

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КОМУТАЦІЇ СПОЖИВАЧІВ В АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

В. М. Рябенський, проф., д-р техн. наук;
О. О. Ушкаренко, доц., канд. техн. наук;
Аль-Суод Махмуд Мохаммад, асп.;
Халед Омар Ганнам, асп.

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. Виконано розробку алгоритмів імітаційного моделювання процесів комутації споживачів електроенергії в автономних електроенергетичних установках. Розроблено алгоритми та програмні засоби для автоматизації процесу отримання діаграми роботи кожного із споживачів з метою короткострокового прогнозування навантаження автономної електростанції.

Ключові слова: імітаційне моделювання, випадковий процес, комутація навантаження, діаграма роботи.

Аннотация. Выполнена разработка алгоритмов имитационного моделирования процессов коммутации потребителей электроэнергии в автономных электроэнергетических установках. Разработаны алгоритмы и программные средства для автоматизации процесса получения диаграммы работы каждого из потребителей с целью краткосрочного прогнозирования нагрузки автономной электростанции.

Ключевые слова: имитационное моделирование, случайный процесс, коммутация нагрузки, диаграмма работы.

Abstract. The development of process simulation algorithms concerning commutation of consumers of electricity in stand-alone electric power plants is carried out. Algorithms and software tools for the automation of obtaining diagrams process for all the consumers in order to predict stand-alone electric power plant capacity in a short-term have been developed.

Keywords: simulation, random process, capacity commutation, work diagram.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

До одного з показників якості електроенергії належать провали напруги, що виникають при комутації потужних споживачів електроенергії в автономних електроенергетичних системах, у тому числі суднових. Якість електричної енергії дуже впливає на технологічні процеси. Робота електродвигунів різних механізмів, мікропроцесорної техніки,

автоматизованих систем управління виробничим процесом і систем телекомунікацій, блоків цифрових пристроїв часто переривається дуже короткими за тривалістю провалами і сплесками напруги мережі живлення. За останній час підвищенню надійності та якості електроенергії в автономних електроенергетичних системах (АЕЕС) приділяється велика увага [1, 2, 4]. У роботі [5]

розглянута методика статистичного аналізу сплесків та провалів напруги, однак не розглянуті особливості моделювання таких процесів та процедури створення діаграм роботи споживачів електроенергії.

МЕТОЮ СТАТТІ є розробка алгоритмів моделювання процесів комутації навантаження в автономній електроенергетичній системі з метою побудови діаграм роботи окремих споживачів та отримання добового графіка навантаження АЕЕС для визначення статистичних характеристик сплесків та провалів потужності.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Однією з причин появи провалів та сплесків напруги є зміна навантаження автономної електростанції, особливо при пуску потужних асинхронних двигунів. Принциповим аспектом роботи автономної електроенергетичної системи є випадковий характер вхідного потоку заявок на комутацію навантаження. У даному випадку під заявкою розуміється сигнал на вмикання або вимикання споживача електроенергії, наприклад асинхронного двигуна.

Отже, адекватною моделлю такого процесу буде система масового обслуговування, яка характеризується стохастичним процесом $x(t)$ з дискретною

множиною значень, що утворюють безперервний ланцюг Маркова:

$$\Pr[X(t) = j | X(\tau) \text{ for } (\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2 \leq t)] = \\ = \Pr[X(t) = j | X(\tau_2)].$$

Оскільки в даному випадку розглядаються події вмикання та вимикання споживачів електроенергії, можна припустити, що їх тривалість роботи підпорядковується показниковому закону розподілення. Таке розподілення тривалості заявок на комутацію навантаження має марковську властивість — відсутність післядії (пам'яті). Відповідно, імовірність завершення обслуговування виклику на малому інтервалі часу має вигляд

$$P(t, t + \Delta t) = \mu \Delta t + f(\Delta t)$$

і не залежить від положення цього інтервалу на осі часу.

Оскільки всі досліджувані процеси в системі мають марковські властивості, то всі потоки заявок, що переводять систему з одного стану в інший, є пуассонівськими (в даному випадку під різними станами розуміється режим роботи електросистеми з різною потужністю, що генерується силовими агрегатами і, відповідно, споживається навантаженням).

