

УДК 621.31

DOI: 10.18799/29495407/2024/2/51

Шифр специальности ВАК: 2.3.1

Сравнительный анализ частотных характеристик вариантов построения цифровых моделей апериодических звеньев компонентов электротехнических комплексов

А.С. Глазырин^{1,2}, Е.И. Попов^{3✉}, С.С. Попов^{1,4}, В.А. Копырин³,
С.Н. Кладиев¹, А.П. Леонов¹, Н.А. Воронина¹, В.З. Ковалев^{2,1}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Югорский государственный университет, Россия, г. Ханты-Мансийск

³ Тюменский индустриальный университет, Россия, г. Тюмень

⁴ ООО «НПФ Мехатроника-Про», Россия, г. Томск

✉ popovei72@mail.ru

Аннотация. Удовлетворение постоянно возрастающих требований к бездатчиковому электроприводу со стороны технологических процессов может быть достигнуто путем применения цифровых двойников, представляющих собой цифровую (дискретную) модель динамической системы. Применение дискретных моделей всегда влечет за собой как некоторую потерю точности во временной области, так и искажения в частотной. Для сохранения точностных свойств модели частота дискретизации должна выбираться из соображений соблюдения требований теоремы Котельникова–Шеннона–Найквиста. Однако на практике выбор периода дискретизации ограничивается вычислительной мощностью цифрового сигнального процессора. Как правило, основным элементом компонентов электротехнических комплексов является апериодическое звено первого порядка. Вследствие этого целью статьи является определение границ применимости в частотной области существующих способов перехода в Z-область методом аналоговых прототипов путем проведения сравнительного анализа интегральной погрешности аппроксимации частотных характеристик аналогового прототипа цифровыми моделями апериодического звена для каждого из способов. Установлено, что увеличение периода дискретизации ведет к расхождению между цифровыми моделями и их аналоговыми прототипами в смысле интегральной погрешности для любой верхней границы окна просмотра в области средних и высоких частот. Это, в свою очередь, приводит к потере информации о таких физических процессах в реальной системе, как диапазон полосы пропускания или изменение фазы сигнала на выходе динамической системы. При соответствующих допущениях о стационарности динамической системы в качестве основного метода построения цифровых моделей для большинства инженерных задач может быть рекомендован метод Тастина. Однако при появлении признаков нестационарности динамической системы или повышенных требованиях к синтезу регуляторов, по мнению авторов, стоит обратить внимание на аналитические модели динамических систем.

Ключевые слова: цифровая модель, апериодическое звено, Z-преобразование, амплитудно-частотные характеристики, фазо-частотные характеристики, метод Тастина, интегральная погрешность

Для цитирования: Сравнительный анализ частотных характеристик вариантов построения цифровых моделей апериодических звеньев компонентов электротехнических комплексов / А.С. Глазырин, Е.И. Попов, С.С. Попов, В.А. Копырин, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, Н.А. Воронина, В.З. Ковалев // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2024. – Т. 2. – № 2. – С. 17–28. DOI: 10.18799/29495407/2024/2/51

UDC 621.31

DOI: 10.18799/29495407/2024/2/51

Comparative analysis of frequency characteristics for constructing digital models options of components of electrical complexes aperiodic units

A.S. Glazyrin^{1,2}, E.I. Popov^{3✉}, S.S. Popov^{1,4}, V.A. Kopyrin³, S.N. Kladiev¹,
A.P. Leonov¹, N.A. Voronina¹, V.Z. Kovalev^{2,1}

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

³ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

⁴ «NPF Mechatronica-Pro» LTD, Tomsk, Russian Federation

✉ popovei72@mail.ru

Abstract. Meeting the ever-increasing requirements for sensorless electric drives from technological processes can be achieved through the use of digital twins, which are a digital (discrete) model of a dynamic system. The use of discrete models always entails both some loss of accuracy in the time domain and distortion in the frequency domain. To preserve the accurate properties of the model, the sampling frequency must be chosen to comply with the requirements of the Kotelnikov–Shannon–Nyquist theorem. However, in practice, the choice of sampling period is limited by the processing power of the digital signal processor. As a rule, the main element of the components of electrical engineering complexes is a first-order aperiodic link. As a result, the aim of the paper is to determine the limits of applicability in the frequency domain of existing methods of transition to the Z-region using the analog prototype method by conducting a comparative analysis of the integral error in approximating the frequency characteristics of the analog prototype with digital models of the aperiodic link for each of the methods. It was established that an increase in the sampling period leads to a discrepancy between digital models and their analogue prototypes in terms of the integral error for any upper limit of the viewing window in the mid and high frequencies. This, in its turn, leads to the loss of information about such physical processes in a real system, such as the bandwidth range or the change in the phase of the signal at the output of a dynamic system. With appropriate assumptions about the stationarity of the dynamic system, the Tustin method can be recommended as the main one for constructing digital models for most engineering problems. However, when signs of non-stationarity of a dynamic system appear or increased requirements for the synthesis of regulators, according to the authors, it is worth paying attention to analytical models of dynamic systems.

Keywords: digital model, aperiodic unit, Z-transform, amplitude frequency characteristics, phase frequency characteristics, Tustin method, integral error

For citation: Glazyrin A.S., Popov E.I., Popov S.S., Kopyrin V.A., Kladiev S.N., Leonov A.P., Voronina N.A., Kovalev V.Z. Comparative analysis of frequency characteristics for constructing digital models options of components of electrical complexes aperiodic units. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2024, vol. 2, no. 2, pp. 17–28. DOI: 10.18799/29495407/2024/2/51

Введение

В настоящее время сложившаяся тенденция к усложнению технологических процессов производств влечет за собой увеличение требований к электрическому приводу по качеству переходных процессов и точности регулирования в смысле астатизма системы. Не менее важным фактором становится способность системы управления адаптироваться к изменению технологических режимов производства, а также к флуктуациям внутренних параметров непосредственно электропривода (изменение сопротивления и индуктивности, момента инерции, появление различных дефектов) [1]. С точки зрения классической теории автоматического управления асинхронные и синхронные электроприводы являются не только нелинейными, но и нестационарными динамическими системами.

