

випадку вагомими є також такі фактори, як зручність експлуатації, підвищення надійності і безперебійності електропостачання.

Шунтування реакторів є практично найбільш прийнятним виходом у прагненні проєктувальників знайти економічно вигідну границю між зниженням струмів КЗ і доступними значеннями рівня різних видів перенапруги.

*2. Анализ подходов к решению проблемы ограничения токов короткого замыкания в производственных и энергетических системах / В.П.Розен, В.И.Тарадай, Л.И.Несен и др. – К., 1999. – 18 с. – Деп. в ГНТБ Украины. 2. Обзор математических моделей электрической дуги / В.П.Розен, В.И.Тарадай, В.А.Побигаил. – К., 1999. – 8 с. – Деп. в ГНТБ Украины.*

УДК 621.313

Р. Селепина, М. Лябук

Луцький державний технічний університет

## **ПРИНЦИП ЕКСПОНЕНЦІАЛЬНОГО ЗГЛАДЖУВАННЯ, ЯК ЗАСІБ МІНІМІЗАЦІЇ ПРИ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ЗАХОДАХ**

© Селепина Р., Лябук М., 2001

**Розглянуто застосування принципу експоненціального згладжування для математичного моделювання процесів в електротехнічних пристроях і системах. Запропонований метод, що дає можливість зменшити витрати при експлуатації за допомогою регулювання за статистичним критерієм, який враховує середньоквадратичне відхилення і математичне сподівання контрольованої величини та проводить прогноз зміни ситуації в регульованій системі. Метод рекомендується, як засіб енергозбереження.**

**It is Considered using the principle of exponential smoothing for mathematical modeling of processes in electrotechnical devices and systems. Offered method enables to reduce expenses at usages by regulation on statistical criterion, which takes into account the gnadratic mean deflection mean of controlled parameter of value. The method allows to forecast change to situations in controlled system and can be recommended as facility preserve energy.**

При проведенні енергозаощаджувальних заходів в електротехнічних пристроях і системах, необхідних для прийняття оперативних дій при регулюванні напруги, графіків навантаження споживачів електричної енергії, включенні пристроїв компенсації реактивної енергії, потрібно застосовувати методи оцінки та прогнозування процесів, які відбуваються в цих пристроях та системах. Для якісної оцінки параметрів перехідних процесів, характер зміни яких в електротехнічних пристроях і системах є випадковим і підпорядковується законам статистичного розподілу, можна застосувати принцип експоненціального згладжування, запропонований Р. Брауном [1].

Принцип експоненціального згладжування дозволяє дати характеристику контрольованого процесу за параметрами, які мають статистичну оцінку, тобто можна регулювати ці

параметри за статистичними критеріями, що дає змогу покращити якісні показники регулювання та заощадити витрати на експлуатацію елементів та систем. Цей принцип дозволяє також прогнозувати характеристики параметрів контрольованих процесів при допущенні незмінності їх моделей як на ділянці спостереження за цими процесами, так і на ділянці прогнозування. При цьому обчислення оцінки невідомих параметрів моделей дають можливість отримати залежності, які відповідають однаково добре (з погляду вибраного критерію) всім даним, які є про процес. У міру надходження нової інформації про процес, отримані оцінки уточнюються. При прийнятому допущенні вся інформація про процес (як поточна, так і отримана в минулому) має однаково цінність і використовується в розрахунках однаковою мірою. Принцип експоненціального згладжування [1] дозволяє отримати функцію спостережень

$$S_t = \alpha \cdot y(t) + (1 - \alpha)S_{t-1}, \quad (1)$$

де  $S_t$  – рухома середня;  $y(t)$  – контрольований процес;  $\alpha$  – постійна згладжування,  $\alpha = 1/N$ ;  $N$  – кількість спостережень функції  $y(t)$ .

