

УДК 629.5.03:004.942

doi: 10.32620/aktt.2022.4sup2.11

В. Ф. МИРГОРОД, І. М. ГВОЗДЕВА, В. В. БУДАШКО

НУ Одеська морська академія, Одеса, Україна

АПРОКСИМАЦІЙНО-МАРКІВСЬКІ МОДЕЛІ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИЛОВИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК У ДОВГОТРИВАЛІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Проектування та впровадження систем автоматичного керування зміною координат стану та вихідних змінних силових та енергетичних установок складається з декількох послідовних етапів, при виконанні яких широко застосовуються засоби математичного моделювання. Одним з найбільш важливих таких етапів є відпрацювання створеної системи (регулятора) на напівнатурному стенді. Такий стенд містить, як правило, створений зразок системи з фізично реалізованими вимірювальними каналами, а об'єкт керування та виконавчі пристрої виконуються у вигляді комп'ютерної математичної моделі реального часу (стенд-імітатор). Проблемним питанням є вирішення протиріччя між вимогами адекватності комп'ютерного експерименту реальним умовам експлуатації та можливостями стенду-імітатора, оскільки математична модель об'єкту керування є детермінованою. В реальних умовах мають місце випадкові збурення, що зумовлює випадковий характер вихідних вимірювальних координат об'єкту керування. Застосування відомих методів статистичного моделювання обмежено вимогами щодо стаціонарності, оскільки керовані об'єкти є багаторежимними. Вирішення вказаного протиріччя пропонується шляхом застосування нової інформаційної технології, яка складається в послідовному виконанні етапів попередньої апроксимації часових рядів відхилень таких змінних від сформованої апроксимаційної моделі, та етапу статистичного моделювання. В якості статистичної моделі випадкових процесів відхилень таких змінних від сформованої апроксимаційної моделі пропонується модель Марківського процесу, що враховує можливу корельованість вихідних даних. Оскільки вимірювальні канали сучасних систем управління є виключно цифровими, тому завдяки дискретизації за часом та рівнем, досліджувані процеси утворюють Марківський ланцюг, що дозволяє встановити важливі особливості таких процесів. Застосування апроксимаційної моделі забезпечує умови стаціонарності та коректність пропонованої моделі. Вирішено прикладне завдання моделювання зміни параметрів технічного стану багаторежимного технічного об'єкту в довготривалій експлуатації на основі запропонованої моделі та експериментальних даних.

Ключові слова: математичне моделювання; силові та енергетичні установки; апроксимація; статистична модель; Марківський процес.

Вступ

Методи математичного та комп'ютерного моделювання застосовуються в поточний час на всіх етапах життєвого циклу силових та енергетичних установок (СтаЕУ): при проектуванні, експлуатації та оцінці технічного стану для визначення можливості подальшого використання. Процеси керованої зміни стану в таких об'єктах забезпечуються відповідними системами автоматичного управління (САУ), для відпрацювання яких знайшли широке застосування комп'ютерні та напівнатурні стенди-імітатори. Застосування таких стендів дозволяє суттєво скоротити наступний етап стендових випробувань і, тим самим, зменшити витрати на його проведення. Проблемним питанням удосконалення стендів-імітаторів є необхідність підвищення рівня адекватності застосовуваних в них математичних моделей зміни стану СтаЕУ відповідно умовам експлуатації. Детерміновані математичні моделі процесів в

СтаЕУ, що застосовуються, за звичай, в стендах-імітаторах, не цілком відображають процеси в реальних об'єктах керування, що призводить до невідповідності отримуваних результатів щодо реальних. Тому дослідження методів та засобів удосконалення математичних моделей керованої зміни стану СтаЕУ, що враховують випадковий характер таких процесів, є актуальним та важливим науково-прикладним завданням.

1. Формулювання проблеми

Математичні моделі процесів керованої зміни стану СтаЕУ, засновані, за звичай, на кусково-лінійних динамічних моделях (КЛДМ), які в достатній мірі відображають динаміку керованих об'єктів для відпрацювання відповідних САУ.

