

П. Д. Лежнюк¹
 Н. В. Остра¹
 Ю. В. Петрушенко¹

РОЗПОДІЛ ДОПУСКІВ НА ПАРАМЕТРИ РЕГУЛЮЮЧИХ ПРИБОРІВ В СИСТЕМІ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМОМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

¹Вінницький національний технічний університет

Розглянуто метод та алгоритм розподілу допусків на параметри регулюючих пристроїв з використанням критеріального моделювання. Це дозволяє визначити оптимальний склад регулюючих пристроїв та конкретизувати їх функції в електроенергетичній системі, а також узгодити дії окремих локальних систем автоматичного керування в задачах оптимізації нормальних режимів ЕЕС.

Ключові слова: електроенергетична система, нормальний режим, оптимізація, оптимальне керування, втрати електроенергії, критерій оптимальності, система автоматичного керування, регулюючий пристрій.

Вступ

В процесі функціонування електроенергетична система (ЕЕС) піддається малим та великим збуренням, які викликаються зміною навантаження, генерування та топології. ЕЕС реагує на ці впливи зміною параметрів режиму. Зазвичай, це призводить до відхилення нормальних режимів ЕЕС від їх оптимального стану. Оптимізація режимів неоднорідної ЕЕС може здійснюватись шляхом спрямованого коригування параметрів пасивних елементів ЕЕС (реконструкція ліній, введення пристроїв повздовжньої компенсації) або шляхом примусової корекції потокорозподілу під час експлуатації існуючих мереж за допомогою наявних регулюючих пристроїв (РП) (трансформаторів та автотрансформаторів з РПН, вольтододавальних трансформаторів (ВДТ), джерел реактивної потужності (ДРП)).

В процесі реалізації заходів з оптимізації режимів ЕЕС завжди постає питання про черговість їх проведення, а також щодо їх ефективності в цілому. Для підвищення техніко-економічної ефективності оптимізаційні заходи піддають дослідженню та аналізу чутливості критерію оптимальності до параметрів РП [1, 2]. Якщо режим ЕЕС може коригуватися декількома регулюючими пристроями, то виникає необхідність визначитися не тільки з черговістю оптимізуючих дій ними, але і з дольовою їх участю в досягненні загальносистемного ефекту. Ця задача розподілу допусків на параметри в [1, 3] розв'язується методом підбору та чисельними методами. Для ЕЕС такі методи не підходять через велику кількість параметрів, що оптимізуються, та необхідність отримувати розв'язок в темпі процесу. В [2, 4, 5] показано, що оцінювання чутливості оптимальних рішень щодо оптимізації режимів ЕЕС ефективно може здійснюватися у відносних одиницях із застосуванням засобів теорії подібності.

Мета роботи — показати, що такий же підхід може бути застосований для розподілу допусків на параметри РП під час оптимального керування нормальними режимами ЕЕС.

Задача оптимального керування нормальним режимом ЕЕС

В загальному закон оптимального керування, реалізація якого дозволяє досягнути мінімуму втрат електроенергії під час її транспортування в ЕЕС, має вигляд [4]

$$\mathbf{u}(t) = -\boldsymbol{\pi} \mathbf{y}(t), \quad \mathbf{x} \in \mathbf{M}_x, \quad \mathbf{u} \in \mathbf{M}_{u_0}, \quad (1)$$

де $\mathbf{x}(t)$, $\mathbf{u}(t)$, $\mathbf{y}(t)$ — відповідно вектори стану, керування і спостереження; $\boldsymbol{\pi}$ — матриця зворотного зв'язку, яка за своїм змістом є матрицею критеріїв подібності оптимальних параметрів режимів ЕЕС; \mathbf{M}_x — область допустимих значень параметрів стану ЕЕС; \mathbf{M}_{u_0} — область оптимальних значень

керуючих параметрів, межі якої визначаються за результатами аналізу чутливості оптимальних рішень.

В [6] показано, що задача оптимального керування нормальним режимом ЕЕС у відносних одиницях з урахуванням чутливості має вигляд:

$$u_*(t) = -\pi y_*(t); \tag{2}$$

$$r_{*i} = \begin{cases} +\Delta u_{*уст i}, & \text{якщо } u_{*i} \geq u_{*i}^+; \\ 0, & \text{якщо } u_{*i}^+ > u_{*i} > u_{*i}^-; \\ -\Delta u_{*уст i}, & \text{якщо } u_{*i} \leq u_{*i}^-, \end{cases} \tag{3}$$

де $u_{*i} = u_i/u_{i0}$ — параметри РП, за допомогою яких оптимізується режим ЕЕС, у відносних одиницях (за базисні приймаються оптимальні значення параметрів u_{i0}); r_{*i} — коригувальні дії САК,

які вводять систему в область оптимальності (нечутливості); $\Delta u_{*уст i}$ — добавка, яка, після додавання до уставки $u_{*уст i}$, викликає відповідні дії РП по введенню керуючого параметра в зону оптимальності; u_{*i}^+ , u_{*i}^- — верхня та нижня межі зони нечутливості зміни u_i .

