптимізації розвитку енергосистем. Шуканий оптимальний план розвитку електроенергетики повинен містити визначення:

1. Оптимальної структури генеруючих потужностей на кожен рік або розрахунковий рівень планованого періоду часу із вказанням типу і складу агрегатів, терміну початку та закінчення будівництва електростанції та вводу в експлуатацію окремих агрегатів;

2. Оптимальної структури та параметрів системоутворюючої мережі;

3. Оптимальних режимів роботи електростанцій та окремих агрегатів з вказанням витрат на паливо різноманітних видів та інших витрат, необхідних для роботи електростанцій;

4. Оптимальних рівней надійності роботи, включаючи оптимальні сумарні резерви потужностей на електростанціях при оптимальному розподіленні резервів, математичного очікування збитку від недовідпуску електроенергії і т.і.

Запобіжним заходом надійності енергетичних систем є ймовірність недовідпуску електричної енергії, а також такий техніко-економічний показник, як збиток або недоотриманий прибуток.

Математичне моделювання є на сьогодні основним формалізованим засобом аналізу функціонування та управління режимами складних енергосистем.

Рівняння математичної моделі в загальному випадку містять рівняння перехідних процесів (електромагнітних і механічних) синхронних та асинхронних машин, рівняння законів Ома і Кірхгофа для електричних мереж, рівняння різноманітних систем регулювання.

Рівняння перехідних процесів енергосистем приймають найбільш просту форму при перетворенні рівнянь синхронних машин у фазних

координатах за допомогою перетворення Парка-Горєва до обертових координатних вісей  $d, q, 0$  жорстко пов'язаних з роторами машин; рівняння решти елементів електричної мережі за законами Кірхгофа можуть бути записані в координатних вісях, жорстко пов'язаних з ротором однієї з синхронних машин, або ж у синхронно-обертових вісях.

Велике значення для режимних досліджень енергосистем мають фізичні (електродинамічні) моделі енергосистем, що відображують дійсні елементи енергосистем: генератори, трансформатори, лінії електропередачі, навантаження.

Для вирішення завдання дослідження енергосистем були розроблені комп'ютерні програми, що основані на:

1. Дослідженні нових елементів енергосистем, що мають недостатньо розвинуте математичне описання; оцінка впливу цих елементів на режими енергосистем;

2. Перевірці та налаштування натурних зразків апаратури автоматичного регулювання, протиповарійного керування, релейний захист, збір і обробка інформації;

3. Перевірці теоретичних положень, допущень і наближень аналітичних методів;

4. Використанні моделі в якості тренажера для експлуатаційного персоналу електричних станцій і систем.

При аналізі функціонування і керування режимами енергосистем виникає необхідність у виконанні великого обсягу робіт з розрахунку усталених режимів, статичної стійкості і перехідних процесів енергосистем.

Для вирішення цих завдань використовуються наступні моделі та методи розрахунку стійкості енергосистем:

Системи усталеного режиму:

$$G(z) = 0 \quad (3)$$

Нелінійні моделі вирішуються ітераційними методами. У загальному виді ітераційна схема вирішення цих рівнянь може бути записана у матричному вигляді:

$$Z^{s+1} = z^s + \Lambda^s G(z^s) = \Psi(z^s), \quad (4)$$

де  $\Lambda^s$  - деякі особливості матриці.

Різнманітний вибір матриць  $\Lambda^s$  призводить до різних ітераційних методів. Якщо  $\Lambda^s = -[G'(z^s)]^{-1}$ , (де  $G'(z^s)$  - матриця Якобі системи функцій  $G(z^s)$  відносно змінних  $z^s$ ), то ітераційний процес відповідає методу Ньютона; якщо  $\Lambda^s = [G'(z^0)]^{-1}$  - модифікованому методу Ньютона.

Визначення статичної стійкості по збіжності ітераційних процесів усталених режимів. Ця методологія заснована на аналізі зв'язку збіжності ітераційних процесів усталених режимів та статичної стійкості енергосистеми. Для загального

випадку ітераційних процесів, що описуються виразом (4), доведено, що при досягненні межі аперіодичної стійкості енергосистеми досягається і межа збіжності ітераційних процесів, що визначається умовою появи хоча б одного речовинного власного значення ітераційної матриці, рівного одиниці, незалежно від обрання ітераційного методу.

Доведено, що розбіжність ітераційного процесу (3), що обумовлена переходом через одиницю найбільшого по модулю речовинного власного значення ітераційної матриці та маюча монотонний характер, є критерієм аперіодичної статичної нестійкої енергосистеми.

Методологія оцінювання статичної стійкості енергосистем за величиною та оцінкам власних значень матриць. Розроблена загальна методика дослідження статичної стійкості енергосистем за величиною та оцінкам власних значень матриць складається з:

- розробки загальної лінеаризованої математичної моделі енергосистем, що містить алгебраїчні та диференціальні рівняння;
- методику перетворення вихідної системи лінеаризованих рівнянь до нормальної форми з урахуванням слабкої наповненості;
- аналіз статичної стійкості енергосистем на основі визначення оцінок і величин власних значень матриці коефіцієнтів системи рівнянь першого наближення, приведених до нормальної форми – матриці А.

У літературі [2, 3] розглянуто застосування різних оцінок локалізації власних значень матриць, у т.ч. Гершгорина, Островського, Брауера. Перевага таких оцінок полягає в тому, що вони легко вираховуються і можуть бути використанні у якості достатніх критеріїв статичної стійкості або нестабільності.