Для спрощення аналізу системи будемо розглядати весь потік заявок на комутацію навантаження як сигнали, що надходять на деякий комутатор в автономній електроенергетичній системі (рис. 1).

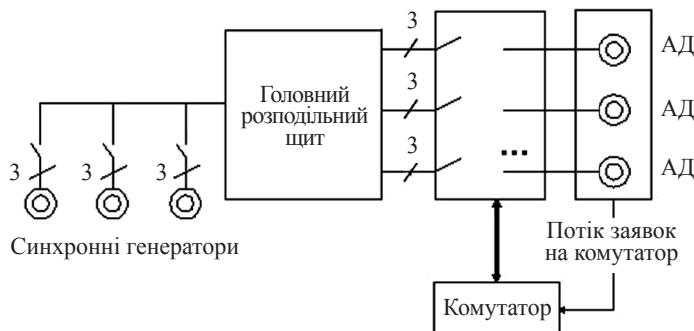


Рис. 1. Структура АЕЕС для імітаційного моделювання процесу комутації навантаження

Добовий графік навантаження АЕЕС розбивається на часові інтервали Δt тривалістю 10 хв. Час обробки заявки диспетчером (тривалість перехідного процесу після комутації навантаження) складає кілька одиниць секунд і значно менший, ніж тривалість роботи споживача.

У рамках теорії булевих функцій кожний елемент системи може мати лише два стани — увімкнений чи вимкнений [3]. Відзначимо, що булева функція — це функція, аргументи якої, як і сама функція, набувають значень із множини, що складається з двох елементів [0, 1].

При побудові булевих моделей приймається припущення, згідно з яким миттєві стани елементів (у даному випадку стан навантаження — увімкнений чи вимкнений) однозначно задають стан системи в той самий момент часу. Кожному i -му елементу присвоюється булева змінна

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i\text{-й елемент увімкнений,} \\ 0, & \text{якщо } i\text{-й елемент вимкнений.} \end{cases}$$

Функціонування всієї електроенергетичної системи інтерпретується як випадковий процес, що в кожний момент часу для кожного навантаження набуває значення 1 або 0. Поведінка i -го елемента ($i = 1, 2, \dots, N$) описується випадковим процесом $y_i(t)$.

Перехід з одного стану системи в інший описується випадковою величиною, що має своє розподілення $F_k(t)$ для кожного k -го стану. Для марковського процесу всі розподілення $F_k(t)$ є експоненціальними.

Марковський ланцюг зручно описувати орієнтованим графом, ваги ребер якого відповідають інтенсивності переходу з одного стану в інший. Знаючи перехідні ймовірності p_{ij} та параметр λ_i розподілення $K_i(t)$ часу перебування процесу в i -му стані, можна знайти ваги ребер за формулою

$$\lambda_{ij} = p_{ij} \lambda_i.$$

Метод графа станів з енергетичної точки зору є найбільш універсальним методом побудови структурних схем для дослідження діаграми навантаження АЕЕС. Суттєвою перевагою цього методу є можливість моделювання процесів комутації навантаження та визначення статистичних характеристик таких процесів з метою оперативного короткострокового планування навантаження АЕЕС та резервування потужності.

Розглянемо систему, що складається з одного генератора та одного споживача електроенергії — асинхронного двигуна (АД). Цей приклад дозволяє розглянути методологічні підходи до аналізу функціонування енергосистеми та побудови в подальшому діаграми навантаження. Отже, асинхронний двигун може знаходитися у двох станах: S_1 — вимкнений, S_2 — увімкнений. На рис. 2 наведено граф станів енергосистеми.

Перехід зі стану S_1 у стан S_2 відбувається за принципом однорідного марковського процесу з інтенсивністю λ . Перехід із стану S_2 в стан S_1 відбувається з інтенсивністю μ .

