

Висновки. Для врахування навантажувальної спроможності трансформаторів і автотрансформаторів під час оптимального керування нормальними режимами ЕЕС запропонована методика оперативної оцінки технічного стану трансформаторів, результатом якого є повніше використання їх навантажувальної спроможності шляхом визначення витраченого ресурсу ізоляції за наявності інформації про температуру обмотки, кількості вмикань трансформаторів, коротких замиканнях і часу простоїв. Для установок з постійним складом навантаження визначення витраченого ресурсу зводиться до визначення коефіцієнта зносу, а надалі – до фіксації часу роботи і простоїв, кількості коротких замикань і вмикань. Врахування навантажувальної спроможності трансформаторів і автотрансформаторів з РПН дозволяє визначити їх роль і місце в системі оптимального керування потоками потужності і рівнями напруги в ЕЕС. Врахування реальних можливостей трансформаторів і автотрансформаторів зв'язку підвищує ефективність використання і збільшує ступінь практичної реалізації оптимізаційних розрахунків загалом.

1. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2008. – 280 с. 2. Бабушкин В.М., Бондаренко Э.А., Черемисин И.М. Современное состояние энергетики Украины и проблемы ее развития // Электрические сети и системы. – 2003. – № 2. – С. 3–7. 3. Методичні вказівки з аналізу технологічних витрат електроенергії та вибору заходів щодо їх зниження: ГНД 34.09.204-2004. – К.: ГРІФРЕ, 2004. – 159 с. 4. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Бурькин А.Б. Определение и анализ потерь мощности от транзитных потоков в электрических сетях энергосистем методом линеаризации // Электрические сети и системы. – 2006. – № 1. – С. 5–11. 5. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д. Применение теории подобия в задачах управления нормальными режимами электроэнергетических систем // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1990. – № 5. – С. 3–11. 6. Лежнюк П.Д., Кулик В.В. Оптимальне керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 188 с. 7. Реклейтис Г., Рейвиндер А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: Кн. 1. – М.: Мир, 1986. – 349 с. 8. Инструкция по снижению технологического расхода электрической энергии на передачу по электрическим сетям энергосистем и энергообъединений: И 34-70-028-86. – М.: СПО Союзтехэнерго, 1987. – 84 с.

УДК 621.316.1.072

П.Д. Лежнюк, В.В. Нетребський

Вінницький національний технічний університет

ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПУ НАЙМЕНШОЇ ДІЇ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

© Лежнюк П.Д., Нетребський В.В., 2009

Досліджується проблема створення умов самооптимізації електроенергетичних систем на основі принципу найменшої дії. Показано, що регулярне прийняття оптимальних рішень, враховуючи цей принцип формує системі умови максимально можливого зниження втрат електроенергії під час її транспортування.

In article the problem of creation of electric power systems (EPS) self-optimization conditions is investigated on the basis of a principle of the least action. As shown, regular acceptance of optimum decisions, according to this principle, forms in EPS the preconditions for the greatest possible decrease the losses of the electric power are pawned at its transportation.

Вступ. Нормальні стани електроенергетичних систем (ЕЕС) відрізняються між собою параметрами режиму і кількістю електроенергії, що витрачається на її передачу від джерел до споживачів (втрати електроенергії). Значення цих втрат окрім параметрів системи, значень навантажень і генерування залежить також від керуючих параметрів, – параметрів регулюючих пристроїв (РП) (трансформаторів,

автотрансформаторів, вольтододаткових трансформаторів, лінійних регуляторів, джерел активної і реактивної потужності). У разі зміни будь-якого з параметрів в ЕЕС встановлюється новий режим, що характеризується певними параметрами режиму і значенням втрат електроенергії. Не завжди наявність існуючого механізму зворотних зв'язків, завдяки якому здійснюється саморегулювання системи, може забезпечити режим, який найвигідніший з погляду якості електроенергії і мінімуму її втрат [1]. Отже, цю властивість ЕЕС як штучної системи кібернетичного типу [1] необхідно удосконалювати.

