

УДК 621.311

О.М. ДОВГАЛЮК (канд. техн. наук, доц.)

Національний технічний університет «Харківській політехнічний інститут»
dovgaljuk@mail.ru

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БАГАТОРІВНЕВОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Побудовано математичну модель багаторівневої автоматизованої системи обліку електричної енергії, яка дозволяє з необхідною точністю прогнозувати значення параметрів режиму, показників якості та електроспоживання в електричній мережі. Застосування цієї моделі дозволить оптимізувати управління режимами систем електропостачання та підвищити ефективність роботи автоматизованих інформаційно-вимірювальних систем.

Ключові слова: автоматизована система обліку електричної енергії, математична модель, коваріація, математичне очікування, дисперсія, управління контролем, критерій, точність контролю, параметр системи, параметр режиму, оптимізація, система електропостачання, електроспоживання.

Постановка проблеми. Енергозбереження є пріоритетним напрямком розвитку енергетики будь-якої країни. Одним із суттєвих його напрямків є впровадження автоматизованих систем обліку електричної енергії (АСОЕ), які дозволяють отримувати повну та оперативну інформацію про значення параметрів режиму електричних мереж, споживання та витрати електроенергії, стан енергетичних об'єктів. Зазначена інформація може використовуватись для оптимізації режиму електричної мережі та керування процесом електроспоживання, зменшення втрат електроенергії тощо. Вирішення цих питань має велике практичне значення для енергетики, оскільки безпосередньо впливає на ефективність роботи систем електропостачання.

При проектуванні та експлуатації АСОЕ виникає ряд задач, пов'язаних з прогнозуванням стану об'єктів енергетики та параметрів режиму їх роботи, що дозволить оцінювати результати запропонованих енергозберігаючих технологій. Важливим фактом при цьому є врахування оцінки впливу вимірювальних та керуючих систем на стан системи електропостачання та значення контрольованих показників, для чого необхідно виконати моделювання таких інформаційно-вимірювальних систем.

Таким чином, моделювання АСОЕ є актуальним і необхідним завданням для вдосконалення та оптимізації функціонування інформаційно-вимірювальних систем як одного з кроків впровадження енергозбереження.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Питанням розвитку та дослідження особливостей впровадження й експлуатації АСОЕ приділяється значна увага як одному з напрямків енергозбереження [1,2].

За більш ніж десятирічний термін функціонування Оптового ринку електричної енергії України був зроблений суттєвий прорив у вирішенні зазначеної проблеми. Так, на основі розроблених та затверджених в різних інстанціях директивних документів, основною метою яких є здійснення упорядкованого та регламентованого створення АСОЕ, розпочалось їх масове впровадження. Об'єктами впровадження виступили, в першу чергу, невеликі, середні й потужні споживачі, окремі електростанції, розподільчі та магістральні мережі. Багато уваги почало приділятися питанням автоматизації об'єктів управління електропостачанням, технологіям подальшого розвитку інформаційно-вимірювальних систем, зменшенню перешкод в процесі їх експлуатації та шляхам удосконалення роботи АСОЕ [3-6].

Поступове накопичення досвіду експлуатації на вказаних об'єктах локальних АСОЕ призвело до появи ще більш складної проблеми – їх інтеграції в єдину систему в межах енергетичної компанії в цілому. Вирішення цієї проблеми потребує застосування нових технічних рішень, а також удосконалення наявних та розробки нових перспективних методологій та створення на їх основі нормативних документів для впорядкування та підвищення ефективності процесу створення інтегрованих систем управління електроенергетичними компаніями [7,8]. Особливої уваги заслуговують питання контролю показників якості електричної енергії (ПЯЕ) в рамках функціонування АСОЕ [9].

Незважаючи на те, що дослідженню особливостей проектування і роботи АСОЕ присвячено багато робіт, питанню моделювання даних систем не приділялося достатньої уваги.