З виразу (1) витікає, що поточне значення згладженої величини дорівнює попередньому її значенню плюс деяка частина різниці між поточним спостереженням і попереднім значенням згладженої величини.  $\alpha$  – поточне спостереження має вагу, що лежить в межах  $0 \div 1$ . Для визначення коефіцієнта  $\alpha$  необхідно знати попередню оцінку  $\hat{a}_{t-1}$  та поточне спостереження  $y_t$ . За початкове значення коефіцієнта  $\hat{a}_{t-1}$  можна взяти перше спостереження.

Для аналогової реалізації алгоритму експоненціального згладжування функцію (1) представимо у вигляді

$$S_{(t)} = \alpha \cdot y(t) + (1 - \alpha)S(t - T_0), \quad (2)$$

де  $T_0$  – час чистого запізнення.

Перетворивши рівняння (2) за Лапласом, одержимо

$$S(p) = y(p) \frac{\alpha}{1 - (1 - \alpha)e^{-pT_0}}, \quad (3)$$

де  $p$  – оператор диференціювання.

Отже, для оцінки  $S(t)$  сигнал  $y(t)$  потрібно пропускати через фільтр з передаточною функцією

$$W_\phi(p) = \frac{\alpha}{1 - (1 - \alpha)e^{-pT_0}}. \quad (4)$$

Використавши граничне співвідношення та підставляючи замість  $e^{-pT_0}$  його приблизне значення, можна одержати наближену реалізацію передаточної функції (4), коли чисельник і знаменник передаточної функції буде містити відповідно тільки лінійні або квадратичні члени.

У випадку лінійних членів

$$W_\phi(p, 1) = \frac{1 + T_0 p}{1 + \frac{T_0}{\alpha}}. \quad (5)$$

У випадку квадратичних членів

$$W_{\phi}(p, 2) = \frac{1 + T_0 p + \frac{T_0^2}{4} p^2}{1 + \frac{T_0}{\alpha} p + \frac{T_0^2}{4\alpha} p^2}. \quad (6)$$

Передаточна функція (5) реалізується порівняно просто з використанням аперіодичного фільтра, що містить операційний підсилювач і RC – елементи [2]. При фіксованому показнику старіння інформації  $\alpha$ , схема фільтра забезпечує отримання безперервної статистичної оцінки математичного сподівання  $S$  по безперервно вимірюваній випадковій величині  $u$ .

Використовуючи рівняння (1)–(5) в [4] запропоновано апаратне знаходження статистичних параметрів, що характеризують якість напруги.

Якщо випадкові відхилення напруги  $V$  у вузлі системи електропостачання підпорядковуються нормальному закону розподілу  $\phi(V)$  з параметрами  $\mu_V$ ,  $\sigma_V$ ; де  $\mu_V$  – математичне сподівання,  $\sigma_V$  – середньоквадратичне значення відхилення  $V$  відповідно, то другий початковий момент (неоднаковість)  $N$  напруги дорівнює

$$\alpha_{2(V)} = N\left(\frac{\mu_V}{\sigma_V}\right) = \int_{-\infty}^{+\infty} V^2 \phi(V) dV. \quad (7)$$

Таке значення неоднаковості напруги не можна використати в пристроях регулювання напруги, тому необхідно враховувати знак відхилення напруги  $V$ .

Якщо функція розподілу випадкової величини відхилення (коливання) напруги  $V(t)$  підлягає законам статистичного розподілу, то ймовірність появи випадкової величини  $V_i$  дорівнює  $p_i = \phi(V) dV$ , де  $\phi(V)$  – функція розподілу випадкової величини  $V_i$ . Використовуючи властивість функції розподілу, вираз (7) можна записати як

$$N = p_1(V) \cdot V_1^2 + p_2(V) \cdot V_2^2 + \dots + p_N(V) \cdot V_n^2, \quad (8)$$

де  $p_i (i=1, n)$  – ймовірність випадкової величини  $V_i$ , яка визначається відносним часом знаходження величини  $V(t)$  в  $i$  – діапазоні зміни напруги за період усереднення  $T$ .