Оскільки ЕЕС за своєю природою є неоднорідними, то ця їхня особливість завжди призводить до додаткових втрат електроенергії під час її транспортування і розподілу. Мінімізувати ці втрати, тобто перейти від природного стану ЕЕС до оптимального, можливо тільки примусово. Існує два шляхи розв'язання цієї задачі: зменшення неоднорідності ЕЕС цілеспрямованою зміною її конструктивних параметрів [2] і застосуванням спеціальних технологій під час експлуатації ЕЕС, які дозволяють за рахунок перерозподілу потоків потужності в ЕЕС компенсувати негативний вплив їх неоднорідності [3].

Під час реалізації відзначених підходів для вибору кращих варіантів з різною ефективністю використовуються числові методи лінійного і нелінійного програмування. Загальним їх недоліком є те, що вони дають частинні розв'язки. У цій статті досліджується можливість формування умов самооптимізації нормальних режимів ЕЕС на основі принципу найменшої дії (ПНД) [4,5].

Принцип найменшої дії як метод оптимізації складних систем. Під самооптимізацією систем розуміють природну автоматику, властивість систем та їх частин самоналагоджуватися так, що забезпечується підвищення їх рівня з переходом до найбільш енергетично вигідного стану, або найбільш вигідного режиму функціонування. Перехід системи з одного стану в інший підпорядкований принципу найменшої дії, який може бути сформульований так [6]. Після відхилення від оптимального режиму функціонування в системі виникає зустрічна, протилежно скерована дія, тобто протидія, яка намагається повернути систему в оптимальний стан. Отже, для будь-якої системи в довільний момент її існування нормою є якісний оптимум, глибина якого визначається мірою ідеальності системи.

ПНД зумовлює оптимальність функціонування будь-якої системи, а також розвиток, що скерований на підвищення міри її ідеальності. Для природних систем прояв цього явища є очевидним і необмеженим. Розвиток штучних систем значною мірою здійснюється завдяки людині, тому вплив ПНД у цьому випадку є опосередкованим. Під дією об'єктивної реальності, людина може лише прискорювати, або гальмувати розвиток системи, але його напрямок завжди скерований до оптимальності. Гальмування розвитку штучної системи, підтримка її у статичному стані з часом за рахунок зниження міри ідеальності спричиняє її розпад, пов'язаний з неможливістю виконання покладених на неї функцій. З іншого боку, сприяння розвитку системи у природному напрямку забезпечує підвищення міри ідеальності. Для ЕЕС характерною ознакою для оцінки близькості їх до ідеального стану є технологічні втрати електроенергії (під час виробництва, транспортування та розподілу електроенергії). За досягнення ними певного значення (в напрямку збільшення) спочатку стає економічно недоцільна експлуатація ЕЕС, а потім і технічно неможливе їх функціонування.

Завдяки роботам Фейнмана, Еддінгтона, Гельмгольца ПНД як суто механічний принцип було поширено на істотно немеханічні процеси [7]. Таким чином він знайшов своє застосування для опису процесів електродинамічного, електромагнітного, теплового характеру тощо. У цій роботі розглядається застосування ПНД щодо функціонування ЕЕС з метою забезпечення умов для їх самоорганізації, або самооптимізації їх функціонування відповідно до заданого критерію оптимальності – втратами електроенергії. У цьому сенсі стосовно оптимізації станів ЕЕС ПНД було б доцільніше формулювати як принцип найменших втрат електроенергії (ПНВЕ) на підтримання нормальних режимів ЕЕС.

Перенесення закономірностей довільних систем на електроенергетичну систему дозволяє стверджувати, що у будь-який момент часу функціонування для поточної сукупності параметрів системи та незалежних параметрів режиму вона перебуває в оптимальному стані з погляду технологічних втрат електроенергії, але глибина цього оптимуму зумовлена мірою ідеальності самої системи. Таким чином сприяння природному розвитку ЕЕС, тобто підвищенню міри її ідеальності, дозволяє завдяки механізмам самооптимізації забезпечувати зниження технологічних

втрат електроенергії, незалежно від її навантаження. Саме це є істотною перевагою цього підходу порівняно з класичною оптимізацією [8].

Підвищення міри ідеальності ЕЕС забезпечується розвитком її у двох напрямках: шляхом оптимізації конструктивних параметрів та за рахунок насичення системи від'ємними зворотними зв'язками. Обидва напрямки є взаємопов'язаними і для забезпечення максимального системного ефекту мають розглядатися в комплексі.