При этом в последние годы особенно актуальным вопросом стало применение бездатчиковых электроприводов, что связано с их более простым техническим исполнением и меньшими экономическими затратами. Для обеспечения соответствия бездатчикового автоматизированного электропривода высоким требованиям современных технологических процессов, по мнению ряда ученых [2–4], стоит обратить внимание на применение цифровых двойников [5]. Цифровые двойники электродвигателей находят применение в системах управления [6, 7], в том числе в нестационарных и нетиповых режимах [8], задачах идентификации электропривода [9, 10], для идентификации дефектов и прогнозирования жизненного цикла электропривода [11, 12].

Вопросы разработки цифровых двойников объектов электротехнических комплексов неразрывно связаны с проблемами построения их цифровых моделей. Под цифровой моделью следует понимать дискретную математическую модель динамической системы, полученную применением к системе дифференциальных уравнений прямого преобразования Лапласа с последующим Z-преобразованием. Приближенный переход из p -области в Z-область выполняется с помощью метода аналоговых прототипов – путем замены оператора Лапласа p на некоторое дробно-рациональное выражение от переменной z [13]. Однако такой подход всегда влечет за собой некоторую потерю точностных свойств модели реальной динамической системы [14].

Кроме снижения точности во временной области, переход к дискретным моделям ведет к искажениям информации о поведении объекта в частотной области. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) цифровых фильтров также являются периодическими функциями, причем период повторения АЧХ зависит от периода дискретизации сигнала Δt [13]. Кроме того, при повторениях АЧХ возможно возникновение эффекта элайсинга, заключающегося в наложении периодических спектров дискретного сигнала [15] при построении цифровых моделей апериодических звеньев.

Апериодические звенья входят как в математические модели компонентов электротехнических комплексов, например, в моделях электродвигателей, длинных кабелей, трансформаторов и т. д., так и в математическое описание цифровых регуляторов [16], настраиваемых математических моделей наблюдателей скорости электропривода [17]. Точностные свойства цифровых моделей напрямую зависят от выбора периода дискретизации. При этом наибольшее значение частоты дискретизации зависит от вычислительной мощности цифрового сигнального процессора, следовательно, возникает вопрос о границах применимости различных методов перехода в Z-область при построении цифровых моделей апериодических звеньев.

Постановка задачи и методы исследования

Рассмотрим дифференциальное уравнение простейшей RL -цепи (рис. 1) и представим его с помощью прямого преобразования Лапласа при нулевых начальных условиях в виде апериодического звена $W(p)$ с входным сигналом напряжения $u(t)$ и выходным сигналом тока $i(t)$:

$$u(t) = L \frac{d}{dt} i(t) + R \cdot i(t), \quad (1)$$

$$U(p) = I(p)(pL + R), \quad W(p) = \frac{I(p)}{U(p)} = \frac{1}{pL + R},$$

где p – оператор Лапласа; L – индуктивность цепи, Гн; R – активное сопротивление цепи, Ом; $W(p)$ – передаточная функция апериодического звена.

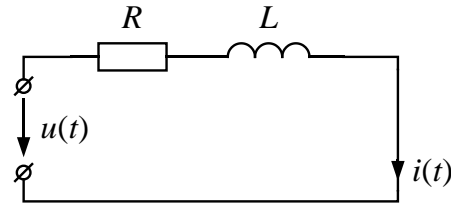


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема RL -цепи (апериодического звена)

Fig. 1. Schematic electrical diagram of the RL circuit (aperiodic unit)

В качестве объекта исследования рассмотрим якорную цепь двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ), математическая модель электромагнитных процессов в режиме неподвижного ротора которого описывается уравнением (1). Параметры якорной цепи ДПТ НВ 2ПФ180МГ $R=0,046$ Ом, $L=0,68$ мГн [18].

Проанализируем наиболее распространенные подходы к построению цифровых моделей методом аналоговых прототипов. Аппроксимация оператора Лапласа p методом левых прямоугольников, правых прямоугольников и методом Тастина соответственно [13]:

$$p = \frac{z-1}{\Delta t}, \quad p = \frac{z-1}{\Delta t \cdot z}, \quad p = \frac{2}{\Delta t} \frac{z-1}{z+1}.$$

Рассмотрим также вариацию метода Тастина при аппроксимации натурального логарифма двумя членами ряда Тейлора – расширенная билинейная аппроксимация:

$$p = \frac{2}{\Delta t} \left[\frac{z-1}{z+1} + \frac{1}{3} \left(\frac{z-1}{z+1} \right)^3 \right].$$

Цифровые передаточные функции для методов левой и правой разностей, Тастина и расширенной билинейной аппроксимации соответственно:

$$W_{\text{ЛП}}(z) = \frac{z^{-1} \Delta t}{z^{-1} (R \Delta t - L) + L},$$

$$W_{\text{ПР}}(z) = \frac{\Delta t}{z^{-1} L - (R \Delta t + L)},$$

$$W_{\text{БП}}(z) = \frac{z^{-1} \Delta t + \Delta t}{z^{-1} (R \Delta t - 2L) + (R \Delta t + 2L)},$$

$$W_{\text{РБ}}(z) = \frac{z^{-3} \cdot 3 \Delta t + z^{-2} \cdot 9 \Delta t + z^{-1} \cdot 9 \Delta t + 3 \Delta t}{\left[z^{-3} (3R \Delta t + 8L) + z^{-2} \cdot 9R \Delta t + \right. \\ \left. + z^{-1} \cdot 9R \Delta t + (3R \Delta t - 8L) \right]}.$$

Проведем сравнительный анализ амплитудно- и фазо-частотных характеристик цифровых моделей аperiodических звеньев, полученных каждым из методов для двух вариантов периодов дискретизации: $\Delta t_1 = \frac{1}{16}T_a$ и $\Delta t_2 = \frac{1}{4}T_a$, где T_a – постоянная времени аperiodического звена, $T_a = \frac{L}{R}$. Окно просмотра принято равным $\left[\frac{1}{64} \frac{2\pi}{T_a}; 64 \frac{2\pi}{T_a} \right]$ (рис. 2–7).