Недоліком таких моделей є їх детермінований характер, тобто неможливість врахування випадкових впливів на зміну керованих змінних. Як наслідок

док, середньоквадратичне відхилення значень керованих координат за результатами випробувань на стенді-імітаторі і за результатами стендових випробувань на реальному об'єкті може суттєво відрізнятися навіть на усталених режимах. Причина таких суттєвих розходжень є в неврахуванні випадкового характеру процесів зміни стану СтаЕУ в реальних умовах.

Випадковий характер таких процесів є наслідком впливу декількох факторів. По-перше, має місце випадковий характер зовнішніх збурень, наприклад, для ГТД, температури та тиску заторможеного потоку на вході двигуна. По-друге, є внутрішні збурення, що зумовлені процесами перетворення енергії в об'єкті керування. По-третє, завжди існують шуми вимірювальних каналів. Найбільш суттєвими є перший та другий фактор, що потребує їх врахування при моделюванні.

Методи врахування випадкових збурень при статистичному моделюванні відомі, але їх безпосереднє застосування в стендах-імітаторах не є можливим, оскільки СтаЕУ є багаторежимними об'єктами, що не дає змогу забезпечити вихідні умови застосування відомих методів.

Методи побудови апроксимаційних моделей СтаЕУ на основі ГТД розглянуті в роботах авторів [1, 2]. Методика побудови Марківської моделі керованої зміни стану СтаЕУ на основі ГТД пропонується в [3]. Застосування вказаного підходу до СтаЕУ у вигляді судових дизель-генераторних установок пропонується в [4].

Метою пропонованого дослідження є вирішення вказаного протиріччя що пропонується шляхом застосування нової інформаційної технології, яка складається в послідовному виконанні етапів попередньої апроксимації часових рядів відхилень таких змінних від сформованої апроксимаційної моделі, та етапу статистичного моделювання. В якості статистичної моделі випадкових процесів відхилень таких змінних від сформованої апроксимаційної моделі пропонується модель Марківського процесу, що враховує можливу корельованість вихідних даних. Застосування апроксимаційної моделі забезпечує умови стаціонарності та коректність пропонованої моделі.

2. Вирішення проблеми

2.1. Апроксимаційна модель

За умови багаторежимності об'єкту, перший етап пропонованої інформаційної технології становить побудова відповідної об'єкту апроксимаційної моделі. Така модель відображає статичні характеристики (СХ) об'єкту керування, тобто залежності ви-

хідних змінних від керуючих впливів в усталених режимах. Такі залежності, за звичай, називають дросельними характеристиками.

Якщо вони відомі, то їх характер наведено в паспортних даних конкретного об'єкту.

Якщо вони невідомі, то такі залежності встановлюються безпосередньо по даним експлуатації шляхом регресійного аналізу.

Таким чином ми отримуємо залежності вихідних змінних від керованих впливів та навантажень на можливих режимах експлуатації.

За звичай, такі характеристики мають поліноміальний характер. Автори застосовували також більш складні моделі у вигляді нейронної мережі, що мають дещо кращі результати.

Застосування апроксимаційної моделі дозволяє врахувати багаторежимність об'єкту та в наступному розглядати тільки випадкові відхилення від моделі, які становлять часові ряди, властивості яких дозволяють застосувати методи статистичного моделювання.

2.2. Статистичне моделювання

При статистичному моделюванні випадкових процесів вихідною гіпотезою є належність до вибірки з генеральної сукупності незалежних некорельованих випадкових величин з деяким відомим законом розподілу, за звичай, нормальним розподілом. Методи такого моделювання за допомогою нелінійного перетворення відліків випадкових величин рівномірного розподілу відомі.

Але така гіпотеза щодо некорельованості на практиці не задовольняється.

Оскільки в стендах-імітаторах застосовуються КЛДМ, то при наявності випадкових збурень нормального характеру породжуваний випадковий процес є Марківським [3]

В усталених режимах СтаЕУ міжвідлікова корельованість є наслідком наявності тренду у вихідних даних.