Для того, щоб виявити фізичну суть оптимізації конструктивних параметрів ЕЕС під час їх проектування і реконструкції, а також, щоб виявити сутність реалізації зворотних зв'язків в ЕЕС, необхідно встановити першопричини відхилення станів системи від глобального оптимуму за заданим критерієм оптимальності та дати їм оцінку.

Умови ідеальності й оптимальності струморозподілу в ЕЕС. Нормальні режими ЕЕС є оптимальними за умови досягнення мінімуму цільової функції, за яку приймаються сумарні втрати активної потужності в них [8], тобто

$$P = f(x, u, t) \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\text{за умови, що } x \in D_x, u \in D_u,$$

де x – параметри режиму ЕЕС; u – параметри регулюючих пристроїв; D_x , D_u – допустимі області зміни параметрів x і u .

В (1)

$$x(t) = \begin{bmatrix} \mathcal{I}(t) \\ \mathcal{U}(t) \end{bmatrix}; \quad u(t) = \begin{bmatrix} \mathcal{K}(t) \\ \mathcal{Q}(t) \end{bmatrix},$$

де $\mathcal{I}(t) = \mathcal{U}_0^{-1}(t) \mathcal{S}(t)$ – вектор струмів у вузлах ЕЕС; $\mathcal{U}_0(t)$ – діагональна матриця вузлових напруг; $\mathcal{S}(t) = P(t) + jQ(t)$ – вектор потужностей у вузлах; $\mathcal{U}(t)$ – вектор напруг вузлів; $\mathcal{K}(t)$ – вектор коефіцієнтів трансформації трансформаторів, якими вводяться зрівнювальні ЕРС в контури схеми ЕЕС; $\mathcal{Q}(t)$ – вектор навантажень джерел реактивної потужності (ДРП).

Задачі (1) відповідає задача визначення струморозподілу, який забезпечує мінімум втрат активної потужності ЕЕС в кожен момент часу t за наявності обмежень на значення струмів у вітках і генеруючих вузлах. У [9] показано, що оптимальний струморозподіл визначається:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{a00} \\ \mathbf{I}_{p0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_r & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{J}_a \\ \mathbf{J}_p \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{I} \in \mathbf{D}_I, \mathbf{J} \in \mathbf{D}_J, \quad (3)$$

де \mathbf{I}_{a00} , \mathbf{I}_{p0} – вектори оптимальних активних і реактивних струмів, що протікають у вітках; \mathbf{J}_a , \mathbf{J}_p – вектори активних і реактивних складових вузлових струмів; $\mathbf{C}_r = \mathbf{r}_a^{-1} \mathbf{M}'_t (\mathbf{M} \mathbf{r}_a^{-1} \mathbf{M}'_t)^{-1}$ – матриця коефіцієнтів струморозподілу розрахункової схеми ЕЕС, в якій опори віток представлені тільки їх активними складовими (заступна г-схема ЕЕС); \mathbf{M}' – перша матриця з'єднань віток у вузлах, в якій викреслені рядки, що відповідають балансуєчому вузлам.

На практиці економічно ідеальний стан системи, розрахований за (2), лежить, як правило, поза допустимою областю \mathbf{D} . На рис. 1 наведений приклад такого випадку. Введення в допустиму область здійснюється в результаті руху системи з точки $x_e[x_{1e}, x_{2e}]$ з мінімально можливим в заданих умовах значенням втрат потужності в точку $x_0[x_{10}, x_{20}]$ з більшим значенням втрат. Зауважимо, що при використанні градієнтних методів обчислювальний процес будується навпаки – здійснюється не підйом, а спуск з рівня більших втрат (точка початкового наближення $x^{(0)}[x_1^{(0)}, x_2^{(0)}]$) на рівень з меншими втратами.

Розраховують струморозподіл і перевіряють обмеження так. Розраховується струморозподіл за заступною г-схемою ЕЕС без урахування обмежень. Одержаний при цьому струм \mathbf{J}_i порівнюється з граничними \underline{J}_i і \bar{J}_i . Якщо порушується i -те обмеження, то струм в i -му вузлі приймають такими, що дорівнює граничному \underline{J}_i або \bar{J}_i і розрахунок повторюється. Одержаний небаланс струмів розноситься між іншими генеруючими вузлами за г-схемою. Зміна струмів у вітках на відміну від попереднього викликає збільшення сумарних втрат активної потужності, але за такого підходу воно є найменшим, тобто відповідає ПНД.