Величина  $N$  знаходиться за допомогою двох аперіодичних фільтрів, які реалізують функцію експоненціального згладжування змінної  $V$ , тобто визначають статистичну оцінку функції  $\phi(V)$  при  $V = V_n$ . Для оцінки одержаної величини  $N$  при відхиленнях напруги вниз і вгору від оптимального значення, використовується спеціальний функціональний перетворювач. При використанні величини  $N$  для керування в системах регулювання необхідно виділити складові цієї величини, які пропорційні  $\mu_V^2$  і  $\sigma_V^2$ .

Одержати ці величини можна за допомогою вибору постійної часу аперіодичного фільтра. Тобто для одержання величини, пропорційної  $\mu_V^2$ , використовують фільтр з величиною постійної часу  $T_1$ , а для величини, пропорційної  $\sigma_V^2$ , використовують фільтр з малою постійною часу  $T_2$ .

Таке регулювання по  $N = G_V^2 + \mu_V^2$  забезпечує зменшення збитків від відхилень і коливань напруги мережі за залежністю

$$Y = kT(\sigma_V^2 + \mu_V^2) \Rightarrow \min, \quad (9)$$

де  $Y$  – значення збитків;  $k$  – коефіцієнт, який враховує тип електрообладнання, його економічні характеристики;  $T$  – час роботи електрообладнання за межі допустимих значень відхилень напруги.

У разі розв'язання задачі прогнозування якогось контрольованого сигналу необхідно отримати оцінку середньої швидкості зміни детермінованої основи  $\hat{a}_1$ . Значення (усередненої величини)  $\hat{a}_1$  необхідне для отримання лінійної екстраполяції процесу на час  $\Delta t$  вперед

$$y(t + \Delta t) \approx \hat{a}_0(t) + \hat{a}_1(t)\Delta t. \quad (10)$$

З метою розв'язання сформульованої задачі, тобто прогнозування процесу на час  $\Delta t$  вперед, застосовують подвійне експоненціальне згладжування, яке полягає в застосуванні оператора згладжування до вже згладженого вхідного сигналу. Отже,

$$S_t^{(2)} = \alpha S_t^{(1)} + (1 - \alpha) S_{t-1}^{(2)}, \quad (11)$$

де  $S_t^{(1)}$  – функція (1).

За наявності сигналів  $S_t^{(1)}$  і  $S_t^{(2)}$  статистичні поточні оцінки параметрів  $\hat{a}_0(t)$  і  $\hat{a}_1(t)$  знаходяться з виразів [3]

$$\hat{a}_0(t) = 2S_t^{(1)} - S_t^{(2)}, \quad (12)$$

$$\hat{a}_1(t) = \frac{\alpha}{1 - \alpha} [S_t^{(1)} - S_t^{(2)}], \quad (13)$$

що дозволяє записати вираз для сигналу, лінійно екстрапольованого на час  $\Delta t$  вперед

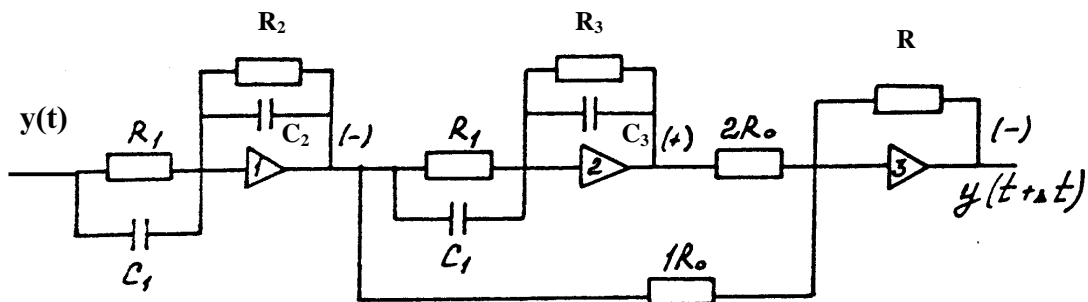
$$\hat{y}(t + \Delta t) = S_t^{(1)} \cdot k_1(\alpha, \Delta t) - S_t^{(2)} \cdot k_2(\alpha, \Delta t), \quad (14)$$