Тому прийняття гіпотези щодо Марківського характеру процесів в СтаЕУ має деякі переваги щодо підвищення рівня адекватності статистичного моделювання.

Вимірювальні канали вихідних змінних СтаЕУ в поточний час є виключно цифровими. Тому вихідні дані при статистичному моделюванні завжди є дискретизованими як за часом, так і за рівнем. Параметри дискретизації встановлюються застосовуваним методом аналого-цифрового перетворення, зокрема розрядністю АЦП.

За умови такої дискретизації моделлю породжуваного процесу є Марківський ланцюг. Розмірність матриці перехідних ймовірностей може бути

досить великою, але в поточний час це не є суттєвим чинником. За необхідністю таку розмірність можна скоротити примусовим розбиттям діапазону зміни модельованої змінної на встановлену кількість інтервалів, ширина яких обумовлена метою моделювання.

За властивостями Марківського ланцюга, фінішна матриця ймовірностей переходів формується як деяка ступінь від матриці перехідних ймовірностей, що дозволяє побудувати купол ймовірностей для керованих Марківських процесів, вигляд якого може бути важливою діагностичною ознакою.

Таким чином, алгоритм пропонованого статистичного моделювання має наступний вигляд:

- розглядаються часові ряди деякої вихідної змінної СтаЕУ на протязі довготривалого періоду у сукупності з часовим рядом зміни регульованої змінної або навантаження;
- формується регресійна модель відповідних змінних відомими методами;
- перевіряється гіпотеза стаціонарності отриманого часового ряду відхилень від регресійної моделі за допомогою відомих критеріїв, наприклад, критерію Кохрейна;
- за необхідністю виконується дискретизація за рівнем з кроком, що обумовлений метою моделювання;
- для часового ряду відхилень отримується матриця перехідних ймовірностей Марківського ланцюга;
- будується матриця фінішних ймовірностей та, за необхідністю, купол ймовірностей для керованого Марківського процесу;
- для завдань моделювання в стенді-імітаторі отримані ймовірнісні залежності використовуються для формування вибірок випадкових збурень або модельованих змінних, а для діагностичних завдань є основою для формування статистично обґрунтованих висновків щодо ймовірності відхилень перебігу змінних від паспортних характеристик.

2.3. Прикладне завдання

Для тестування пропонованого підходу вирішене прикладне завдання побудови апроксимаційно-марківської моделі температурного режиму дизель-генераторної установки (ДГУ) на протязі довготривалої експлуатації.

Як вихідні дані розглядалися параметри подорожної реєстрації режимів роботи та технічного стану судових дизель-генераторних установок у процесі їхньої тривалої експлуатації на реальному об'єкті. Збір статистичних даних про технічний стан судових ДГУ балкера NORDSCHELDE водозміщенням 50000 т. проводився в період з 16.10.2017 р. по

27.03.2018 р. в різних режимах роботи судна (ходовому, маневреному, стоянковому з вантажними операціями). Досліджувана суднова електроенергетична система (СЕЕС) складалася з трьох ДГУ, у складі яких використано дизельні двигуни моделі 6EY18L виробника YANMAR та генератори виробника HYUNDAI. Параметри ДГУ контролювалися двома системами моніторингу: EPM (Enamor Power Monitor) та Kongsberg K-Chief 600. Система EPM контролює та аналізує електроенергетичні параметри, що виробляються синхронними генераторами (напруга, силу струму, частоту, потужність, коефіцієнт потужності тощо). Передача отриманих даних здійснюється за стандартом RS 485 у форматі NMEA (National Marine Electronics Association) іншим судовим системам моніторингу, у тому числі основній системі моніторингу Kongsberg K-Chief 600. Ця система контролює діагностичні параметри, за якими визначається технічний стан судових ДГУ. До таких параметрів відносяться: температура газів циліндрів, температура газів на вході в турбо-нагнітач, температура контуру охолодження прісною водою на вході і виході та інші.