Метою проведених досліджень є побудова математичної моделі багаторівневої АСОЕ, яка враховує точність контролю і дозволить прогнозувати значення параметрів режиму та оцінювати значення ПЯЕ в контрольованих точках мережі.

Викладення основного матеріалу. Сучасні АСОЕ мають багаторівневу розподілену структуру, до складу таких систем входить велика кількість елементів та вузлів [10]. У загальному випадку в структурі АСОЕ можна виділити чотири рівня, які зображені на рис. 1:

- перший рівень – первинні вимірювальні прилади (ПВП) з телеметричними або цифровими виходами, які здійснюють безперервно або з мінімальним інтервалом усереднення виміру параметрів режиму в контрольованих точках мережі;

• другий рівень – пристрої збору та підготовки даних (ПЗПД), спеціалізовані вимірювальні системи або багатофункціональні програмовані перетворювачі з вбудованим програмним забезпеченням обліку контрольованих параметрів, які здійснюють в заданому циклі інтервалу усереднення для цілодобового збору вимірювальних даних з територіально розподілених ПВП, накопичення, обробку та передачу цих даних на верхні рівні АСОЕ;

• третій рівень – персональний комп'ютер (ПК) або сервер центру збору і обробки даних (ЦЗОД) із спеціалізованим програмним забезпеченням АСОЕ, який здійснює збір інформації з одного або групи ПЗПД, підсумкову обробку цієї інформації як за точками обліку, так і за їх групами, документування й відображення даних обліку у вигляді, зручному для аналізу та прийняття рішень;

• четвертий рівень – сервер центру збору та обробки даних із спеціалізованим програмним забезпеченням АСОЕ, який здійснює збір інформації з ПК або групи серверів ЦЗОД третього рівня, додаткове агрегування й структурування інформації за групами об'єктів обліку, документування й відображення даних обліку у вигляді, зручному для аналізу і прийняття рішень.

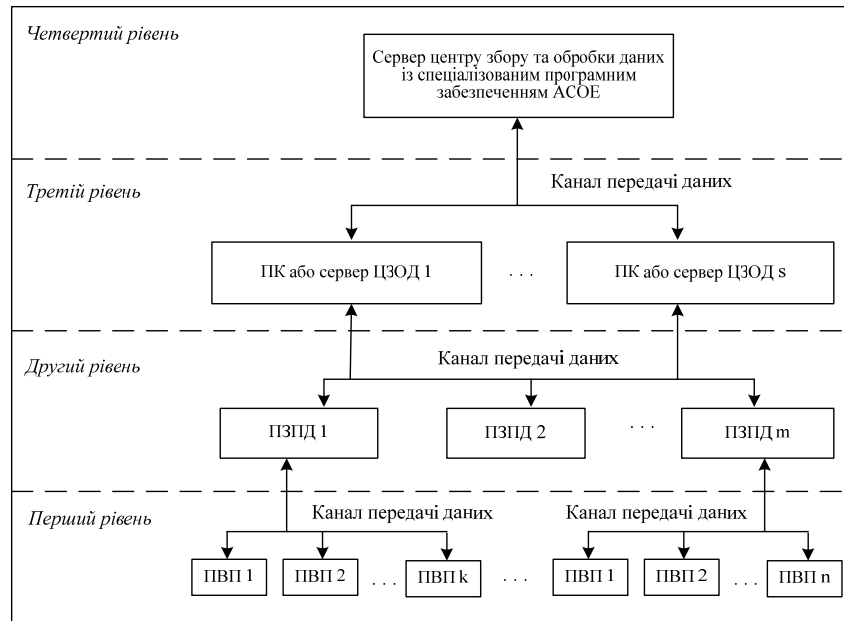


Рисунок 1 – Структурна схема АСОЕ, що моделюється

Через канали передачі даних передбачається можливість обміну інформацією між рівнями АСОЕ та окремими елементами одного рівня, якщо виникає в цьому необхідність.