Імовірність того, що в момент часу $\tau + \Delta t$ навантаження знаходиться в стані S_1 (вимкнене), оцінюється наступним алгоритмом. У стані S_1 енергоблок по закінченні часу $\tau + \Delta t$ може знаходитися з двох причин:

у момент часу τ він знаходився в стані S_1 і не перейшов до стану S_2 за проміжок Δt ;

у момент часу τ енергоблок знаходився у стані S_2 і за період часу Δt перейшов у стан S_1 .

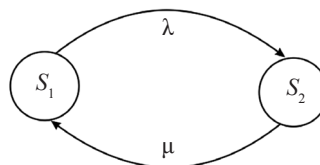


Рис. 2. Граф станів енергосистеми

Імовірність знаходження енергоблока в стані S_1 визначається добутком $P_1(\tau)$ на імовірність $(1 - \lambda\Delta\tau)$ того, що енергоблок не перейшов у стан S_2 за проміжок часу $\Delta\tau$. Аналогічно визначається ймовірність знаходження енергоблока в стані S_2 : $P_2(\tau)\mu\Delta\tau$. Використовуючи правила додавання ймовірностей, знайдемо:

$$P_1(\tau + \Delta\tau) = P_1(\tau)(1 - \lambda\Delta\tau) + P_2(\tau)\mu\Delta\tau.$$

Перетворимо це рівняння до вигляду

$$\frac{P_1(\tau + \Delta\tau) - P_1(\tau)}{\Delta\tau} = -\lambda P_1(\tau) + \mu P_2(\tau).$$

Подібні рівняння можна скласти для кожного стану графа. При цьому граф станів буде описуватися системою диференціальних рівнянь і їх кількість дорівнює кількості станів на графі. Отже, для графа на рис. 2 можна записати:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{d\tau} = -\lambda P_1 + \mu P_2, \\ P_1 + P_2 = 1. \end{cases}$$

Граф станів формується на основі послідовних процедур перетворення функціональної схеми енергоблока в структурну схему.

Розглянемо енергосистему, що складається з двох генераторів та визначеної кількості споживачів. За наявності достатньої кількості резерву потужності (в цьому режимі включені не всі споживачі) на навантаження працює лише один генератор, а другий знаходиться в резерві. При нестачі потужності, що генерується, другий генератор вводиться на паралельну роботу з першим генератором і бере на себе частину навантаження.

Задачею імітаційного моделювання в даному випадку є побудова алгоритму поведінки підсистем та окремих елементів системи генераторів у часі. Цей алгоритм може бути реалізований у вигляді програми.

Потоком випадкових подій у даному випадку є заявки на підключення (відключення) генератора на паралельну

роботу з іншим генератором. Статистична обробка цієї інформації дозволяє отримати статистичні оцінки показників ефективності. Спеціальним чином генерується вхідний потік заявок, причому момент появи кожної заявки є випадковою подією. Блок-схема алгоритму програми імітації роботи системи наведена на рис. 3, а.

На рисунку позначено: t_i — момент появи заявки; t'_i — момент завершення обслуговування; T_i — тривалість обслуговування.

Модель системи являє собою сукупність моделей елементів, і для розглядуваної задачі під моделлю елемента системи розуміється набір правил поведінки елемента по відношенню до вхідних викликів та зміна станів елемента. Метою імітаційного моделювання є:

відтворення поведінки навантаженої в процесі роботи електроенергетичної системи;

накопичення статистичних даних про роботу кожного асинхронного двигуна;

подальша статистична обробка цих даних для отримання статистичних оцінок кількісних характеристик.

Таким чином, процес імітації роботи енергосистеми і зміни її станів виконується з використанням керуючих послідовностей, що визначаються за функціями розподілення ймовірностей вихідних випробувань. Загальний алгоритм проведення моделювання наведено на рис. 3, б.