Для фіксації значень діагностичних параметрів судових ДГУ було створено спеціальну електронну таблицю, до якої кожні 24 години заносилися поточні значення. Систематизація отриманих даних дозволила сформувати загальний масив, що складається з 30 векторів параметрів, кожен завдовжки 162 значення. Селекція даних дозволила виділити зміну 17 параметрів одного з ДГУ найбільшою тривалістю його роботи зі 101 добового зрізу.

На рис. 1-6 наведено результати реалізації пропонованого підходу. Вихідні дані та апроксимаційна модель представлені на рис. 1-3.

Рис. 4 ілюструє вихідні дані для побудови Марківської моделі – часовий ряд відхилень від апроксимаційної моделі, а рисунок 5 – поверхню матриці емпіричних перехідних ймовірностей відповідно до алгоритму формування статистичної моделі Марківського ланцюга. Дискретизація за рівнем обрана як ілюстративна в 10 градусів.

Для перевірки адекватності обраного підходу побудовані фінішні розподіл перехідних ймовірностей та згенеровано відповідну вибірку даних у порівнянні з емпіричним розподілом, отриманим відомими методами оцінки розподілу та вихідною вибіркою. Відповідні результати наведено на рис. 6.

Як це встановлено за результатами статистичного експерименту, розходження між фінішним розподілом перехідних ймовірностей Марківської моделі та емпіричним розподілом, отриманим відомими статистичними методами, не є статистично значимим на рівні довірчої ймовірності 0,95 за відомими критеріями.