Отже, можна зробити висновки, що для забезпечення мінімуму втрат активної потужності в ЕЕС активні і реактивні струми в ній повинні розподілятися залежно від активних опорів її елементів. Це відповідає принципу найменшої дії, згідно з яким перехід системи від одного стану до іншого здійснюється при найменших витратах енергії. Використовуючи ПНД, можна розв'язати задачі оптимального керування режимами ЕЕС. У [10] це показано на прикладі задачі найбільш вигідного розподілу навантаження між електростанціями. Застосувавши такий самий підхід, можна розв'язати задачу оптимізації потоків потужності і напруги в ЕЕС.

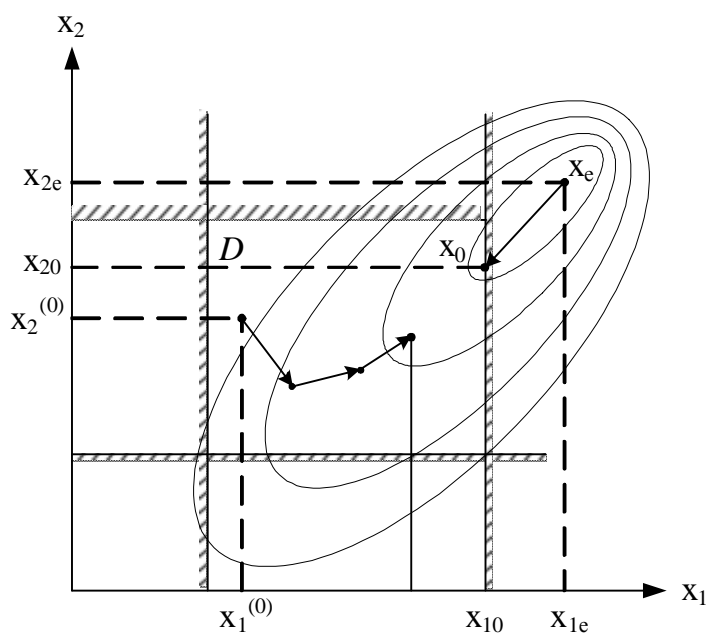


Рис. 1. Схема оптимального пошуку

Оптимальне керування режимами ЕЕС. У неоднорідній ЕЕС струморозподіл в усталеному режимі можна подати у вигляді суми двох векторів струмів

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_e + \mathbf{f},$$

де \mathbf{f}_e – вектор економічних струмів у вітках, одержаний в результаті розрахунку режиму ЕЕС за її заступною г-схемою; $\mathbf{f} = \mathbf{N}\mathbf{f}_{3p}$ – вектор додаткових струмів у вітках, накладення яких на \mathbf{f}_e приводить до виконання другого закону Кірхгофа; \mathbf{N} – друга матриця з'єднань; \mathbf{f}_{3p} – вектор контурних зрівнювальних струмів.

Значення струму \mathbf{f}_e відповідає струморозподілу і втратам активної потужності в однорідній ЕЕС і характеризує той стан системи, який з позицій ПНД є ідеальним. Задача оптимізації втрат потужності в ЕЕС полягає в зменшенні до нуля струму, що викликає порівняно з ідеальним станом додаткові втрати в ЕЕС. Цей струм можна визначити як

$$\mathbf{f} = \mathbf{f} - \mathbf{f}_e = \mathbf{C}\mathbf{f} - \mathbf{C}_r\mathbf{f} = (\mathbf{C} - \mathbf{C}_r)\mathbf{f}, \quad (4)$$

де $\mathbf{C} = \mathbf{z}_B^{-1}\mathbf{M}_t(\mathbf{M}\mathbf{z}_B^{-1}\mathbf{M}_t)^{-1}$ – матриця природного струморозподілу в ЕЕС; $\mathbf{z}_B = \mathbf{r}_B + j\mathbf{x}_B$ – матриця опорів віток ЕЕС.

Отже, задачу зменшення втрат потужності в ЕЕС можна сформулювати як задачу наближення природного струморозподілу в ЕЕС до ідеального, який відповідає розподілу за г-схемою

$$\mathbf{f} = (\mathbf{C} - \mathbf{C}_r) \mathbf{f} \Rightarrow 0. \quad (5)$$

Оскільки матриця \mathbf{C} є комплексною, а матриця \mathbf{C}_r – дійсною, то (5) виконується за умови, коли

$$\mathbf{C}_p = 0, \mathbf{C}_a = \mathbf{C}_r, \quad (6)$$

де $\mathbf{C}_a, \mathbf{C}_p$ – активна і реактивна складові матриці струморозподілу \mathbf{C} .