Построение частотных характеристик цифровых моделей аperiodических звеньев

Эталонные АЧХ, логарифмическая АЧХ (ЛАЧХ) и фазо-частотная характеристика (ФЧХ) аperiodического звена построены согласно следующим выражениям:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \left| \frac{1}{j\omega L + R} \right|,$$

$$\varphi(\omega) = \arg W(j\omega) = \arg \left(\frac{1}{j\omega L + R} \right).$$

Частотные характеристики цифровых моделей были получены заменой $z=e^{j\omega\Delta t}$. Выражения АЧХ цифровых моделей аperiodического звена для методов левой и правой разностей, Тастина и расширенной билинейной аппроксимации соответственно:

$$A_{\text{ЛР}}(\omega) = \left| \frac{1}{\frac{L}{\Delta t} e^{j\omega\Delta t} + R - \frac{L}{\Delta t}} \right|,$$

$$A_{\text{ПР}}(\omega) = \left| \frac{e^{j\omega\Delta t}}{\left(\frac{L}{\Delta t} + R \right) e^{j\omega\Delta t} - \frac{L}{\Delta t}} \right|,$$

$$A_{\text{БП}}(\omega) = \left| \frac{e^{j\omega\Delta t} + 1}{\left(2 \frac{L}{\Delta t} + R \right) e^{j\omega\Delta t} + \left(R - 2 \frac{L}{\Delta t} \right)} \right|,$$

$$A_{\text{РБ}}(\omega) = \left| \frac{3(e^{j\omega\Delta t} + 1)^2}{\left(8 \frac{L}{\Delta t} + 3R(e^{j\omega\Delta t})^3 + 9R(e^{j\omega\Delta t})^2 + \right) + 9R \cdot e^{j\omega\Delta t} + \left(3R - 8 \frac{L}{\Delta t} \right)} \right|.$$

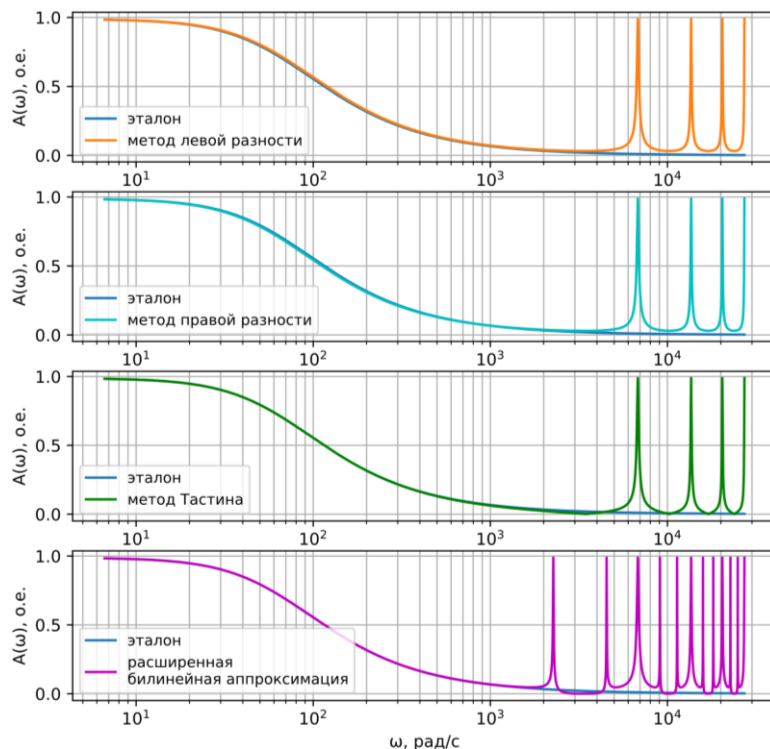


Рис. 2. АЧХ аperiodического звена при $\Delta t_1 = \frac{1}{16}T_a$

Fig. 2. Amplitude frequency characteristics (AFC) of the aperiodic unit at $\Delta t_1 = \frac{1}{16}T_a$