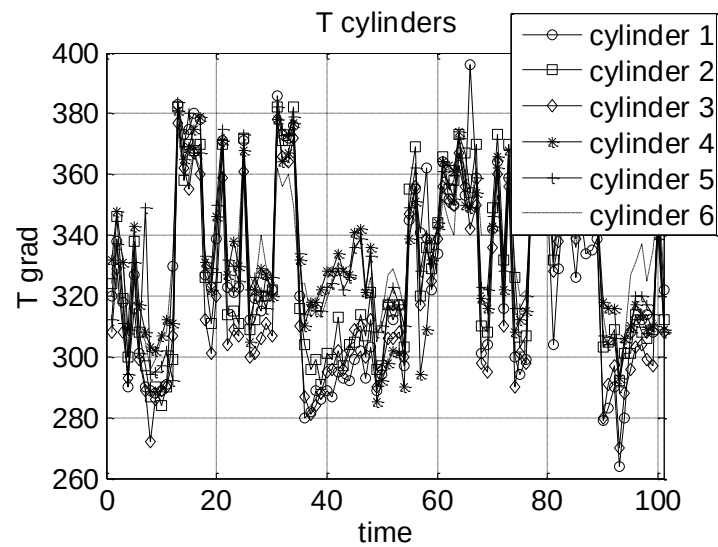


Рис. 1. Часовий ряд зміни температури вихідних газів ДГУ

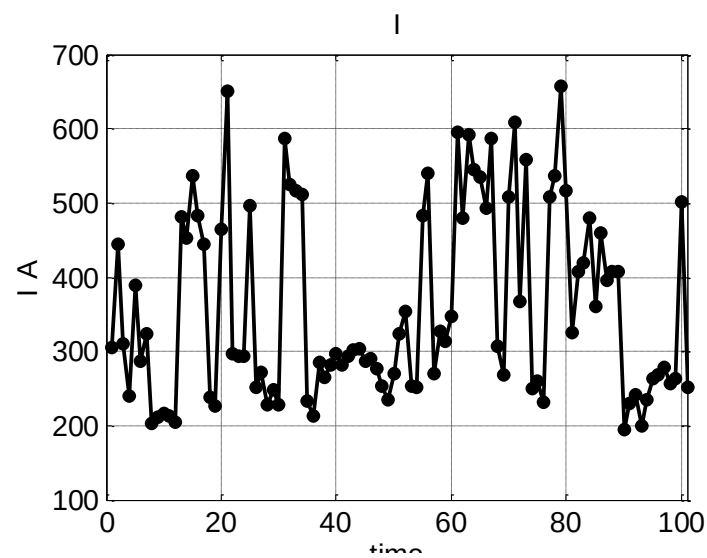


Рис. 2. Часовий ряд зміни струму навантаження ДГУ

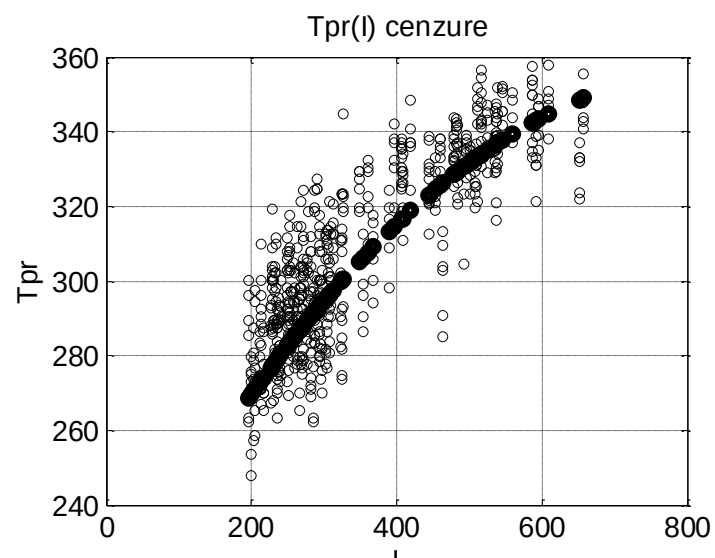


Рис. 3. Апроксимаційна модель

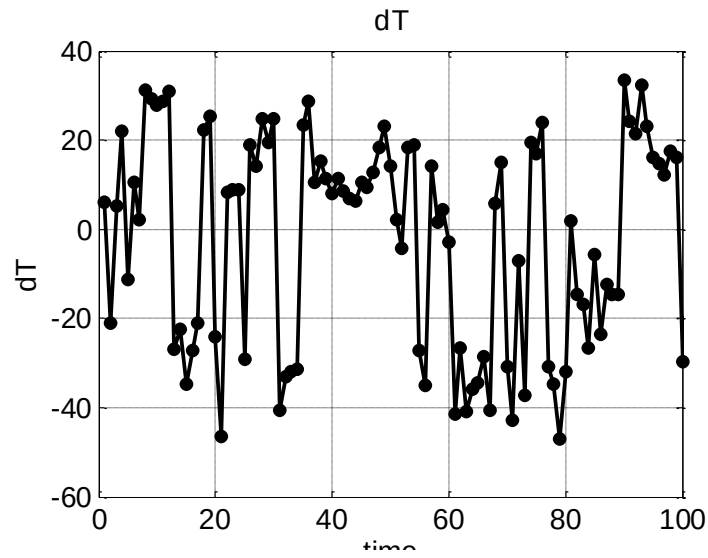


Рис. 4. Часовий ряд відхилень температури вихідних газів ДГУ від апроксимаційної моделі для першого циліндру