На практиці, при роботі реальної системи існують випадкові фактори, які призводять до зміни станів системи. Загалом, ці фактори визначаються технологічним процесом, електроживлення якого забезпечує АЕЕС, часом доби, структурою електроенергетичної системи. Генератор випадкових величин видає незалежні, рівномірно розподілені в заданому діапазоні випадкові величини. Оскільки розглядається задача короткострокового прогнозування на-

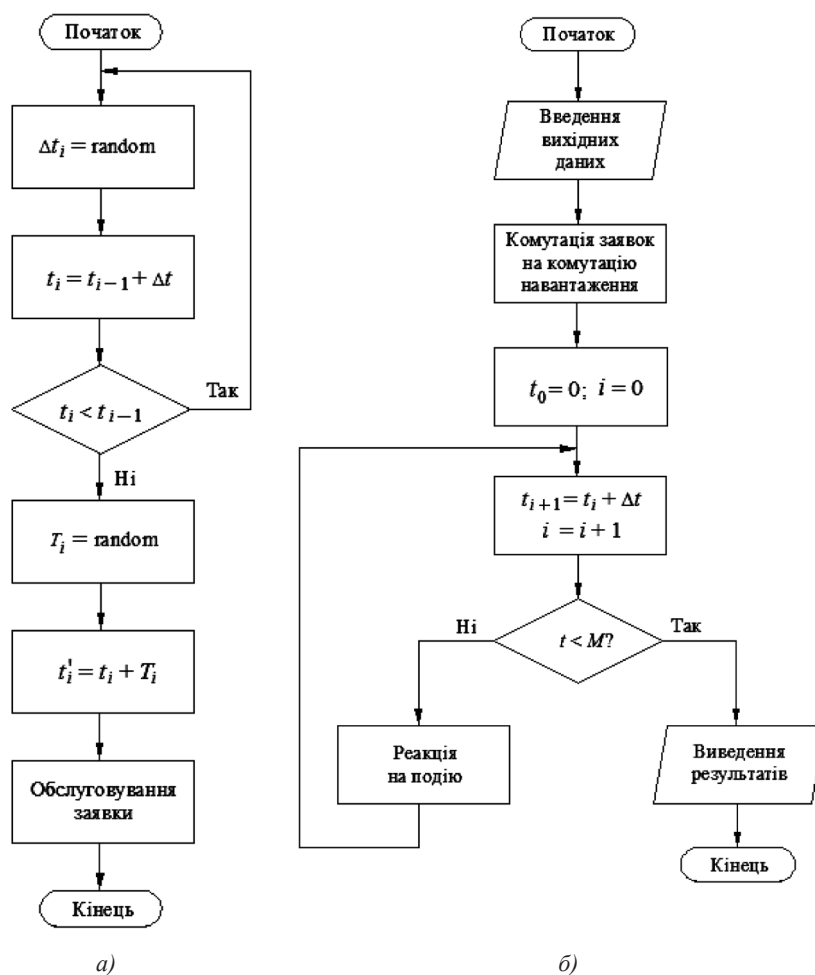


Рис. 3. Блок-схеми алгоритмів: а — алгоритм імітації роботи системи; б — загальний алгоритм проведення моделювання

вантаження АЕЕС (протягом доби), то кількість дискретних інтервалів часу протягом доби складає $24 \cdot 6 = 144$.

Крок дискретного часу складає 10 хв, отже генерується масив випадкових чисел, що розподілені в інтервалі часу від 0 до 24 год, тобто число з діапазону $[0 \dots 144]$. Це значення визначає момент часу, коли буде відбуватися комутація навантаження. Крім того, генерується друге випадкове значення, яке визначає тривалість роботи навантаження. Якщо цю процедуру повторити декілька разів, то для кожного

окремого навантаження отримаємо добовий графік роботи.

За принципом суперпозиції сумарне навантаження можна розрахувати шляхом додавання потужності, що споживається повним навантаженням. Це і буде вихідними даними для побудови добового графіка навантаження АЕЕС. На рис. 4 наведено інтерфейс програми, яка дозволяє автоматизувати процес отримання діаграми роботи кожного із споживачів електроенергії. Програма створена з використанням розроблених алгоритмів (див. рис. 3).