Всі ці особливості роблять АСОЕ досить складним об'єктом моделювання [11], основні функції якого зводяться до наступних: контроль параметрів режиму в заданих точках електричної мережі; аналіз електроспоживання й керування процесом розподілу електричної енергії; контроль ПЯЕ; оперативне відображення інформації про аварійні й позаштатні події, спрацювання блокувань та захистів; ведення архіву інформації про роботу обладнання й режимні параметри системи електропостачання (СЕП).

Параметри АСОЕ можна розділити на вхідні $P_{вх}$, внутрішні $P_{вн}$ та вихідні $P_{вих}$. До вхідних параметрів відносяться параметри режиму електричної мережі та збурюючий вплив, який чиниться на систему із зовнішнього середовища. До внутрішніх відносяться параметри структурних елементів системи, а до вихідних параметрів – показники якості роботи АСОЕ, за якими можна судити про правильність функціонування системи та порівнювати однотипні за призначенням системи:

$$\begin{cases} P_{вх} = P_p(t), \\ P_{вн} = P_{ac}(t), \\ P_{вих} = P_{яс}(t), \end{cases} \quad (1)$$

де $P_p(t)$ – матриця значень параметрів режиму для контрольованих точок мережі, тобто значень струму $I(t)$, напруги $U(t)$ і потужності $S(t)$; $P_{ac}(t)$ – матриця передавальних функцій структурних вузлів АСОЕ $W(s)$ і значень похибок $\sigma_0(t)$, що визначають точність вимірювань; $P_{яс}(t)$ – матриця значень показників якості роботи АСОЕ $J(t)$, а також керуючих впливів $v(t)$, які формуються системою для оптимізації роботи.

Випадковий процес $P(t)$ моделює стан СЕП. Безпосередньому спостереженню даних процес недоступний, у той же час існує можливість вимірювання іншого процесу $K(t)$, який несе інформацію про стан системи

$\Pi(t)$. За результатами спостережень за процесом $K(t)$ на відріжку часу $[t_0, T]$, де $T > t_0$, необхідно побудувати оптимальну оцінку $m(\tau)$ вектора $\Pi(\tau)$. Оскільки співвідношення часу для цього процесу можна виразити $\tau = T$, то дана задача класифікується як фільтрація. При цьому

$$\Pi(t) \in R_n, \quad K(t) \in R_m, \quad (2)$$

де R_n, R_m – області допустимих значень параметрів СЕП і спостережень за ними.

Схему управління процесом контролю для АСОЕ представлено на рис. 2.

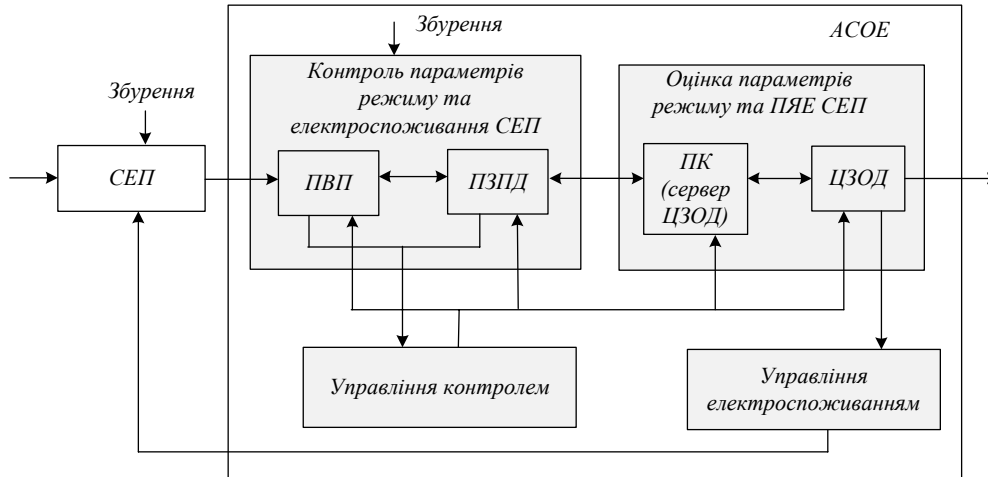


Рисунок 2 – Схема управління процесом контролю для АСОЕ

Стан СЕП і процес контролю описуються системою лінійних стохастичних рівнянь [12]:

$$d\Pi(t) = \Pi_c(t)\Pi(t)dt + \sigma(t)d\xi(t), \quad \Pi(0) = \Pi_0, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (3)$$

$$dK(t) = \Pi_{cp}(t)\Pi(t)dt + \sigma_0(t)d\xi_0(t), \quad K(0) = K_0, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (4)$$