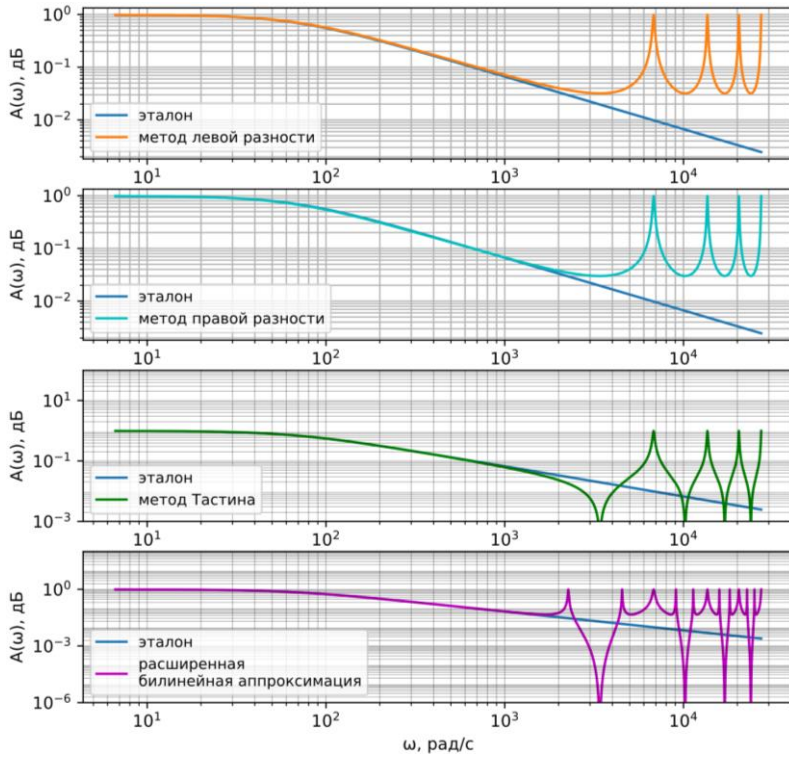


Рис. 3. ЛАЧХ апериодического звена при $\Delta t_1 = \frac{1}{16}T_a$

Fig. 3. Logarithmic AFC of the aperiodic unit at $\Delta t_1 = \frac{1}{16}T_a$

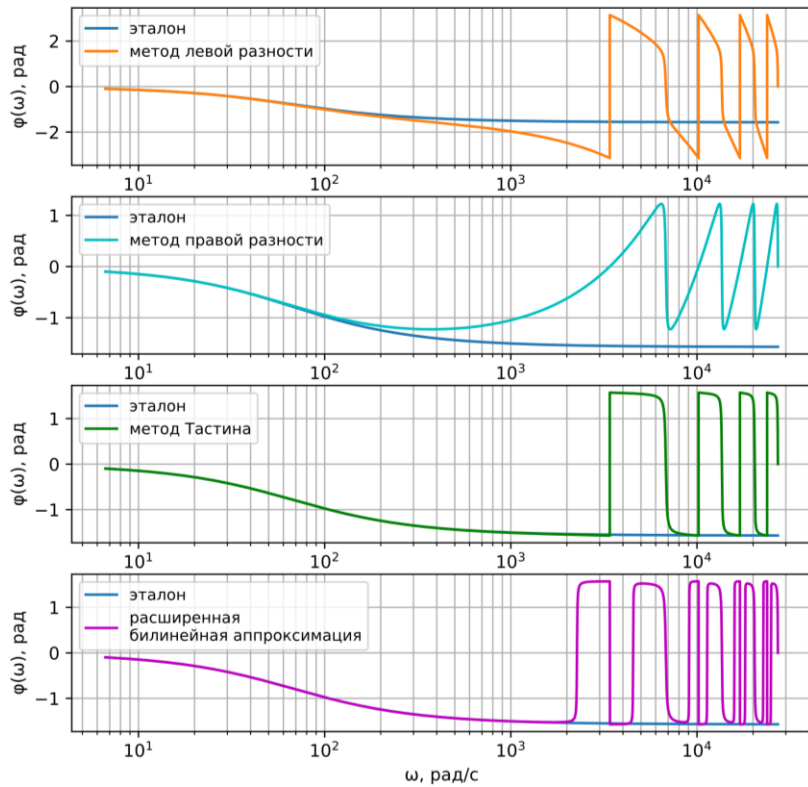


Рис. 4. ФЧХ апериодического звена при $\Delta t_1 = \frac{1}{16}T_a$

Fig. 4. Phase frequency characteristics (PFC) of the aperiodic unit at $\Delta t_1 = \frac{1}{16}T_a$