Відзначимо, що перша умова з (6) є необхідною, друга – достатньою.

Запишемо матрицю \mathbf{C} згідно з її визначенням і позначенням як в (4) через активні і реактивні опори віток і провідності вузлів ЕЕС. Вона матиме вигляд:

$$\mathbf{C} = (\mathbf{g}_B - j\mathbf{b}_B) \mathbf{M}_t (\mathbf{r} + j\mathbf{x}) = (\mathbf{g}_B \mathbf{M}_t \mathbf{r} + \mathbf{b}_B \mathbf{M}_t \mathbf{x}) + j(\mathbf{g}_B \mathbf{M}_t \mathbf{x} - \mathbf{b}_B \mathbf{M}_t \mathbf{r}),$$

де $\mathbf{g}_B, \mathbf{b}_B$ – активна і реактивна складові матриці провідності віток; \mathbf{r}, \mathbf{x} – активна і реактивна складові матриці опорів вузлів.

З останнього виразу очевидно, що

$$\mathbf{C}_p = (\mathbf{g}_a \mathbf{M}_t \mathbf{x} - \mathbf{b}_a \mathbf{M}_t \mathbf{r})$$

або

$$\mathbf{C}_p = \mathbf{g}_B (\mathbf{M}_t \mathbf{x} \mathbf{r}^{-1} - \mathbf{x}_B \mathbf{r}_B^{-1} \mathbf{M}_t) \mathbf{r}. \quad (7)$$

Вираз, який є в дужках у формулі (7), позначимо

$$\mathbf{g} = \mathbf{M}_t \mathbf{x} \mathbf{r}^{-1} - \mathbf{x}_B \mathbf{r}_B^{-1} \mathbf{M}_t. \quad (8)$$

Він є матрицею узагальнених показників неоднорідності ЕЕС. Як очевидно, значення \mathbf{g} визначається співвідношенням реактивних і активних складових опорів елементів ЕЕС, тобто неоднорідністю її параметрів.

З виразу (8) неважко переконатися, що для однорідної ЕЕС, коли для всіх віток $x_i/r_i = \text{idem}$, $\mathbf{g} = 0$. Тобто, незалежно від навантаження ЕЕС $\mathbf{f} = 0$ і незалежно від навантаження ЕЕС додаткові втрати, які викликані зрівнювальними струмами, в ЕЕС відсутні. В інших випадках, коли $x_i/r_i \neq \text{idem}$, $\mathbf{g} \neq 0$ і, відповідно, $\mathbf{f} \neq 0$.

На рис. 2 показаний приклад зміни втрат потужності в ЕЕС в часі і залежно від параметра РП u . У разі однорідної системи траєкторія Π проходить по дну “яру”. Згідно з ПНД так буде завжди незалежно від навантаження. В інших випадках, коли $x_i/r_i \neq \text{idem}$, траєкторія Π залежно від конкретних експлуатаційних умов може проходити будь-якою стороною “яру”. Проте і в цьому випадку згідно з ПНД додаткові втрати потужності ΔP на забезпечення технологічного процесу будуть мінімально можливі. Для того, щоб наблизити (оптимізувати) втрати в кожній точці траєкторії їх зміни до ідеально можливих, необхідно постійно під час експлуатації здійснювати в системі засобами регулювання оптимізуючі дії.

Компенсувати додаткові втрати в ЕЕС можливо шляхом регулювання напруги у вузлах ЕЕС і введенням в контури зрівнювальних ЕРС, які викликають протікання у вітках ЕЕС струмів, спрямованих зустрічно \mathbf{f} . У такій постановці задачі керуючими змінними є ЕРС, які необхідно ввести у всі замкнуті контури для реалізації оптимального струморозподілу, і навантаження джерел реактивної потужності. Зрівнювальні ЕРС можуть бути введені зміною коефіцієнтів трансформації трансформаторів, які входять в контури ЕЕС.