де $\Pi(t)$ – параметри СЕП; $K(t)$ – контроль за параметрами СЕП; $\Pi_c(t)$ – матриця параметрів СЕП (опорів і провідностей елементів СЕП, що визначаються конфігурацією системи та особливостями її окремих елементів); $\Pi_{cp}(t)$ – матриця складу вимірювань, тобто значень контрольованих параметрів режиму СЕП (значень струму $I_c(t)$, напруги $U_c(t)$ і потужності $S_c(t)$); $\xi(t), \xi_0(t)$ – вектори, що моделюють перешкоди в СЕП і в каналі вимірювання АСОЕ відповідно; $\sigma(t), \sigma_0(t)$ – матриці похибок СЕП та АСОЕ, що визначають точність вимірювань.

Матриці $\Pi_c(t), \sigma(t), \Pi_{cp}(t), \sigma_0(t)$ визначені і мають вимірні обмежені елементи, ξ і ξ_0 являють собою вінеровські стандартні процеси [13], Π_0 – гауссовський вектор, $M\Pi_0 = m_0, D\Pi_0 = D_0$. Випадкові величини Π_0, ξ і ξ_0 взаємно незалежні. При цьому точність визначення параметрів режиму системи характеризується матрицею $D(t)$, а управління контролем – матрицею $v = \Pi'_{np}(\sigma_0\sigma'_0)^{-1}\Pi_{np}$, які пов'язані рівнянням фільтру Калмана:

$$\dot{D}(t) = \Pi_c(t)D(t) + D(t)\Pi'_c(t) - D(t)v(t)D(t) + \sigma(t)\sigma'(t), \quad (5)$$

$$D(0) = D_0, v = \Pi'_{np}(\sigma_0\sigma'_0)^{-1}\Pi_{np}, \quad 0 \leq t \leq T.$$

Задача фільтрації полягає у визначенні найкращої в середньоквадратичному сенсі оцінки вектора $\Pi(T)$ за результатами спостережень K_T процесу (4) на відріжку часу $[0, T]$. В цьому випадку математичне очікування $m(T)$ і матриця коваріації $D(T)$ вектора $\Pi(T)$ за умови K_T визначаються за виразами:

$$m(T) = \frac{M\Pi(T)}{K_T}, \quad (6)$$

$$D(T) = \frac{M(\Pi(T) - m(T))(\Pi(T) - m(T))'}{K_T}. \quad (7)$$

Оцінка значень ПЯЕ проводиться згідно [14] з урахуванням отриманої оцінки параметрів режиму СЕП для моменту часу T і формується у вигляді матриці $\Pi_k(T)$.

Критерій якості процесу контролю параметрів режиму та електроспоживання СЕП має вигляд [12]

$$J = q'D(T)q, \quad (8)$$

де $D(T)$ – дисперсія величини $q'P(T)$; q – заданий вектор з області R_n .

Управління контролем $v(t)$ підпорядковане обмеженням, серед яких найбільш впливовим є точність визначення величини кожного параметра не нижче заданої. При цьому $v(t) \in V(t)$, де $V(t)$ – задана множина матриць, що визначається можливостями управління контролем.