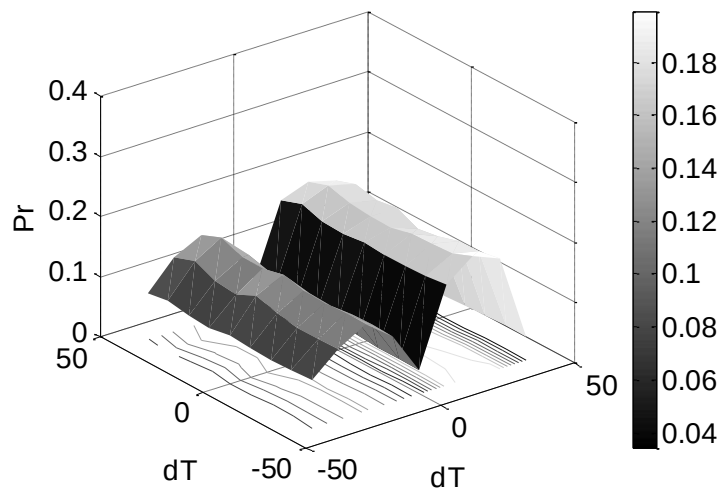


Рис. 5. Поверхня матриці емпіричних перехідних ймовірностей

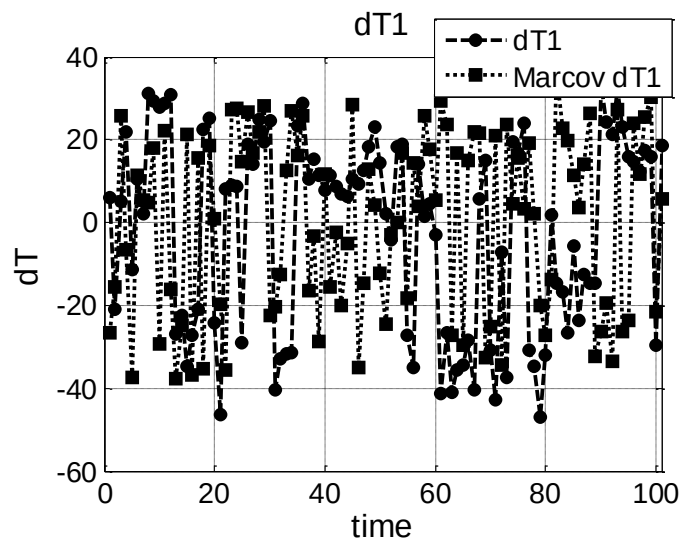


Рис. 6. Часові ряди фактичних та змодельованих відхилень температури

Тому можна вважати, що запропонована модель є адекватною вихідним даним за запропонованим підходом.

Висновки

Мета запропонованого дослідження у вигляді підвищення адекватності моделей зміни стану СтаЕУ з урахуванням випадкових чинників досягнута шляхом застосування нової інформаційної технології, яка складається в послідовному виконанні етапів попередньої апроксимації часових рядів відхилень таких змінних від сформованої апроксимаційної моделі, та етапу статистичного моделювання. Статистична модель формування випадкових процесів відхилень таких змінних від сформованої апроксимаційної моделі є моделлю Марківського процесу. Застосування апроксимаційної моделі розширює можливості методу статистичного моделювання щодо забезпечення умов стаціонарності та коректність запропонованої моделі.

Перспективи подальших досліджень пропонуються у застосуванні математичних моделей керування Марківських процесів.

Література

1. Hvozdeva, I. *The Method of Trend Analysis of Parameters Time Series of Gas-turbine Engine State [Text]* / I. Hvozdeva, V. Myrhorod, Y. Derenh // *AMiTaNS'17, AIP Conf. Proc. edited by M. D. Todorov. – American Institute of Physics, Melville, NY, 2017. – Vol. 1895. – P. 030002-1-030002-9. DOI: 10.1063/1.5007361.*
2. Myrhorod, V. *Two-dimensional trend analysis of time series of complex technical objects diagnostic parameters [Text]* / V. Myrhorod, I. Hvozdeva, Y. Derenh // *11th International Conference for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences - AMiTaNS'19, AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2164, iss. 1. – Article No. 060013. – P. 040011-1-040011-12. DOI: 10.1063/1.5130815.*

3. Breikin, T. *Application of Markov chains to identification of gas turbine engine dynamic models [Text]* / T. Breikin, V. Arkov, G. Kulikov // *International Journal of Systems Science. – 2006. – Vol. 37, Iss. 3 – P. 197–205. DOI: 10.1080/00207720600566065.*

4. Zhengmao, Y. *Simple Engine Exhaust Temperature Modeling and System Identification Based on Markov Chain Monte Carlo [Text]* / Y. Zhengmao, H. Mohamadian // *Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 598. – P. 224-228. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.598.224.*