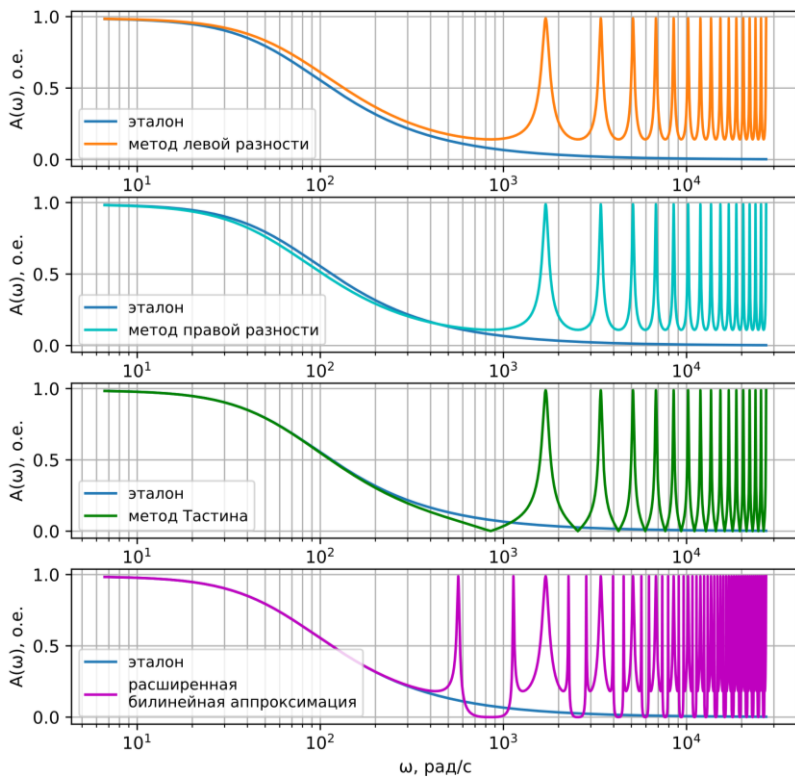


Рис. 5. АЧХ апериодического звена при $\Delta t_2 = \frac{1}{4}T_a$

Fig. 5. AFC of the aperiodic unit at $\Delta t_2 = \frac{1}{4}T_a$

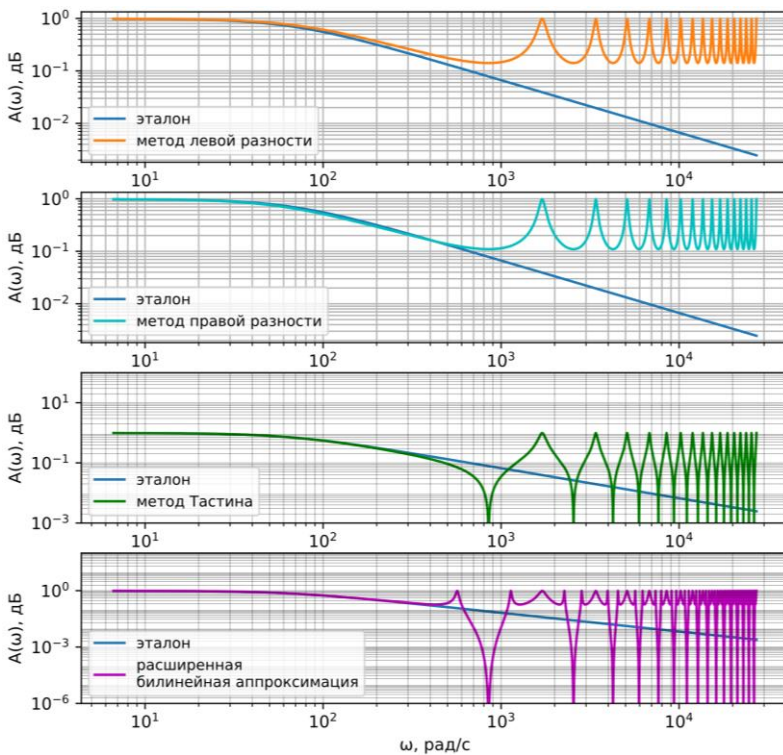


Рис. 6. ЛАЧХ апериодического звена при $\Delta t_2 = \frac{1}{4}T_a$

Fig. 6. Logarithmic AFC of the aperiodic unit at $\Delta t_2 = \frac{1}{4}T_a$

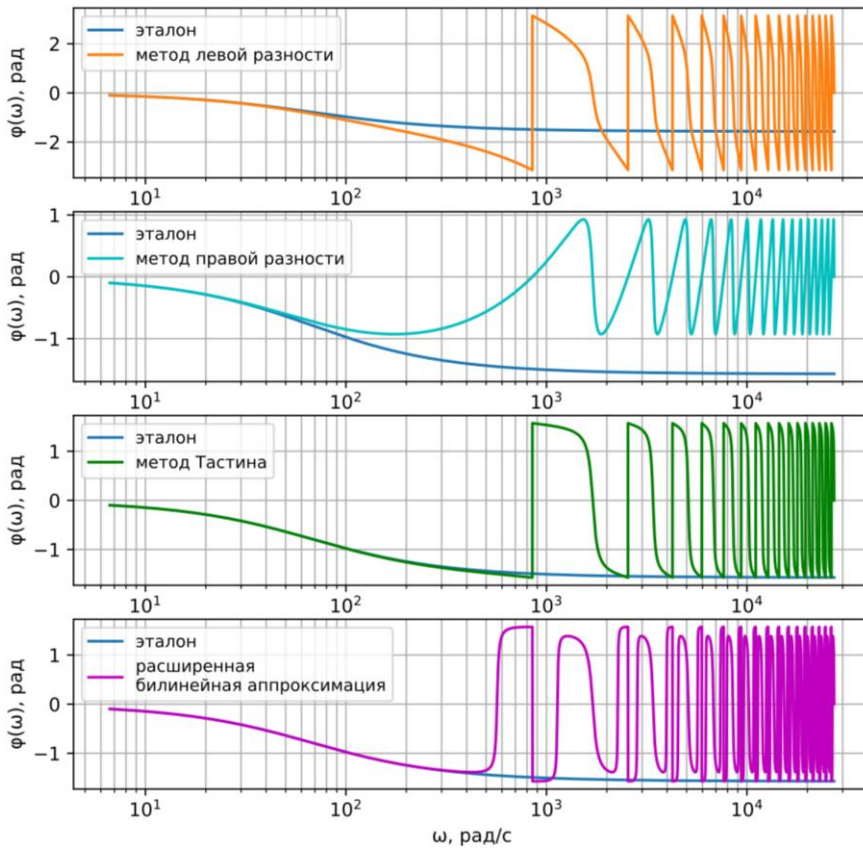


Рис. 7. ФЧХ аperiodического звена при $\Delta t_2 = \frac{1}{4}T_a$

Fig. 7. PFC of the aperiodic unit at $\Delta t_2 = \frac{1}{4}T_a$

Для оценки границ применимости рассмотренных методов построения цифровых моделей выполним расчет интегральной погрешности σ невязки аппроксимации АЧХ для каждого из методов относительно эталонной АЧХ аналогового прототипа методом трапеций:

$$\sigma = \frac{\int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} |A_{\text{эт}}(\omega) - A_{\text{дискр}}(\omega)| dt}{\int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} (A_{\text{эт}}(\omega)) dt} \cdot 100\% \approx$$

$$\approx \sum_{i=1}^n \frac{(\omega_i - \omega_{i-1}) \left| \frac{\Delta A(\omega_i) - \Delta A(\omega_{i-1})}{2} \right|}{(\omega_i - \omega_{i-1}) \frac{A_{\text{эт}}(\omega_i) - A_{\text{эт}}(\omega_{i-1})}{2}} \cdot 100\%,$$

$$\Delta A(\omega_i) = (A_{\text{эт}}(\omega_i) - A_{\text{дискр}}(\omega_i)),$$

где n – порядковый номер наибольшей частоты окна просмотра ω_{\max} ; $i = 1, 2, \dots, n$; $A_{\text{эт}}(\omega)$ – эталонная АЧХ аналогового прототипа; $A_{\text{дискр}}(\omega)$ – АЧХ цифровой модели аperiodического звена.

Диапазон частот повторения АЧХ цифровых моделей зависит от периода дискретизации. Следовательно, оценку интегральной погрешности выполним для всех выбранных периодов дискретизации. Диапазон интегрирования выберем от нижней границы окна просмотра до верхней границы и в ее окрестности.

Результаты расчета сведены в таблицу.

Интегральная погрешность АЧХ цифровых моделей при уменьшении окна просмотра снижается. Наименьшую погрешность во всех диапазонах расчета демонстрирует метод Тастина, полученный путем разложения экспоненты в ряд Тейлора с учетом первого члена ряда. Увеличение количества членов ряда для получения метода расширенной билинейной аппроксимации не позволяет увеличить точность аппроксимации АЧХ.

Обсуждение результатов

Характерной особенностью цифровых фильтров, как видно из рис. 2, 3, является появление фиктивных полос пропускания, что обусловлено свойством периодичности спектра дискретных сигналов.

Таблица. Интегральная погрешность аппроксимации АЧХ вариантов построения цифровой модели аperiodического звена, %

Table. Approximation integral error of the frequency response for options of constructing a digital model of the aperiodic unit, %

$\Delta t, c$	Окно просмотра, рад/с View window, rad/s	Метод левой разности Left difference method	Метод правой разности Right difference method	Метод Тастина Tustin method	Метод расширенной билинейной аппроксимации Method of extended bilinear approximation
$\frac{1}{16}T_a$	$[\omega_{min}; \omega_{max}]$	502,4	474,8	423,6	556,9
	$[\omega_{min}; 0,5\omega_{max}]$	235,8	221,3	202,2	274,3
	$[\omega_{min}; 0,25\omega_{max}]$	89,3	82,1	80,8	117,7
$\frac{1}{4}T_a$	$[\omega_{min}; \omega_{max}]$	1753,8	1452,1	1273,4	1632,3
	$[\omega_{min}; 0,5\omega_{max}]$	935,0	768,6	677,7	878,7
	$[\omega_{min}; 0,25\omega_{max}]$	485,5	393,6	351,9	464,9

При этом для методов левой и правой разностей характерны гладкие переходы между повторениями АЧХ, в то время как методы Тастина и расширенной билинейной аппроксимации демонстрируют появление четко выраженных границ между повторениями АЧХ. В первом случае данное явление объясняется появлением эффекта элайсинга, то есть наложением друг на друга повторений АЧХ. Негативная особенность данного эффекта связана с невозвратимой потерей некоторой части информации, находящейся на границе одного повторения АЧХ, поскольку на сигнал одной частоты накладывается сигнал, принадлежащий в действительности другой части спектра.

Анализ рис. 4 показывает, что диапазон аппроксимации методов Тастина и расширенной билинейной аппроксимации выше, чем у методов левой и правой разности. Однако фазо-частотные характеристики цифровых фильтров также принимают вид периодических функций и, кроме того, приводят к возникновению фиктивных инверсий фазы сигнала на выходе фильтра, что противоречит физике реальных процессов в динамической системе.