Для вирішення задачі оптимізації процесу контролю використовуємо принцип максимуму Понтрягіна, який широко застосовується для систем управління з максимальною швидкістю. Значення функції управління контролем формується у вигляді

$$v(t) = P_{cp}'(t) (\sigma_0(t) \sigma_0'(t))^{-1} P_{cp}(t). \quad (9)$$

При цьому критерій точності контролю параметрів визначається виразом

$$J(v) = q'D[P(T)]q \rightarrow \inf_v. \quad (10)$$

Для оцінки достовірності отриманої моделі багаторівневої АСОЕ були проведені експериментальні дослідження в СЕП, для чого у понад 200 контрольних точках були проведені виміри значень параметрів режиму, ПЯЕ та електроспоживання.

Для порівняння експериментальних даних із значеннями параметрів режиму, ПЯЕ та електроспоживання СЕП, отриманих за допомогою побудованої моделі, визначені похибки розрахунку даних величин, значення яких представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Значення похибки контролю параметрів режиму, ПЯЕ та електроспоживання СЕП

| Рівень АСОЕ | Кількість вимірів | Діапазон зміни значень похибки, % | | |
|-------------|-------------------|--|--|--|
| | | контролю параметрів режиму $\Delta_{пр \min} \div \Delta_{пр \max}$ | контролю ПЯЕ $\Delta_{ПЯЕ \min} \div \Delta_{ПЯЕ \max}$ | контролю електроспоживання $\Delta_e \min \div \Delta_e \max$ |
| 1 | понад 70 | 0,01 ÷ 2,4 | 0,01 ÷ 2,5 | 0,02 ÷ 2,5 |
| 2 | понад 50 | 0,01 ÷ 2 | 0,01 ÷ 2,2 | 0,02 ÷ 2,5 |
| 3 | понад 30 | 0,005 ÷ 1,5 | 0,005 ÷ 1,8 | 0,01 ÷ 2,2 |
| 4 | понад 20 | 0 ÷ 1,5 | 0 ÷ 1,5 | 0,01 ÷ 2 |

Аналіз отриманих результатів дозволив зробити висновок про достовірність моделювання багаторівневої АСОЕ з контролем параметрів режиму, ПЯЕ та електроспоживання.

Висновки. Таким чином, отримана модель багаторівневої АСОЕ дозволяє з необхідною точністю прогнозувати значення параметрів режиму, ПЯЕ та електроспоживання СЕП, що є подальшим розвитком математичного моделювання автоматизованих інформаційно-керуючих систем. Застосування отриманої моделі багаторівневої АСОЕ в подальшому дозволить оптимізувати управління режимами СЕП та сприятиме підвищенню ефективності роботи АСОЕ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Єрмілов С.Ф. Енергетична стратегія України на період до 2030 року: проблемні питання змісту та реалізації / С.Ф. Єрмілов // Енергоінформ. - 2006. - № 48. - С. 3-4.
2. Козленко Л.Г. Енергетична політика ЄС в контексті забезпечення енергетичної безпеки / Л.Г. Козленко // Енергоінформ. - 2006. - № 31. - С. 4-5.
3. Праховник А.В. Керування режимами електроспоживання в умовах запровадження в Україні ринку двохсторонніх договорів та балансуєчого ринку / А.В. Праховник, О.В. Коцар // Енергетика та електрифікація: науково-виробничий журнал. - 2010. - № 2. - С. 42-52.
4. Черемисин Н.М. Автоматизація об'єктів управління електрообладнання / Н.М. Черемисин, В.М. Зубко. - Харків: "Факт", 2005. - 192 с.
5. Праховник А.В. Проблемы, препятствия и пути создания автоматизированных систем контроля и учета электрической энергии / А.В. Праховник, В.П. Калинин, В.И. Прокопец // Новини енергетики. - № 5. - 2007. - С. 51-55.
6. Лежнюк П.Д. Оптимальне керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах / П.Д. Лежнюк, В.В. Кулик. - Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. - 188 с.
7. Концепція побудови автоматизованих систем обліку електроенергії в умовах енергоринку / Затв. Спільним наказом Мінпаливенерго, НКРЕ, Держкоменергозбереження, Держстандарту, Держбуду та Держкомпромполітики України №32/28/28/276/75/54 від 17.04.2000р. - м. Київ.
8. Стандарти для створення інтегрованих систем управління електроенергетичними компаніями / А.В. Гінайло, І.М. Блощаневич, К.В. Ущатовський, П.О. Сергієнко, В.І. Васильченко, В.М. Людмирський, О.В. Сухомлінов. - Київ, НЕК «Укренерго», 2007. - 14 с.
9. Контроль потребления электроэнергии с учётом её качества / [Гриб О.Г., Васильченко В.И., Громадський Ю.С. и др.]; под. ред. Гриба О.Г. - Харьков: ХНУРЭ, 2010. - 444 с.
10. Ожегов А.Н. Системы АСКУЭ: Учебное пособие / А.Н. Ожегов. - Киров: Изд-во ВятГУ, 2006. - 102 с.

