

УДК 517.9

Об одной математической модели интегрированной энергетической системы на основе уравнений Вольтерра с разрывным ядром*

Муфтахов И. Р.¹, Карамов Д. Н.¹, Жуков А. В.²

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения
Российской академии наук¹,
Байкальский институт БРИКС Иркутского национального исследовательского
технического университета²

В работе рассматриваются новые методы математического моделирования режимов работы интегрированных микросистем с возобновляемой генерацией и аккумулярованием энергии, учитывающие свойства и особенности взаимодействия энергетических систем разного уровня. В частности приводится анализ климатических особенностей зоны озера Байкал [1], используется передовой опыт внедрения как интегрированных, так и автономных энергетических систем с высокой долей возобновляемой генерации [2]. Единая математическая модель интегрированной энергетической системы, которая учитывает основные режимные параметры и множественные связи между элементами генерации, преобразования, распределения, аккумулярования и потребления энергии, базируется на нелинейных интегральных уравнениях Вольтерра первого рода с разрывным ядром [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_0^t \begin{pmatrix} h_1(t, \tau, x_1(\tau), x_2(\tau), \dots, x_n(\tau)) d\tau \\ h_2(t, \tau, x_1(\tau), x_2(\tau), \dots, x_n(\tau)) d\tau \\ \dots \\ h_m(t, \tau, x_1(\tau), x_2(\tau), \dots, x_n(\tau)) d\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ \dots \\ f_m(t) \end{pmatrix}, \\ v_i(t) = \int_0^t x_i(\tau) d\tau, \max_{t \in [0, T]} v_i(t) \leq v_{i \max}, \\ E_{i \min}(t) \leq \int_0^t v_i(\tau) d\tau \leq E_{i \max}(t), \\ 0 < \alpha_1(t) < \alpha_2(t) < \dots < \alpha_{n-1}(t) < t, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $t \in [0, T]$, ядра $h_i(t, \tau, x_1(\tau), x_2(\tau), \dots, x_n(\tau))$ претерпевают разрывы на кривых $a_j(t)$,

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-48-383004.

$j = 1, 2, \dots, n - 1$ и определяются следующим выражением

$$h_i(t, \tau, x_1(\tau), x_2(\tau), \dots, x_n(\tau)) d\tau = \begin{cases} K_{i,1}(t, \tau)G_{i,1}(t, x_1(\tau)), t, \tau \in p_1 \\ K_{i,2}(t, \tau, G_{i,2}(t, x_2(\tau)), t, \tau \in p_2 \\ \dots \\ K_{i,n}(t, \tau, G_{i,n}(t, x_n(\tau)), t, \tau \in p_n \end{cases} . \quad (2)$$

На основе проведенного анализа выполнены расчеты режимных параметров аккумуляющих устройств с использованием интегральных уравнений Вольтерра и с учетом нелинейной характеристики КПД, а также актинометрических показателей для природоохранной зоны озера Байкал. Также в расчетах использован прогноз ветроэнергетического потенциала рассматриваемого региона, основанный на использовании гибридного подхода: объединении глобального численного прогноза погоды и модели машинного обучения, основанной на алгоритме XGBoost, для достижения приемлемой точности [1].

Литература

1. Muftahov I., Sidorov D., Zhukov A., Karamov D. (2021) Volterra Model of Energy Storage with Nonlinear Efficiency in Integrated Power Systems. In: Allahviranloo T., Salahshour S., Arica N. (eds) Progress in Intelligent Decision Science. IDS 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1301. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-66501-2_65
2. Karamov D., Muftahov I., Zhukov A. Increasing Storage Battery Lifetime in Autonomous Photovoltaic Systems with Power Generation Structure Varying Throughout the Year. E3S Web Conf. 289 05006 (2021) DOI: 10.1051/e3sconf/202128905006
3. Sidorov D, Tynda A, Muftahov I, Dreglea A, Liu F. Nonlinear Systems of Volterra Equations with Piecewise Smooth Kernels: Numerical Solution and Application for Power Systems Operation. Mathematics. 2020; 8(8):1257. <https://doi.org/10.3390/math8081257>

MSC2020 45D05

On one mathematical model of an integrated energy system based on the Volterra equations with discontinuous kernels

I. R. Muftahov¹, D. N. Karamov¹, A. V. Zhukov²

Energy Systems Institute, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences¹,
Baikal School of BRICS, Irkutsk National Research Technical University,²