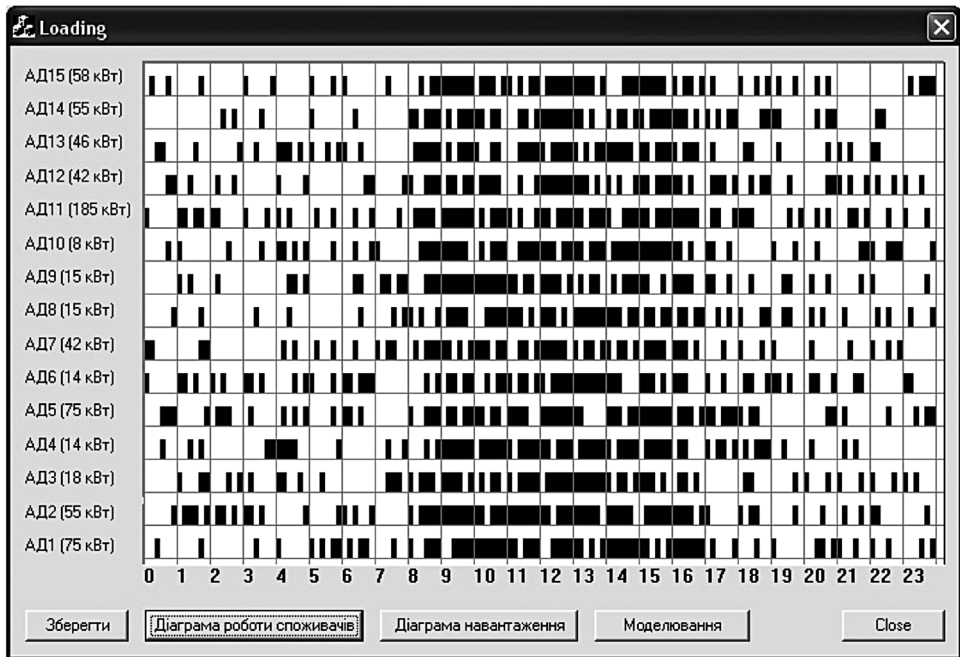


Рис. 4. Інтерфейс програми моделювання роботи споживачів

ВИСНОВКИ

Кожен споживач електроенергії характеризується своєю діаграмою роботи, яка не залежить від режимів роботи інших споживачів. Процеси комутації навантаження в електроенергетичній системі мають випадковий характер. Тому для досягнення поставленої в роботі мети були використані методи теорії масового обслуговування та марковські процеси. Розроблені алгоритми імітаційного моделювання процесу комутації навантаження в АЕЕС реалізовані у вигляді програми. У результаті імітаційного моделювання були отримані індивідуальні діаграми роботи споживачів.

У добовому графіку навантаження АЕЕС є екстремуми, обумовлені підключенням навантаження в експлуатаційних режимах, виявлення яких необхідне для попередження несприятливих умов роботи електроприймачів.

Чим більш рівномірний графік навантаження, тим краще використання силових агрегатів протягом доби, що приводить до зменшення витрат палива та вартості вироблення електроенергії. Розроблені програмні засоби дозволяють виконати корегування діаграм роботи окремих споживачів з метою мінімізації відхилень часових навантажень від максимального навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Карташев, И. И.** Управление качеством электроэнергии [Текст] / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов [и др.]. — М. : Изд. дом МЭИ, 2006. — 320 с.

- [2] **Куско, А.** Качество энергии в электрических сетях [Текст] / А. Куско, М. Томпсон. — М. : Изд. дом «Додека – XXI», 2008. — 336 с.
- [3] **Новиков, П. С.** Элементы математической логики [Текст] / П. С. Новиков. — М. : Наука, 1973.
- [4] **Прокопчик, В. В.** Повышение качества электроснабжения и эффективность работы электрооборудования предприятий с непрерывными технологическими процессами [Текст] / В. В. Прокопчик. — Гомель : Гомельский гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, 2002. — 210 с.
- [5] **Рябенський, В. М.** Методика статистичного дослідження сплесків потужності в автономних електростанціях [Текст] / В. М. Рябенський, О. О. Ушкаренко, Нгуєн Ван Тхань // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2009. — № 6(429). — С. 135–141.

© В. М. Рябенський, О. О. Ушкаренко,
Аль-Суод Махмуд Мохаммад,
Халед Омар Ганнам

Надійшла до редколегії 11.11.2011
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *Г. В. Павлов*