Згідно з (2), (3), як це показано на рис. 1, параметр u підтримується в зоні нечутливості. В разі виходу параметра з цієї зони, коригувальними діями РП r він повертається в область оптимальності (на рис. 1 це моменти часу t_1, t_2, t_3).

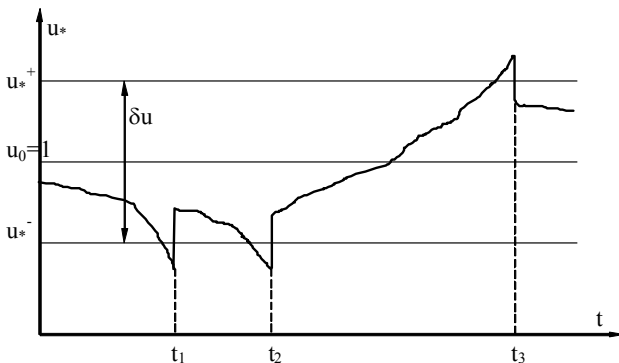


Рис. 1. Оптимальне керування з урахуванням чутливості

Визначення меж області оптимальності для однопараметричної задачі критеріальним методом

Оптимальне керування у відповідності з (2), (3) потребує визначення меж зон нечутливості u_{*i}^+ та u_{*i}^- , що пов'язано з необхідністю розв'язку зворотної задачі чутливості [1]. Для ЕЕС ця задача є особливо складною через відсутність виразу цільової функції в аналітичній формі та через необхідність пошуку її екстремуму. Тому розв'язувати її доцільно критеріальним методом [2], коли всі величини подаються у відносних одиницях.

В багатопараметричних задачах оптимальності і задачах аналізу чутливості їх оптимальних розв'язків виникають певні складнощі, пов'язані з тим, що область нечутливості критерію оптимальності формується не одним, а багатьма параметрами. Тоді області оптимальності окремих параметрів визначаються на підставі розподілу допусків на регульовальні параметри за заданого відхилення критерію оптимальності від його екстремальних значень.

На рис. 2 показано, як приклад, критеріальні залежності критерію оптимальності F від керуючих параметрів u , $F_* = f(u_*)$.

В цих залежностях $F_* = F/F_{\min}$ і $u_* = u/u_0$. На підставі таких залежностей встановлюються області оптимальності керуючих параметрів δu_i . Як видно, чисельні значення δu_{*i} залежать від величини допустимого відхилення критерію оптимальності δF_* і характеру залежності $F_* = f(u_*)$.

В критеріальній моделі, як вже відмічалось, всі параметри подаються у відносних одиницях. Оптимальне керування у відповідності з (2), (3) вима-

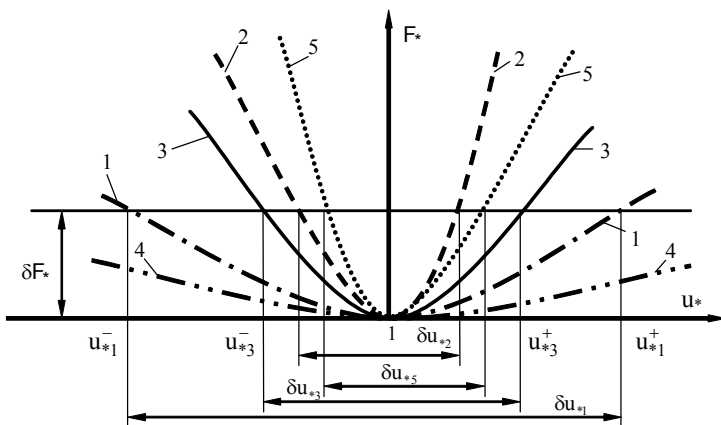


Рис. 2. Критеріальні залежності критерію оптимальності від керуючих параметрів

гає визначення меж зон нечутливості u_{*i}^+ та u_{*i}^- , що зв'язано з необхідністю розв'язування зворотної задачі чутливості. В основу алгоритму розв'язування зворотної задачі чутливості, як і у випадку розв'язування прямої задачі, покладено таку критеріальну форму [7]:

$$F_* = \sum_{i=1}^m \pi_i \prod_{j=1}^n u_{j*}^{\alpha_{ji}}, \quad (4)$$

де F_* — критерій оптимальності; π_{1j}, π_{2j} — критерії подібності, α_{ji} — постійні коефіцієнти, які відображають характер залежності і міру впливу u_{*j} на значення F_* .