11. Емельянов В.Ю. Методы моделирования стохастических систем управления: Учебное пособие / В.Ю. Емельянов. - СПб: Балт. гос. техн. ун-т, 2004. - 168 с.
12. Афанасьев В.Н. Математическая теория конструирования систем управления: Учеб. для вузов / В.Н. Афанасьев, В.Б. Колмановский, В.Р. Носов. - 2-е изд., доп. - М.: Высш. шк., 1998. - 574 с.
13. Прохоров С.А. Математическое описание и моделирование случайных процессов / С.А. Прохоров. - Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2001. - 209 с.
14. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - Взамен ГОСТ 13109-87; введ. 01.01.2000 - К.: Изд-во стандартов, 1999. - 31 с.

REFERENCES

1. Yermilov, S.F. (2006), «Energy Strategy of Ukraine to 2030: issues of content and implementation», *Enerhoinform*, Vol. 48, pp. 3-4.
2. Kozlenko, L.H. (2006), «EU energy policy in the context of energy security», *Enerhoinform*, Vol. 31, pp. 4-5.
3. Prakhovnyk, A.V. and Kotsar, O.V. (2010), «Managing power consumption modes under implementation in Ukraine of the bilateral contracts and balancing market», *Enerhetyka ta elektryfikatsiya: nauково-vyrobnychyy zhurnal*, Vol. 2, pp. 42-52.
4. Cheremisin, N.M. and Zubko, V.M. (2005), *Avtomatyzatsiya ob'ektov upravleniya elektrosnabzheniya* [Automation of power management], Fakt, Kharkiv, Ukraine.
5. Prakhovnyk, A.V., Kalynchyk, V.P. and Prokopets, V.Y. (2007), «Challenges, obstacles and ways to create automated systems for control and accounting of electricity», *Novyny enerhetyky*, Vol. 5, pp. 51-55.
6. Lezhnyuk, P.D. and Kulyk, V.V. (2004), *Optymal'ne keruvannya potokamy potuzhnosti i napruhoju v neodnorodnykh elektrychnykh mrezhakh* [Optimal control of power flow and voltage in heterogeneous grids], UNIVERSUM-Vinnytsya, Vinnitsa, Ukraine.
7. (2000), *Kontseptsiya pobudovy avtomatyzovanykh system obliku elektroenerhii v umovakh enerhorynku* [The concept of automated accounting systems of electricity in energy], Kyiv, Ukraine.
8. Hinaylo, A.V., Bloschanevych, I.M., Ushchapovskyy, K.V., Serhiyenko, P.O., Vasilchenko, V.I., Lyudmyrskyy, V.M. and Sukhomlinov, O.V. (2007), *Standarty dlya stvorenniya intehrovanykh system upravlinnya elektroenerhetychnykh kompaniyamy* [Standards for the creation of integrated systems of electric power companies], NEK «Ukrenerho», Kyiv, Ukraine.
9. Grib, O.G., Vasilchenko, V.I., Gromadskiy, YU.S., Dovgalyuk, O.N., Manov, I.A., Rozhkov, P.P., Sapryka, V.A., Senderovich, G.A. and Shcherbakova, P.G. (2010), *Kontrol potrebleniya elektroenerhii s uchëtom yeyë kachestva* [Control electricity consumption for its quality], KHNURE, Kharkiv, Ukraine.
10. Ozhegov A.N. (2006), *Sistemy ASKUE* [AMR system], Izd-vo VyatGU, Kirov, Russia.
11. Yemelyanov, V.YU. (2004), *Metody modelirovaniya stokhasticheskikh sistem upravleniya* [Stochastic simulation methods of control systems], Balt. gos. tekhn. un-t, St. Petersburg, Russia.
12. Afanasyev, V.N., Kolmanovskiy, V.B. and Nosov, V.R. (1998), *Matematicheskaya teoriya konstruirovaniya sistem upravleniya* [Mathematical theory of control systems design], Vyssh. shk., Moscow, Russia.
13. Prokhorov, S.A. (2001), *Matematicheskoye opisaniye i modelirovaniye sluchaynykh protsessov* [Mathematical description and simulation of random processes], Samar. gos. aerokosm. un-t, Samara, Russia.
14. (1999), *HOST 13109-97. Élektrycheskaya énerhyya. Normy kachestva élektrycheskoy énerhyy v systemakh élektrosnabzheniya obshcheho naznachenyya* [GOST 13109-97. Electricity energy. The rules quality electricity energy systems appointment], Yzd-vo standartov, Kyiv, Ukraine.