References

1. Hvozdeva, I., Myrhorod, V., Derenh, Y. *The Method of Trend Analysis of Parameters Time Series of Gas-turbine Engine State. AMiTaNS'17, AIP Conf. Proc. edited by M. D. Todorov. American Institute of Physics, Melville, NY, 2017, vol. 1895, pp. 030002-1 – 030002-9. DOI: 10.1063/1.5007361.*
2. Myrhorod, V., Hvozdeva, I., Derenh, Y. *Two-dimensional trend analysis of time series of complex technical objects diagnostic parameters. 11th International Conference for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences - AMiTaNS'19, AIP Conference Proceedings, 2019, vol. 2164, iss. 1, article no. 060013. pp. 040011-1 – 040011-12. DOI: 10.1063/1.5130815.*
3. Breikin, T., Arkov, V., Kulikov, G. *Application of Markov chains to identification of gas turbine engine dynamic models. International Journal of Systems Science, 2006, vol. 37, iss. 3, pp. 197–205. DOI: 10.1080/00207720600566065.*
4. Zhengmao, Ye, Habib, Mohamadian. *Simple Engine Exhaust Temperature Modeling and System Identification Based on Markov Chain Monte Carlo. Applied Mechanics and Materials, 2014, vol. 598, pp. 224-228. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.598.224.*

Надійшла до редакції 12.06.2022, розглянута на редколегії 8.08.2022

APPROXIMATION - MARKOV MODELS OF CHANGES IN THE TECHNICAL CONDITION PARAMETERS OF POWER AND ENERGY INSTALLATIONS IN LONG-TERM OPERATION

Volodymyr Myrhorod, Iryna Hvozdeva,
Vitalii Budashko

The design and implementation of systems for automatic control of changes in the coordinates of the state and the output variables of power and energy installations consist of several successive stages, which implementation is widely used mathematical modeling. One of the most important such stages is the development of the created sys-

tem (regulator) on a semi-natural stand. Such a stand usually contains a sample of a system with physically implemented measuring channels, and the control object and actuators are made in the form of a real-time computer mathematical model (stand-simulator). The problem is to resolve the contradiction between the requirements of the adequacy of the computer experiment to the real operating conditions and the capabilities of the simulator stand because the mathematical model of the control object is deterministic. In real conditions, there are random disturbances, which determine the random nature of the original-measuring coordinates of the control object. The use of known statistical modeling techniques is limited by the stationary requirements because the controlled objects are multi-mode. A solution to this contradiction is proposed by applying new information technology, which consists of the consistent implementation of the stages of preliminary approximation of time series of deviations of such variables from the formed approximation model, and the stage of statistical modeling. As a statistical model of random processes of deviations of such variables from the formed approximation model, the Markov process model is proposed, which considers the possible correlation of the initial data. The application of the approximation model provides the conditions of stationary and correctness of the proposed model. The applied problem of modeling the change of parameters of the technical conditions of a multi-mode technical object in long-term operation on the basis of the proposed model and experimental data is solved.

Keywords: mathematical modeling; power and energy installations; approximation; statistical model; Markov process.

Миргород Володимир Федорович – д-р техн. наук, проф., НУ «Одеська морська академія», Одеса, Україна.

Гвоздева Ірина Маратівна – д-р техн. проф., НУ «Одеська морська академія», Одеса, Україна.

Будашко Віталій Віталійович – д-р техн. проф., НУ «Одеська морська академія», Одеса, Україна.

Volodymyr Myrhorod – Doctor of science, Professor at Odesa Maritime Academy, Odesa, Ukraine, e-mail: v.f.mirgorod@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8361-1672.

Iryna Gvozdeva – Doctor of science, Professor at Odesa Maritime Academy, Odesa, Ukraine, e-mail: onopchenko.im@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5797-0559.

Vitalii Budashko – Doctor of science, Professor at Odesa Maritime Academy, Odesa, Ukraine, e-mail: bvv@te.net.ua, ORCID: 0000-0003-4873-5236.