За допомогою співвідношення (4) може бути розв'язана пряма і зворотна задачі чутливості. В [2] показано, що за умови апроксимації цільової функції двочленним позиномом

$$F_{*i} = \pi_{1i} u_{*i}^{\alpha_i} + \pi_{2i} u_{*i}^{\beta_i}, \quad (5)$$

розв'язок зворотної задачі чутливості може бути отриманий в аналітичній формі.

Згідно з методикою, запропонованою в [2], вирази для обчислення граничних значень області оптимальності параметрів мають вигляд

$$u_{*i}^- = \left(\frac{\alpha_i - \beta_i}{-\beta_i} \frac{\pi_{1i}}{1 + \delta F_*} \right)^{-1/\alpha_i}, \quad u_{*i}^+ = \left(\frac{\alpha_i - \beta_i}{\alpha_i} \frac{\pi_{2i}}{1 + \delta F_*} \right)^{-1/\beta_i}. \quad (6)$$

Отримані результати відносяться до випадку, коли критерії подібності π_i можуть розглядатися як постійні коефіцієнти. Проте в реальних системах так буває відносно рідко. Як правило, чисельні значення критеріїв подібності обчислюються як відношення параметрів досліджуваної системи, які визначаються з певною точністю. В цьому випадку критерії подібності визначаються так:

$$\tilde{\pi}_{ji} = \pi_{ji} + \delta \pi_{ji}, \quad j = \overline{1, 2},$$

де $\delta \pi_{ji} = \frac{\delta b_{ji} u_{i0}^2}{F_{\min}}$ — відхилення чисельного значення критерію подібності при зміні параметрів

математичної моделі на певну величину Δ ; δb_{ji} — коефіцієнт чутливості першого порядку параметрів математичної моделі, який може бути визначений за методикою, розглянутою в [1].

З урахуванням останнього виразу межі області оптимальності на відміну від (6) визначаються за формулами

$$\tilde{u}_{*i}^- = \left(\frac{\alpha_i - \beta_i}{-\beta_i} \frac{\pi_{1i} + \delta \pi_{1i}}{1 + \delta F_*} \right)^{-1/\alpha_i}, \quad \tilde{u}_{*i}^+ = \left(\frac{\alpha_i - \beta_i}{\alpha_i} \frac{\pi_{2i} + \delta \pi_{2i}}{1 + \delta F_*} \right)^{-1/\beta_i}. \quad (7)$$

Отже, для однопараметричної задачі застосування критеріального методу дозволяє розв'язати зворотну задачу чутливості в аналітичному вигляді. На цьому розв'язування задачі чутливості можна вважати завершеним.

Розподіл допусків на параметри регулюючих пристроїв в задачах чутливості оптимального керування критеріальним методом

Для багатопараметричної задачі області оптимальності окремих параметрів визначаються на підставі розподілу допусків на регулювальні параметри u для заданого δF . Розглянемо як ця задача може бути розв'язана в іменованих і відносних одиницях.

В реальній системі з різних причин значення параметрів відрізняються від оптимальних на величини $\Delta u_1, \dots, \Delta u_m$. При цьому критерій оптимальності отримує приріст

$$\Delta F = F(u_{10} + \Delta u_1, \dots, u_{m0} + \Delta u_m) - F_0.$$

Система є працездатною, якщо

$$\Delta F(\Delta u_1, \dots, \Delta u_m) \in \Delta M_F, \quad (8)$$

де ΔM_F — допустима множина (область) значень варіацій критерію оптимальності ΔF , яка характеризує допуски на значення F і u .

У розрахунку допусків методами теорії чутливості допускається, що відхилення значень пара-

метрів від оптимальних значень малі і що зміни параметрів в межах поля допуску є лінійними. Тоді варіація (8) критерію оптимальності F визначається таким чином:

$$\Delta F = \sum_{i=1}^m \mu_i \Delta u_i, \quad (9)$$

де $\mu_i = \left. \frac{\partial F}{\partial u_i} \right|_{\Delta u=0}$ — коефіцієнт чутливості. В останньому виразі величина Δu_i є варіацією, яка ви-

значається як $\Delta u_i = u_i - u_{i0}$.