де

$$k_1(\alpha, \Delta t) = 1 + \frac{\alpha}{1 - \alpha} \Delta t, \quad (15)$$

$$k_2(\alpha, \Delta t) = 2 + \frac{\alpha}{1 - \alpha} \Delta t. \quad (16)$$

Схема такого фільтра, що реалізує подвійне експоненціальне згладжування, складається у відповідності з (10)–(16), і має дві аперіодичні ланки, виконані на базі операційних підсилювачів з  $R$ – $C$ -елементами та масштабні підсилювачі для встановлення коефіцієнтів  $k_1$ ,  $k_2$ , показана на рисунку.



Принципова схема лінійного усереднювача

Якщо в системі, де досліджується процес  $y(t)$ , коефіцієнти  $a_0$ ,  $a_1$  також змінюються, прогнозуюча система може працювати з великим запізненням і похибкою. Тому в цьому випадку необхідно регулювати швидкість реакції прогнозуючої системи, що здійснюється введенням зворотних зв'язків і реалізацію підсистеми самоналагодження [3].

Введення системи передбачення параметрів контрольованих процесів забезпечує значне покращання показників якості перехідних процесів, зменшує час протікання перехідних процесів та величини перерегулювання, що супроводжують ці перехідні процеси.

Регулювання параметрів електротехнічних систем за статистичними критеріями (математичним сподіванням відхилення напруги, дисперсією відхилень напруги або інших, що підлягають статистичному контролю) зменшує видатки на регулювання і регулюючі пристрої, зменшує збитки при роботі споживачів електричної енергії від неякісних параметрів електричної енергії, що приводить до економії витрат на експлуатацію елементів та системи електропостачання і економію коштів як у споживачів, що підключені до вузла системи електропостачання, так і в самій системі електропостачання.

1. Чуев Ю.В., Михайлов Ю.Б., Кузьмин В.И. Прогнозирование количественных характеристик процессов. – М., 1975. – 256 с. 2. Романенко А.Ф., Сергеев Г.А. Вопросы прикладного анализа случайных процессов. – М., 1968. – 256 с. 3. Иващенко О.Г., Лапа В.Г. Предбачення випадкових процесів. – К., 1969. 4. А. с. 991574 СССР. Устройство для регулирования напряжения узла нагрузки / Р.А.Селепина, Б.Ф.Иванков, И.И.Саляк // Открытия. Изобрет. – 1983. – № 3.

УДК 531

М.П. Синицин, Т.В. Суржик, С.Ю. Хотін, В.І. Шевчук  
Інститут електродинаміки НАН України

## МЕТОД КОМПЛЕКСНИХ АМПЛІТУД ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ ТА ФОТОБАТАРЕЙ

© Синицин М.П., Суржик Т.В., Хотін С.Ю., Шевчук В.І., 2001

**Розглянуто метод комплексних амплітуд для аналізу нестационарного теплового стану сонячних колекторів та фотобатарей.**

**It is considered the complex amplitude method for the analysis of nonstationary heat state of solar collectors and photobatteries.**

Однією з основних причин, які визначають термін надійної роботи сонячних колекторів та фотобатарей, є деградація їх електрофізичних та тепломеханічних характеристик внаслідок дії нестационарних температурних флуктуацій. Ці флуктуації можуть бути зумовлені збуреннями щільності сонячного випромінювання, температури зовнішнього повітря, температури робочої рідини і пов'язаних з ними коефіцієнтів теплообміну.

Незважаючи на те, що, як правило, флуктуаційні складові містяться у відповідних граничних умовах і є малими щодо середніх значень, їх вплив на старіння матеріалів сонячних колекторів і фотобатарей та їх довгострокову надійність може бути значним. Це