У [3] показано, що оптимальне значення втрат в ЕЕС досягається при відносних значеннях ЕРС, які визначають за формулами

$$\mathbf{E}_{*zр,a}^e(t) = \mathbf{p}_a^e \mathbf{J}_{*p}^e(t), \quad \mathbf{E}_{*zр,p}^e(t) = \mathbf{p}_p^e \mathbf{J}_{*a}^e(t), \quad (9)$$

де $\mathbf{E}_{*zр,a}^e(t), \mathbf{E}_{*zр,p}^e(t)$ – вектори активних і реактивних складових відносних значень зрівнювальних

ЕРС; $\mathbf{J}_{*a}^e(t), \mathbf{J}_{*p}^e(t)$ – вектори активних і реактивних складових відносних значень струмів у вузлах;

π_a^e, π_p^e – матриці критеріїв подібності.

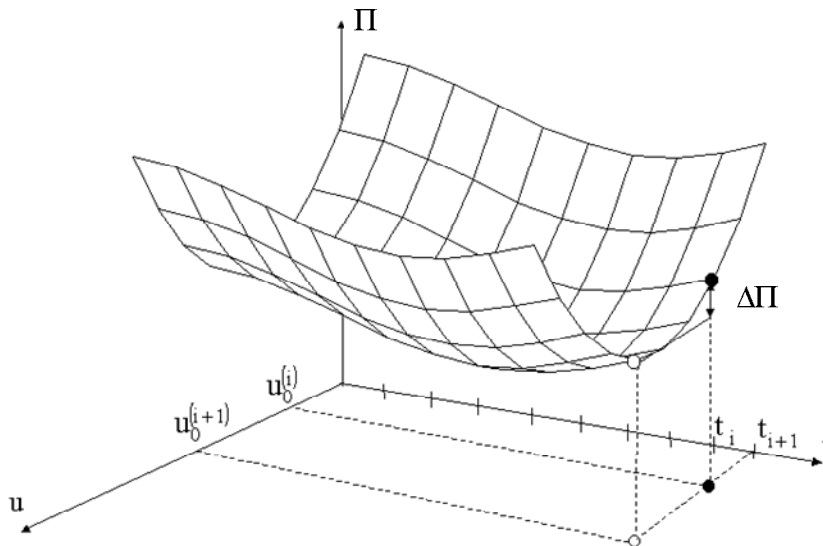


Рис. 2. Зміна параметрів регулюючих пристроїв і втрат потужності в часі

У (9) всі параметри визначені у відносних одиницях. За базисні беруть параметри ідеального режиму, розрахованого за г-схемою ЕЕС.

Матриці критеріїв подібності визначають за формулами [3, 11]

$$p_a^e = - \left[\mathbf{E}_{zpa}^{(b)} \right]_d^{-1} \mathbf{n} \mathbf{r}_B \mathbf{M}_\alpha^{-1} \left[\mathbf{J}_p^{(b)} \right]_d ;$$

$$p_p^e = \left[\mathbf{E}_{zpp}^{(b)} \right]_d^{-1} \mathbf{n} \mathbf{r}_B \mathbf{M}_\alpha^{-1} \left[\mathbf{J}_a^{(b)} \right]_d ,$$
(10)

де $\mathbf{n} = \mathbf{N}_\alpha \mathbf{x}_{B\alpha} \mathbf{r}_{B\alpha}^{-1} - \mathbf{x}_K \mathbf{r}_K^{-1} \mathbf{N}_\alpha$ – матриця системних показників неоднорідності ЕЕС, яка відрізняється від (8) тим, що формується тільки для дерева схеми ЕЕС; \mathbf{r}_K , \mathbf{x}_K – діагональні матриці опорів базисної системи контурів; \mathbf{M}_α , \mathbf{N}_α – матриці з'єднань віток дерева схеми ЕЕС у вузлах і контурах.

Співвідношення (9) є законами оптимального керування, в яких коефіцієнти зворотного зв'язку за фізичним змістом є критеріями подібності. Відповідно до (9) і ПНД розроблена система автоматичного керування (САК) нормальними режимами ЕЕС, результатом дії якої є наближення поточної реальної траєкторії зміни втрат потужності до траєкторії, оптимальної за цих експлуатаційних умов [11].