Наибольшую точность аппроксимации АЧХ аналогового прототипа, как следует из анализа таблицы, демонстрирует метод Тастина во всех вариантах окна просмотра (границ интегрирования). Метод расширенной билинейной аппроксимации не только не позволяет достичь более высокой точности аппроксимации, но и показывает худшие результаты в сравнении с остальными методами.

Уменьшение частоты дискретизации, как следует из рис. 5, 6, влечет за собой увеличение искажений в частотной области и количества повторений АЧХ в выбранном диапазоне окна просмотра. Кроме того, снижается диапазон аппроксимации эталонной АЧХ цифровыми моделями. Более того, методы левой и правой разности демонстрируют некоторое отклонение от АЧХ аналогового прототипа в диапазоне непосредственно полосы пропускания реального фильтра. Аналогичные процессы выполняются и для фазо-частотных характеристик (рис. 7).

При увеличении периода дискретизации в 4 раза с $\Delta t_1 = \frac{1}{16}T_a$ до $\Delta t_2 = \frac{1}{4}T_a$ интегральная погрешность методов Тастина и правой разности на всем окне просмотра возросла в 3 раза, метода левой разности – в 3,5 раз. При уменьшении верхней границы окна просмотра до $0,25\omega_{max}$ интегральная погрешность метода Тастина увеличилась в 4,36 раза, методов правой и левой разности, соответственно, – в 4,8 и 5,4 раза. Из этого следует, что границы применимости методов построения цифровых моделей сильно зависят от выбора периода дискретизации, и с увеличением последнего возникают дополнительные искажения в части спектра средних частот, где при меньшем периоде дискретизации наблюдалась высокая точность аппроксимации эталонной АЧХ.

Заключение

Анализ частотных характеристик вариантов построения цифровых моделей аperiodических звеньев компонентов электротехнических комплексов показывает, что реальный диапазон применимости методов в пространстве частот ограничен точностью аппроксимации амплитудно-фазо-частотных характеристик аналогового прототипа. На основе сравнительного анализа основным методом построения цифровых моделей для большинства инженерных задач может быть рекомендован метод Тастина, демонстрирующий большую точность аппроксимации частотных характеристик в области низких и средних частот.

Однако высокая точность аппроксимации частотных характеристик аналогового прототипа в низкочастотной области характерна для методов построения цифровых моделей только при допущении о стационарности динамической системы. Появление признаков нестационарности, наличие шумовых составляющих в измерительных каналах будет приводить к расхождению в смысле интегральной погрешности между цифровыми моделями и их аналоговыми прототипами. В случае, если

динамические системы стационарны и нет повышенных требований к точности модели, для данных допущений применение дискретных моделей возможно.

Тем не менее, если динамическая система имеет признаки нестационарных систем [19], исследуются модели импульсных трансформаторов [20], в измерительных каналах присутствуют отклонения, связанные с его инерционностью и появлением шумовых процессов, представляющих собой аддитивную смесь белого шума и импульсных помех [21], а также, если к построению регуляторов предъявляются особые требования (разработка прогнозных систем управления, наличие адаптивных алгоритмов, повышенные требования по энерго- и ресурсосбережению [22]), имеет смысл, как считают авторы, обратить внимание на аналитиче-

ские модели [22–25]. В ином случае частично преодолеть проблемы, связанные с нестационарностью динамических объектов при использовании дискретных моделей, можно с применением как классических фильтров Калмана, так и их модификаций (например, расширенный фильтр Калмана [26, 27]).

Дискретное представление информации, получаемой с реальной динамической системы, не означает, что модель системы также должна быть дискретной. Более гибким инструментом моделирования и исследования нестационарных динамических систем являются аналитические модели, дающие возможность использовать математический аппарат теории автоматического управления в непрерывном времени, что недоступно при использовании дискретных моделей [28].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копырин В.А., Попов Е.И. Концепция управления электроприводами на основе искусственных нейронных сетей и цифровых двойников // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, учёных и специалистов. – Тюмень, 20–22 декабря 2023. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2023. – С. 309–312. EDN YNMRZW.
2. Применение технологии цифровых двойников при разработке тяговых асинхронных электродвигателей / А.В. Захаров, А.М. Зайцев, А.С. Кобелев, Л.Н. Макаров, Д.Ю. Розанов // Электротехника. – 2022. – № 4. – С. 26–33. DOI: 10.53891/00135860_2022_4_26
3. Цифровой двойник погружного электродвигателя на основе методов планирования эксперимента / В.З. Ковалев, Э.И. Хусаинов, Е.С. Балыклов, О.В. Архипова, Р.Н. Хамитов, А.С. Глазырин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2022. – Т. 18. – № 2. – С. 32–44. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-32-44
4. Adomou A.A., Chakib A. Energy efficiency model-based digital shadow for Induction motors: Towards the implementation of a Digital Twin // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2023. – Vol. 44. – 101469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101469>
5. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: дата введения 2022-01-01. – М.: Стандартиформ, 2021. – 15 с.
6. Hybrid modeling-based digital twin for performance optimization with flexible operation in the direct air-cooling power unit / Guanxia Zhao, Zhipeng Cui, Jing Xu, Wenhao Liu, Suxia Ma // Energy. – 2022. – Vol. 254. – Part C. – 124492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124492>
7. Vered Y., Elliott S.J. The use of digital twins to remotely update feedback controllers for the motion control of nonlinear dynamic systems // Mechanical Systems and Signal Processing, 2023. – Vol. 185. – 109770. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109770>
8. Зюзев А.М., Текле С.И. Динамические симуляторы в задачах диагностики штанговых глубинно-насосных установок // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 168–177. DOI: 10.18799/24131830/2022/1/3285
9. Korzonek M., Tarchala G., Orłowska-Kowalska T. A review on MRAS-type speed estimators for reliable and efficient induction motor drives // ISA Transactions. – 2019. – Vol. 93. – P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.03.022>
10. Khlaief A. Boussak M., Chaari A. A MRAS-based stator resistance and speed estimation for sensorless vector controlled IPMSM drive // Electric Power Systems Research. – 2014. – Vol. 108. – P. 1–15. DOI: 10.1016/j.epsr.2013.09.018
11. Dynamically updated digital twin for prognostics and health management: Application in permanent magnet synchronous motor / H. Guo, S. Wang, J. Shi, T. Ma, G. Guglieri, R. Jia, F. Lizzio // Chinese Journal of Aeronautics. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.12.031>
12. Optimal sensor placement for permanent magnet synchronous motor condition monitoring using a digital twin-assisted fault diagnosis approach / S. Kohz, J. Zhao, A. Renteria, A. Lalwani, Ya. Xu, X. Zhang, K.S. Haran, D. Senesky, P. Wang // Reliability Engineering & System Safety. – 2024. – Vol. 242. – Article number 109714. DOI: 10.1016/j.ress.2023.109714
13. Белодедов М.В. Методы проектирования цифровых фильтров. – Волгоград: Изд-во Волгоградского государственного университета, 2005. – 64 с.
14. Исследование погрешности различных вариантов построения цифровых моделей аperiodических звеньев компонентов электротехнических комплексов / А.С. Глазырин, Е.И. Попов, В.А. Копырин, С.Н. Кладиев // Современные проблемы машиностроения: сборник статей XVI Международной научно-технической конференции. – Томск, 27 ноября – 1 декабря 2023. – Томск: Изд-во ТПУ, 2024. – С. 131–135.
15. Глинченко А.С. Цифровая обработка сигналов. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 242 с.
16. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. – М.: ИД МЭИ, 2015. – 373 с.