Надійшла до редакції 09.04.2013

Рецензент: О.П.Ковальов

О.Н.ДОВГАЛЮК

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Математическая модель многоуровневой автоматизированной системы учета электрической энергии. Построена математическая модель многоуровневой автоматизированной системы учета электрической энергии, позволяющая с необходимой точностью прогнозировать значения параметров режима, показателей качества и электропотребления в электрической сети. Применение этой модели позволит оптимизировать управление режимами систем электроснабжения и повысить эффективность работы автоматизированных информационно-измерительных систем.

Ключевые слова: автоматизированная система учета электрической энергии, математическая модель, ковариация, математическое ожидание, дисперсия, управления контролем, критерий, точность контроля, параметр системы, параметр режима, оптимизация, система электроснабжения, электропотребление.

O. DOVGALYUK
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Mathematical model of multilevel automated accounting system of electrical energy. Advanced automated accounting systems of electrical energy are complex objects modeling with distributed structure. In the structure of the automated accounting systems of electrical energy four levels identified: primary measuring devices, collection devices and data preparation, personal computer or the server data and operations center, server data and operations center with specialized software. The relationship between them is determined. Based on the of analyzing the functions of automated accounting systems of electrical energy their parameters are divided into input, internal and output. The circuit process control governance automated accounting systems of electrical energy is composed. The problem of modeling classified as filtration. Equations that describe the state of the power supply system and process control over them were obtained. Mathematical expectation and covariance matrix of the parameter vector for the power supply system in the control of them automated accounting systems of electrical energy are found. The calculation of the electrical energy quality indicators assessment taking account of estimate obtained of regime parameter for the power supply system at time T is produced. The result is formed as of the matrix electrical energy quality indicators. Mathematical expressions for the criterion quality of the process regime parameters control and electricity consumption power supply system $J(v)$ and control governance $v(t)$ was obtained. The control governance is subject to restrictions, among which the most important is the accuracy of determination values of each parameter. The Pontryagin maximum principle is used for optimization process control. Conditions for the optimal control governance found to secure the required control accuracy parameters. The reliability of constructed mathematical model by comparing the simulation results with experimental data proved. Thus, the obtained mathematical model of multilevel automated accounting system of electrical energy with the required accuracy to predict the values of regime parameters, electrical energy quality indicators and electricity consumption for power supply system allows. The application of the model multilevel automated accounting system of electrical energy in the future to optimize the control regimes power supply system and improve the efficiency of the system will allow.

Key words: *automated accounting system of electrical energy, mathematical model, covariation, mathematical expectation, dispersion, control governance, criterion, control accuracy, system parameter, regime parameter, optimization, power supply system, electric power consumption.*