

УДК 621.314.26+621.376.54  
EDN: PVLJO

И.В. Сорокин<sup>1</sup>, И.В. Белоусов<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАДЕРЖЕК УПРАВЛЕНИЯ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПО НАПРЯЖЕНИЮ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АНИЗОТРОПНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ РОТОРА

**Объект и цель научной работы.** Объектом исследования является синхронный электропривод с анизотропной магнитной проводимостью ротора с преобразователем частоты. В данной работе при моделировании учтены импульсный характер выходного напряжения преобразователя частоты, формируемого широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), ограничение напряжения и задержка управления. Также учтены задержка управления и фильтрация по аналогии с реальной системой управления. Целью является определение границ устойчивости системы электропривода с синхронным двигателем с анизотропной магнитной проводимостью ротора (СДАМПР) и ШИМ с учетом задержек управления и ограничений по напряжению.

**Материалы и методы.** Моделирование производится на основе уравнений динамики электромагнитных процессов в синхронной машине с анизотропной магнитной проводимостью ротора, а также аналитических выражений для описания ШИМ и уравнений системы управления.

**Основные результаты.** Получена аналитическая зависимость границы устойчивости путем выражения системы электропривода полиномом третьего порядка. Проведены экспериментальные исследования границ устойчивости при различных значениях ШИМ и других параметров системы.

**Заключение.** Выявлено, что уменьшение частоты ШИМ напрямую влияет на уменьшение зоны устойчивости в пространстве параметров системы. Получено выражение для аналитической границы устойчивости. Выяснено, что при выборе параметров системы управления целесообразно ориентироваться на аналитическую границу устойчивости. Электропривод с СДАМПР при наличии программных ограничений выходного напряжения преобразователя частоты не может быть асимптотически неустойчив, а только имеет незатухающие колебания момента в статическом режиме.

**Ключевые слова:** преобразователь частоты, синхронный электропривод, анизотропная магнитная проводимость ротора, широтно-импульсная модуляция, моделирование.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

UDC 621.314.26+621.376.54  
EDN: PVLJO

I.V. Sorokin<sup>1</sup>, I.V. Belousov<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

## STUDY OF THE EFFECT OF CONTROL DELAYS AND VOLTAGE LIMITATIONS ON THE STABILITY OF AN ELECTRIC DRIVE WITH ANISOTROPIC MAGNETIC ROTOR CONDUCTIVITY

**Object and purpose of research.** The object of research is a synchronous electric drive with an anisotropic magnetic conductivity of the rotor with a frequency converter. In this work, the pulse nature of the output voltage of the frequency

*Для цитирования:* Сорокин И.В., Белоусов И.В. Исследование влияния задержек управления и ограничения по напряжению на устойчивость электропривода с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Труды Крыловского государственного научного центра. 2026; 1(415): 127–134.

*For citations:* Sorokin I.V., Belousov I.V. Study of the effect of control delays and voltage limitations on the stability of an electric drive with anisotropic magnetic rotor conductivity. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026; 1(415): 127–134 (in Russian).

converter generated by pulse-width modulation (PWM) is taken into account during modeling. The control delay and filtering are taken into account, in analogy with the real control system. The purpose of the work is to determine the stability limits of the electric drive system with SDAMPR and PWM, taking into account control delays and voltage constraints.

**Materials and methods.** The simulation is based on the equations of electromagnetic dynamics in a synchronous machine with anisotropic rotor magnetic conductivity, as well as analytical expressions for describing PWM and control system equations.

**Main results.** An analytical dependence of the stability boundary is obtained, taking into account the approximation of the system by a 3rd-order polynomial. Experimental studies of the stability boundaries were conducted at various values of PWM and other system parameters.

**Conclusion.** It has been revealed that PWM reduces the stability zones in the system parameter space. The reduction of the stability zones is directly affected by the reduction of the PWM frequency. An expression for the analytical stability boundary has been obtained. It has been found that it is advisable to focus on the analytical stability boundary when selecting the control system parameters. An electric drive with SDAMPR, when there are software restrictions on the output voltage of the frequency converter, cannot be asymptotically unstable, but only has undamped torque oscillations in the static mode.

**Keywords:** frequency converter, synchronous electric drive, anisotropic magnetic conductivity of the rotor, pulse-width modulation, modeling.

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

Для анализа и синтеза переходных процессов в электроприводе обычно рассматривают аналоговые модели с соответствующими передаточными функциями [1, 2]. Однако в реальном электроприводе при анализе быстродействия и устойчивости следует учитывать, что выходное напряжение преобразователя частоты, формируемое широтно-импульсной модуляцией, имеет дискретный (импульсный) характер. Очевидно, что устойчивость работы и быстродействие зависят от соотношения параметров системы управления, электродвигателя и частоты ШИМ. Для анализа устойчивости необходима разработка математической модели электропривода с системой управления электромагнитным моментом.