17. Настройка и исследование режимов работы наблюдателя угловой скорости регулируемого электропривода постоянного тока / А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, В.В. Тимошкин, Е.В. Боловин, Л.Е. Козлова, И.А. Набунский, И.В. Раков, С.С. Попов // *Электротехнические комплексы и системы*. – 2023. – Т. 19. – № 2. – С. 30–42. DOI: 10.17122/1999-5458-2023-19-2-30-42
18. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 1. – 456 с.
19. Глазырин А.С. Способы и алгоритмы эффективной оценки переменных состояния и параметров асинхронных двигателей регулируемых электроприводов: дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, 2016. – 376 с.
20. Матханов П.Н., Гоголицын Л.З. Расчет импульсных трансформаторов. – Л.: Энергия. Ленинград. отд., 1980. – 112 с.
21. Козлова Л.Е. Разработка нейросетевого наблюдателя угловой скорости ротора в электроприводе по схеме ТРН-АД: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2016. – 144 с.
22. Поляков Н.А. Анализ и синтез активных выпрямителей напряжения в системах управления энергоэффективными электроприводами: дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2015. – 192 с.
23. Аналитическая модель динамической системы «длинный кабель – погружной асинхронный двигатель с заторможенным ротором» в полярной системе координат / А.С. Глазырин, И.А. Набунский, С.С. Попов, Е.В. Боловин, В.В. Тимошкин, С.Н. Кладиев, А.А. Филипас, Р.Н. Хамитов, В.А. Копырин, Е.И. Попов, В.З. Ковалев // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 12. – С. 220–233. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/12/4519>.
24. Аналитическая модель динамической системы «широко импульсный преобразователь - двигатель постоянного тока с независимым возбуждением» / А.С. Глазырин, Е.И. Попов, В.А. Копырин, С.Н. Кладиев // *Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика*. – 2023. – Т. 1. – № 4. – С. 34–45. DOI: <https://doi.org/10.18799/29495407/2023/4/41>
25. Бутырин П.А., Алпатов М.Е. Цифровизация и аналитика в электротехнике. Цифровые двойники трансформаторов // *Электричество*. – 2021. – № 10. – С. 4–10. DOI: <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2021-10-4-10>
26. Синицын И.Н. Фильтры Калмана и Пугачева. – М.: Университетская книга, Логос, 2006. – 640 с.
27. Aksoy S., Kizmaz H., Muhurcu A. State and parameter estimation in induction motor using the Extended Kalman Filtering algorithm // *Modern Electric Power Systems*. – 2010. – P. 1–13.
28. Драница Ю.П., Драница А.Ю., Алексеевская О.В. О связи непрерывной и дискретной моделей для линейных динамических систем // *Дифференциальные уравнения и процессы управления*. – 2010. – № 3. – С. 20–57.

Информация об авторах

Александр Савельевич Глазырин, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; профессор Политехнической школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16; asglazyrin@tpu.ru

Евгений Игоревич Попов, ассистент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; <https://orcid.org/0000-0003-2088-4280>, popov72@mail.ru

Семен Семенович Попов, аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; инженер-программист ООО «НПФ Мехатроника-Про», Россия, г. Томск, пр. Фрунзе, 119е; <https://orcid.org/0009-0004-4139-8032>; ssp14@tpu.ru

Владимир Анатольевич Копырин, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; <https://orcid.org/0000-0002-7515-4018>; kopyrinva@gmail.com

Сергей Николаевич Кладиев, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; <https://orcid.org/0000-0001-9432-0176>; kladiev@tpu.ru

Андрей Петрович Леонов, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; <https://orcid.org/0000-0001-6645-3879>, leonov_ar@tpu.ru

Наталья Алексеевна Воронина, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; <https://orcid.org/0000-0002-4512-6868>, voronina@tpu.ru

Владимир Захарович Ковалев, доктор технических наук, профессор Политехнической школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16; профессор отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; <https://orcid.org/0000-0002-4512-6868>; vz_kovalev@mail.ru