Висновки. 1. Електроенергетичні системи як штучні системи не є оптимальними з погляду втрат електроенергії під час її виробництва, транспортування і розподілу. Вдосконалення їх здійснюється під час прийняття рішень з їх розвитку і реконструкції, а також під час експлуатації шляхом оптимального керування режимами їх роботи. Для оптимального керування нормальними режимами ЕЕС може бути використаний принцип найменшої дії.

2. Використання принципу найменшої дії для оптимального керування режимами ЕЕС зводиться до визначення економічно ідеально режиму і подальшого введення режиму в допустиму область параметрів. Корегування режиму на кожному кроці згідно з принципом найменшої дії повинно здійснюватися за значеннями параметрів режиму, розрахованими за заступною г-схемою ЕЕС.

3. При автоматизації оптимального керування потоками потужності і напругою в ЕЕС для реалізації принципу найменшої дії можливо і доцільно застосовувати методи теорії подібності і моделювання. На основі їх можна вирішувати характерні для АСДК завдання на єдиних методологічних засадах на всіх етапах оптимального керування. Такий підхід дозволяє побудувати адаптивну САК, діями якої поточні режими ЕЕС наближатимуться до оптимальних.

1. *Электрические системы. Кибернетика электрических систем / Под ред. В.А. Веникова. – М.: Высш. шк., 1974. – 328 с.* 2. *Холмский В.Г. Расчет и оптимизация режимов электрических*

сетей. – М.: Высш. шк., 1975. – 280 с. 3. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Оболонский Д.И. Моделирование и компенсация влияния неоднородности электрических сетей на экономичность их режимов // *Электричество*. – 2007. – № 11. – С. 2–8. 4. Вариационные принципы механики: Сб. ст. / Под ред. Л.С. Полака. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959. 932 с. 5. Гантмахер Ф.Р. Лекции по аналитической механике: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Е.С. Пятницкого. – 3-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 264 с. 6. Мякишев Г.Я. Динамические и статистические закономерности в физике. – М.: Наука, 1973. – 318 с. 7. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с. 8. Методы оптимизации режимов энергосистем / В.М. Горништейн, Б.П. Мирошниченко, А.В. Пономарев и др.; Под ред. В.М. Горништейна. – М.: Энергия, 1981. – 336 с. 9. Лежнюк П.Д., Ярных Л.В. Расчет токораспределения в электрической сети // *Электричество*. – 1982. – № 8. – С. 10–14. 10. Лежнюк П.Д., Нетребський В.В. Математичне моделювання оптимальних станів електроенергетичних систем на засадах принципу найменшої дії // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2007. – № 596: *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. – С. 73–78. 11. Лежнюк П.Д., Кулик В.В. Оптимальное керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 188 с.

УДК 681.586.78

Р.О. Мазманян

Інститут електродинаміки НАН України

СТРУКТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИМІРЮВАЧІВ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ З АВТОМАТИЧНОЮ КОРЕКЦІЄЮ І КОМПЕНСАЦІЄЮ ПОХИБОК

© Мазманян Р.О., 2009

Подано синтезовані ієрархічні структури для комп'ютерного моделювання вимірювачів магнітної індукції з автоматичною корекцією адитивних і мультиплікативних похибок. Запропоновано метод і синтезовану структуру вимірювача з компенсацією частотних похибок від завад. Наведено результати обчислювальних експериментів з моделями структур.

There are represented synthesized hierarchical structure for computer simulation of magnetic induction meters with automatic correction of offset voltage and sensitivity drift. There are described the method and a modeling structure for the frequency errors compensation from the noise. The results of numerical experiments with models of the structures also are represented.

Існують концепції діагностики і моніторингу електроенергетичного устаткування, які побудовані на одночасній реєстрації декількох характеристик спостережуваного процесу, що мають різну фізичну природу. У їх числі також використовуються і характеристики магнітних полів, взаємодія яких лежить в основі перетворення енергій, здійснюваних в електричних машинах різного призначення [1].

Магнітовимірювальні пристрої у складі систем діагностики і моніторингу, їхні частотні і точнісні параметри повинні відповідати заданим характеристикам системи загалом. Структурний і схемотехнічний синтез складних вимірювальних пристроїв з прогнозованими параметрами неможливо реалізувати без використання комп'ютерного моделювання на етапі їх проектування. Тому розробка методів і засобів підвищення точності вимірювання магнітної індукції одночасно із створенням їх моделей для проведення обчислювальних експериментів видається актуальним завданням, що має практичне значення.