Якщо розраховувати на найгірше поєднання відхилень параметрів, то для оцінки допусків користуються формулою

$$\Delta F = \sum_{i=1}^m |\mu_i| \delta u_i^h, \quad (10)$$

де $\delta u_i^h = \Delta u_i$ — половина поля допуску параметра u_i .

Згідно з (10) безпосередньо визначається поле допуску критерію оптимальності δF . У випадку декількох параметрів розрахунок допусків можна здійснювати методом послідовних наближень, підбираючи допуски на параметри таким чином, щоби значення критерію оптимальності F знаходилось в заданому допуску. Такий підхід за великої кількості параметрів є громіздким в обчислювальному відношенні. Простішим є алгоритм, що реалізує принцип рівних впливів [1]. У відповідності з цим принципом припускається, що в співвідношенні (10) значення всіх складових ($|\mu_i| \delta u_i$) рівні між собою. При цьому

$$\delta F = m |\mu_i| \delta u_i^h,$$

звідки

$$\delta u_i^h \leq \frac{\delta F}{m |\mu_i|}. \quad (11)$$

Як бачимо, розподіл допусків в іменованих одиницях пов'язаний з низкою складнощів. Так, щоб визначити згідно з (9) варіації критерію оптимальності, необхідно попередньо знайти значення параметрів оптимального режиму системи u_{i0} . Розв'язуючи зворотну задачу допусків, проблема ще більше ускладнюється. Принцип рівних впливів стосовно таких систем як ЕЕС є неприйнятним, оскільки реальні регульовальні ефекти конкретних параметрів в них суттєво відрізняються.

На рис. 2 показано типовий для ЕЕС приклад, коли критеріальні залежності $F_* = f(u_*)$ відображають різний характер і можливості параметрів щодо їх впливу на оптимізацію режимів системи. У відносних одиницях задача розподілу допусків розв'язується таким чином. Згідно з (6) або (7) визначаються граничні значення параметрів u_{*i}^- та u_{*i}^+ . Використовуючи ці дані, обчислюються

$$\delta u_{*i} = u_{*i}^+ - u_{*i}^-. \quad (12)$$

Для параметрів визначаються їх вагові коефіцієнти. Вони можуть бути визначені в результаті нормування δu_{*i} таким чином:

$$v_i = \frac{\delta u_{*i}}{\sum_{i=1}^m \delta u_{*i}}. \quad (13)$$

Значення допуску δu_{*i}^h для заданого значення δF_* визначається

$$\delta u_{*i}^h \leq \frac{v_i \delta F_*}{|\mu_i|}, \quad (14)$$

де з урахуванням (5) $\mu_i = \frac{\partial F_*}{\partial u_{*i}} = \pi_{i1} \alpha_i u_{*i}^{\alpha_i - 1} + \pi_{i2} \beta_i u_{*i}^{\beta_i - 1}$.

На відміну від (11) допуски, визначені за допомогою формули (14), точніше відображають реальні можливості конкретного параметра впливати на процес оптимізації режимів системи. Визначені таким чином δu_{*i} дозволяють більш обґрунтовано і з більшою техніко-економічною ефектив-

ністю досягати в системі загальносистемного ефекту.

Зазначимо, що розглянутий спосіб розподілу допусків у відносних одиницях не єдиний. В залежності від вибраної системи відносних одиниць нормування може бути виконане не тільки до одиниці [2]. В диференціальній системі відносних одиниць, яка розроблена для аналізу критерію оптимальності саме в області оптимальних рішень, коефіцієнти нормування визначаються [2]

$$k_j = \frac{\partial F/F}{\partial u/u_j} = \sum_{i=1}^m \alpha_{ji} \pi_i, \quad i = \overline{1, n}.$$

Якщо для визначення k_j вибрати точку u_{*j}^- або u_{*j}^+ , то значення половини поля допуску визначається так:

$$\delta u_{*j}^h \leq \frac{\delta F_*}{k_j}.$$

В цьому випадку коефіцієнт k показує вплив відносної похибки критерію F на відносну похибку параметра керування u , тобто він має зміст коефіцієнта впливу [1]. Відповідно, в такий спосіб можна врахувати при визначенні області оптимальності і зони нечутливості похибки обчислення критеріїв подібності.

Висновки

1. Аналіз чутливості оптимальних рішень можна і доцільно здійснювати із застосуванням методів теорії подібності та моделювання. Завдяки властивостям критеріального методу чутливість досліджується без визначення функцій чутливості та оптимальних значень параметрів. У випадку, коли цільова функція апроксимована позиномом, розв'язок зворотної задачі чутливості має аналітичний вид. Це значить, що поля допуску і межі області оптимальності керуючих параметрів також встановлюються аналітично в залежності від значень варіацій критерію оптимальності та від точності визначення критеріїв подібності.