Поступила: 11.03.2024

Принята: 20.05.2024

Опубликована: 30.06.2024

REFERENCES

1. Kopyrin V.A., Popov E.I. The concept of controlling electric drives based on artificial neural networks and digital twins. *Energy saving and innovative technologies in the fuel and energy complex: materials of the National scientific and practical conference of students, graduate students, scientists and specialists with international participation*. Tyumen, Tyumen Industrial University, 2023. pp. 309-312. EDN YNMRZW. (In Russ.)
2. Zakharov A.V., Zaitsev A.M., Kobelev A.S., Rozanov D.Y., Makarov L.N. Application of digital-twin technology in developing traction induction motors. *Russian Electrical Engineering*, 2022, vol. 93, no. 4, pp. 235–241.
3. Kovalev V.Z., Khusainov E.I., Balykov E.S., Arhipova O.V., Khamitov R.N., Glazyrin A.S. Digital twin of a submersible electric motor based on design of experiments methods. *Electrical and data processing facilities and systems*, 2022, vol. 18, no. 2, pp. 23–44. (In Russ.) DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-2-32-44.
4. Adomou A.A., Chakib A. Energy efficiency model-based digital shadow for Induction motors: Towards the implementation of a Digital Twin. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2023, vol. 44, 101469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101469>
5. SS RF 57700.37-2021. *Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions*. Moscow, Standartinform Publ., 2022. 11 p. (In Russ.)
6. Guanxia Zhao, Zhipeng Cui, Jing Xu, Wenhao Liu, Suxia Ma. Hybrid modeling-based digital twin for performance optimization with flexible operation in the direct air-cooling power unit. *Energy*, 2022, vol. 254, P. C, 124492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124492>
7. Vered Y., Elliott S.J. The use of digital twins to remotely update feedback controllers for the motion control of nonlinear dynamic systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, vol. 185, 109770. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109770>
8. Ziuzev A.M., Teclé S.I. Sucker rod pumping system: challenges to develop diagnostic system and role of dynamic simulator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 168–177. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/1/3285>.
9. Korzonek M., Tarchala G., Orłowska-Kowalska T. A review on MRAS-type speed estimators for reliable and efficient induction motor drives. *ISA Transactions*, 2019, vol. 93, pp. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.03.022>
10. Khlaief A. Boussak M., Chaari A. A MRAS-based stator resistance and speed estimation for sensorless vector controlled IPMSM drive. *Electric Power Systems Research*, 2014, vol. 108, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.epsr.2013.09.018
11. Guo H., Wang S., Shi J., Ma T., Guglieri G., JIA R., Lizzio F. Dynamically updated digital twin for prognostics and health management: application in permanent magnet synchronous motor. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.12.031>.
12. Kohtz S., Zhao J., Renteria A., Lalwani A., Xu Ya., Zhang X., Haran K.S., Senesky D., Wang P. Optimal sensor placement for permanent magnet synchronous motor condition monitoring using a digital twin-assisted fault diagnosis approach. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024, vol. 242, Article number 109714. DOI: 10.1016/j.res.2023.109714
13. Belodedov M.V. *Methods for designing digital filters*. Volgograd, Volgograd State University Publ. House, 2005. 64 p. (In Russ.)
14. Glazyrin A.S., Popov E.I., Kopyrin V.A., Kladijev S.N. Study of the error of various options for constructing digital models of aperiodic links of components of electrical complexes. *Modern problems of mechanical engineering: collection of articles of the XVI International Scientific and Technical Conference*. Tomsk, TPU Publ. House, 2024. pp. 131–135. (In Russ.)
15. Glinchenko A.S. *Digital signal processing*. Krasnoyarsk, IPK SFU Publ., 2008. 242 p. (In Russ.)
16. Anuchin A.S. *Electric drive control systems*. Moscow, MPEI Publ. House, 2015. 373 p. (In Russ.)
17. Glazyrin A.S., Kladijev S.N., Timoshkin V.V., Bolovin E.V., Kozlova L.E., Nabunskiy I.A., Rakov I.V., Popov S.S. Setup and Investigation of the operation modes of the speed observer in a controlled DC electric drive. *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, no. 2, vol. 19, pp. 30–42. (In Russ.) DOI: <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-2-30-42>.
18. *Handbook of Electrical Machines*. In 2 vol. Eds. I.P. Kopylov, B.K. Klokova. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. Vol. 1, 456 p. (In Russ.)
19. Glazyrin A.S. *Methods and algorithms for effectively estimating state variables and parameters of asynchronous motors of adjustable electric drives*. Dr. Diss. Tomsk, 2016. 376 p. (In Russ.)
20. Mathanov P.N., Gogolitsyn L.Z. *Calculation of pulse transformers*. Leningrad, Energiya Publ. Leningrad Department, 1980. 112 p. (In Russ.)
21. Kozlova L.E. *Development of the neural network observer of the angular velocity of the rotor in the electric drive according to the thyristor voltage regulator-asynchronous motor scheme*. Cand. Diss. Tomsk, 2016. 144 p. (In Russ.)
22. Polyakov N.P. *Analysis and synthesis of active voltage rectifiers in control systems for energy-efficient electric drives*. Cand. Diss. St. Petersburg, 2015. 192 p. (In Russ.)
23. Glazyrin A.S., Nabunskiy I.A., Popov S.S., Bolovin E.V., Timoshkin V.V., Kladijev S.N., Filipas A.A., Khamitov R.N., Kopyrin V.A., Popov E.I., Kovalev V.Z. Analytical model of a dynamic system «long cable – submersible induction motor with fixed rotor» in polar coordinate system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 12, pp. 220–233. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/12/4519>
24. Glazyrin A.S., Popov E.I., Kopyrin V.A., Kladijev S.N. Analytical model of a dynamic system «pulse-width convert-er–DC motor with independent excitation». *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2023, vol. 1, no. 4, pp. 34–45. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/12/4519>

25. Butyrin P.A., Alpatov M.E. Digitalization and analytics in electrical engineering. Digital twins of transformers. *Electrichestvo*, 2021, no. 10, pp. 4–10. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2021-10-4-10>
26. Sinitsyn I.N. *Kalman and Pugachev filters*. Moscow, University Book, Logos Publ., 2006. 640 p. (In Russ.)
27. Aksoy S., Kizmaz H., Muhurcu A. State and parameter estimation in induction motor using the Extended Kalman Filtering algorithm. *Modern Electric Power Systems*, 2010, pp. 1–13.
28. Dranitsa Y.P., Dranitsa A.Y., Alekseevskaya O.V. On a connection between continuous and discrete models of linear dynamical systems. *Differential Equations and Control Processes*, 2010, no. 3, pp. 20–57. (In Russ.)

Information about the authors

Alexander S. Glazyrin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Professor, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation; asglazyrin@tpu.ru

Evgeniy I. Popov, Assistant, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-2088-4280>; popovei72@mail.ru

Semen S. Popov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; Software Engineer «NPF Mechatronica-Pro» LTD, 119e, Frunze avenue, Tomsk, 634513, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0004-4139-8032>; ssp14@tpu.ru

Vladimir A. Kopyrin, Cand. Sc., Associate Professor, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-7515-4018>; kopyrinva@gmail.com

Sergey N. Kladiev, Cand. Sc, Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-9432-0176>; kladiev@tpu.ru

Andrey P. Leonov, Cand. Sc, Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-6645-3879>; leonov_ap@tpu.ru

Nataliya A. Voronina, Cand. Sc, Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-4512-6868>, voronina@tpu.ru

Vladimir Z. Kovalev, Dr. Sc., Professor, Yugra State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation; Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-4512-6868>; vz_kovalev@mail.ru

Received: 11.03.2024

Revised: 20.05.2024

Accepted: 30.06.2024