Методи визначення граничних по стійкості встановлених режимів. Особливу актуальність задача визначення граничних по стійкості режимів набуває в умовах формування ринкових відносин в електроенергетиці, коли виникає необхідність швидкого визначення фізичної реалізованості тих чи інших режимів енергосистем, обумовлених укладанням різного роду домовленостей між постачальниками та споживачами електроенергії.

Більшість досліджень стійкості складних енергосистем у даний час засновано на розрахунку перехідних процесів шляхом числового інтегрування диференціальних рівнянь системи.

У даний час оснащеність енергосистем системами автоматичного регулювання і управління така, що дія цих систем значно позначається на характері і основних показниках перехідних процесів. У зв'язку з цим, розрахунки перехідних процесів енергосистем повинні виконуватися з адекватним урахуванням дії цих систем.

Перехідні процеси в електричних системах опи-

суються двома системами рівнянь:

- Диференціальними рівняннями перехідних процесів у динамічних елементах енергосистем:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, y, t) \quad (5)$$

- Алгебраїчними рівняннями балансу струмів у вузлах електричної мережі:

$$\varphi(x, y, t) = 0 \quad (6)$$

де  $x$  – вектор змінних станів динамічних елементів енергосистеми;

$y$  – вектор компонент вузлових напруг у обраній системі координат;

$\varphi$  – нелінійний вектор функції.

Для вирішення цих рівнянь доцільно використовувати неявні методи, що характеризуються числовою стійкістю вирішення і більш високою точністю.

Порядок системи диференціальних рівнянь залежить від детальності урахування динамічних властивостей регулюємих елементів енергосистеми та може досягати великих значень. Крім того, деталізація математичного опису динамічних елементів енергосистеми (наприклад, урахування демпферних контурів та автоматичного регулювання збудження синхронних генераторів) призводить, як правило, до збільшення жорсткості системи диференціальних рівнянь (обумовленої діапазоном значень постійних часу).

Раціональним способом урахування систем автоматичного регулювання динамічних елементів енергосистеми у розрахунках перехідних процесів є розрахунок реакцій цих систем на вхідні сигнали за допомогою інтегралу згортки. При такому підході рівняння систем регулювання включаються із вихідної системи, що дозволяють значно знизити як порядок цієї системи, так і її жорсткість.

**Висновки.** Таким чином, для вирішення широкого кола завдань аналізу функціонування енергосистем та їх об'єднань розроблений комплекс різних засобів, що застосовуються до нових умов халяйнування в електроенергетиці. У тому числі:

- Розроблена система математичних моделей енергосистем, виявлені їх основні властивості та взаємозв'язок. Повна математична модель перехідних процесів енергосистем сформована на основі рівнянь Парка-Горєва для синхронних машин, повних рівнянь асинхронних машин та електричної мережі. Спрошені моделі отримані застосуванням методу малого параметру.

- Розвинута теорія фізичного моделювання та управління режимами енергосистем та розглянуто її застосування для вирішення різноманітних задач.

- Виконана систематизація методів роз-

рахунку установлених режимів, статичної стійкості та перехідних процесів енергосистем та їх об'єднань.

#### **Список використаній літератури:**

1. Аюев Б.И., Давыдов В.В., Ерохин П.М. Оптимизационная модель предельных режимов электрических систем // Электричество. № 11. 2010.
2. Аюев Б.И., Давыдов В.В., Ерохин П.М. Оптимизационные вычислительные модели предельных режимов электрических систем в заданном направлении утяжеления // Электричество. № 12. 2010.
3. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
4. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Крюков Е.А. Математические модели предельных режимов электрических систем, учитывающие продольную и поперечную несимметрию // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2004. №4. С. 73-78.
5. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Крюков Е.А. Моделирование предельных режимов электроэнергетических систем с учетом продольной и поперечной несимметрии: монография; Иркут. гос. ун-т путей сообщения. Иркутск, 2006. 138 с. Деп. В ВИНТИ 03.08.06, № 1036-В2006.
6. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Крюков Е.А. Моделирование предельных режимов электроэнергетических систем с учетом продольной и поперечной несимметрии: монография. Иркутск: ИСЭМ СО РАН ИргУПС, 2006. 140 с.

#### **Лысенко В.Н., Гимпель В.В. Методология выбора оптимального режима расчёта сложных энергосистем и их объединений**

*В статье исследованы математические модели энергосистем, выявлены их особенности и взаимосвязи. Проанализирована теория физического моделирования и управления режимами энергосистем и рассмотрено её применение для решения разнообразных задач. Выполнена систематизация методов расчёта устоявшихся режимов, статической стойкости и переходных процессов энергосистем и их объединений.*

**Ключевые слова:** энергосистема, модель, надёжность, управление, моделирование.

#### **Lysenko V., Himpel V. Methodology of select the optimum calculation mode of complex power systems and their associations**

*The article investigates mathematical model of power systems, revealed their features and relationships. It analyzes the theory of the physical modeling and control of power systems regimes and discussed its application to the solution of various problems. Made systematization calculation methods established modes, static and transient stability of power systems and their associations.*

*To address the wide range of tasks analyze the functioning of energy systems and the complex association of different drugs used to new economy conditions in the electricity.*

*The system of mathematical models of energy systems was developed and identified their main characteristics and relationship. The complete mathematical model of power system transients generated based on the Park-Gorev's equations for synchronous machines, asynchronous machines full of equations and electric networks. The simplified models derived using the method of small parameter.*

*The theory of physical modeling and management regimes of power systems was developed and considered its application to solving problems.*

*Made systematization calculation methods set modes, static stability and transition of power systems and their associations.*

**Keywords:** power system model, reliability, management, modeling.

Дата надходження до редакції: 19.01.2016

Рецензент: д.т.н., проф. Павлюченко А.М.