2. Метод розподілу допусків на параметри з використанням критеріального моделювання дозволяє конкретизувати функції регулюючих пристроїв і вдосконалити систему автоматичного керування потоками потужності і напругою в ЕЕС. Склад регулюючих пристроїв, призначених для використання з метою зменшення втрат потужності в ЕЕС, а також налагоджувальні параметрів САК цими трансформаторами доцільно визначати за результатами розрахунків допусків на параметри запропонованим методом, в якому враховується їх регулювальний ефект. Такий підхід дозволяє зменшувати втрати потужності в ЕЕС і оптимізувати кількість перемикачів відпайок трансформаторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Розенвассер Е. Н. Чувствительность систем управления / Е. Н. Розенвассер, Р. М. Юсупов. — М. : Наука, 1981. — 464 с.
2. Лежнюк П. Д. Аналіз чутливості оптимальних рішень в складних системах критеріальним методом / П. Д. Лежнюк : моногр. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. — 131 с.
3. Бычков Ю. А. Расчет математических моделей динамических систем аналитически-численным методом / Ю. А. Бычков, С. В. Щербаков. — СПб : Технолит, 2010. — 380 с.
4. Астахов Ю. Н. Применение теории подобия в задачах управления нормальными режимами электроэнергетических систем / Ю. Н. Астахов, П. Д. Лежнюк // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1990. — № 5. — С. 3—11.
5. Лежнюк П. Д. Критеріальне моделювання в задачах чутливості систем автоматичного керування / П. Д. Лежнюк, Н. В. Остра // Вісник технологічного університету Поділля. — 2002. — № 3, том 1. — С. 33—37.
6. Мокін Б. І. Імітаційне моделювання в оптимальному керуванні нормальними режимами електричної системи / Б. І. Мокін, П. Д. Лежнюк, Ю. В. Лук'яненко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 1995. — № 3. — С. 5—9.
7. Лежнюк П. Д. Апроксимація заданих функцій позином-сплайнами / П. Д. Лежнюк, Ю. В. Петрушенко // Обчислювальний інтелект : матер. І Міжнар. наук.-техн. конф. — Черкаси. — 2011. — С. 447—448.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 22.01.2015

Лежнюк Петро Дем'янович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електричних станцій та систем;
Остра Наталя Вікторівна — канд. техн. наук, доцент кафедри електричних станцій та систем, e-mail: onv1879@mail.ru;

Петрушенко Юлія Володимирівна — аспірантка кафедри електричних станцій та систем.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

P. D. Lezhniuk¹
N. V. Ostra¹
Yu. V. Petrushenko¹

Distribution of parameter tolerance of regulating devices in automatic control mode of electric power system

¹Vinnytsia National Technical University

The method and algorithm of distribution of parameter tolerance of regulating devices with the use of criteria modeling are considered in the paper. It allows to define optimal composition of regulative devices and specify their functions in the electroenergy system, and also to co-ordinate the actions of the separate in-plant systems of automatic control in the tasks of optimization of the normal modes of EPS.

Keywords: electric power system, normal mode, optimization, optimal control, power losses, optimality criterion, automatic control system, control device.

Lezhniuk Petro D. — Dr. Sc (Eng), Professor, Head of the Chair of Power Plants and Systems;

Ostra Natalia V. — Cand. Sc. (Eng.). Associate Professor of the Chair of Power Plants and Systems, e-mail: onv1879@mail.ru;

Petrushenko Yuliia V. — Post-Graduate Student of the Chair of Power Plants and Systems

П. Д. Лежнюк¹
Н. В. Острая¹
Ю. В. Петрушенко¹

Распределение допусков на параметры регулирующих устройств в системе автоматического управления режимом электроэнергетической системы

¹Винницкий национальный технический университет

Рассмотрен метод и алгоритм распределения допусков на параметры регулирующих устройств с использованием критериального моделирования. Это разрешает определить оптимальный состав регулирующих устройств и конкретизировать их функции в электроэнергетической системе, а также согласовать действия отдельных локальных систем автоматического управления в задачах оптимизации нормальных режимов ЭЭС.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, нормальный режим, оптимизация, оптимальное управление, потери электроэнергии, критерий оптимальности, система автоматического управления, регулирующее устройство.

Лежнюк Петр Демьянович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электрических станций и систем;

Острая Наталья Викторовна — канд. техн. наук, доцент кафедры электрических станций и систем, e-mail: onv1879@mail.ru;

Петрушенко Юлия Владимировна — аспирант кафедры электрических станций и систем