В данной работе модель электропривода реализована на языке программирования Си. Рассматриваются теоретические и экспериментальные границы устойчивости системы СДАМПР-преобразователя частоты [3] (далее – система) с учетом задержек управления и ШИМ. Определены аналитические условия устойчивости контура управления электромагнитным моментом при аппроксимации ШИМ и преобразователя частоты аperiодическим звеном первого порядка. Рассматриваются особенности работы системы при работе внутри и вне зоны теоретической устойчивости. В дальнейших работах целесообразно рассмотреть вопросы поиска системы, оптимальной по быстродействию в зонах устойчивости, с использованием разработанной модели.

## Математическое описание основных элементов

### Mathematical description of main elements

#### Электродвигатель

При описании электромагнитных процессов в СДАМПР целесообразно использовать систему координат  $dq0$ , связанную с ротором. В [3, 4] показано, что при переходе от естественной координатной системы к системе  $dq0$  периодические коэффициенты взаимных индуктивностей преобразуются в постоянные. В таком виде уравнения пригодны для синтеза системы управления с разными критериями качества переходного процесса.

Электромагнитные процессы СДАМПР во вращающейся системе координат ротора  $dq0$  без учета насыщения описываются системой уравнений [5]

$$\begin{cases} U_d^* = I_d^* R_1^* - L_q^* I_q^* \omega^* + p L_d^* I_d^* / \omega_b^* \\ U_q^* = I_q^* R_1^* + L_d^* I_d^* \omega^* + p L_q^* I_q^* / \omega_b^* \end{cases}, \quad (1)$$

где  $U_d^*$ ,  $U_q^*$  – составляющие напряжения статора по осям  $d$  и  $q$ ;  $I_d^*$ ,  $I_q^*$  – составляющие тока статора по осям  $d$  и  $q$ ;  $L_d^*$ ,  $L_q^*$  – индуктивности электрической машины по осям  $d$  и  $q$ ;  $\omega^*$  – частота вращения вала машины.

Электромагнитный момент СДАМПР в относительных единицах определяется согласно формуле [5]

$$M^* = (L_d^* - L_q^*) \cdot I_q^* \cdot I_d^*. \quad (2)$$

Механическая часть электропривода описывается основным уравнением вращательного движения и характеризуется механической постоянной времени  $T_{\text{мех}}$  и моментом сопротивления на валу

электродвигателя  $M_c$ . Без учета сил трения и скручивания вала уравнение вращательного движения имеет вид [5]

$$T_{\text{мех}} \cdot \rho \omega^* = M^* - M_c^*. \quad (3)$$

## Широтно-импульсная модуляция

ШИМ характеризуется функцией коммутации ключей инвертора  $\chi_x$ , где  $x = A, B, C$ . Для двухуровневого инвертора напряжения функция коммутации каждой фазы принимает значение 1 при замыкании верхнего ключа и значение 0 при замыкании нижнего. Зависимость функции коммутации  $\chi_x$  от требуемой скважности и параметров импульса ШИМ согласно [6] описывается выражением:

$$\chi_x = 1 \left( \frac{1 + \gamma_x}{2} + \Delta\alpha_x - \rho \right) \cdot 1 \left( -\frac{1 - \gamma_x}{2} - \Delta\alpha_x + \rho \right), \quad (4)$$

где  $1()$  – функция Хевисайда;  $\gamma_x$  – модулирующая функция ключей полумоста фазы  $x$ ;  $\Delta\alpha_x$  – коэффициент смещения импульса относительно центра интервала ШИМ фазы  $x$ ;  $\rho$  – левосторонняя периодическая пилообразная функция относительно времени.

Модулирующая функция фазы  $\gamma_x$  может быть описана выражением:

$$\gamma_x = 0,5 + g_x - g_0, \quad (5)$$

где  $g_x$  – относительное значение фазного напряжения фазы  $x$ , определяемое отношением фазного напряжения к напряжению звена постоянного тока;  $g_0$  – потенциал нулевой точки трехфазной системы.

Относительное значение для каждой фазы задается системой управления электроприводом, а способ ШИМ определяется выбором функции предмодуляции  $g_0$ .

В данной работе применен вариант ШИМ с максимальной эффективностью использования напряжения ЗПТ для формирования фазных напряжений. Функция предмодуляции рассчитывается по формуле

$$g_0 = \frac{\min\{g_x\} + \max\{g_x\}}{2}. \quad (6)$$

## Система управления

Исследуется быстродействующая система векторного управления СДАМПР, описанная в [7]. Максимальное быстродействие управления моментом достигается при постоянном токе намагничивания  $I_d$ , т.к. постоянная времени тока по оси  $d$  суще-

ственно больше, чем по оси  $q$ . В связи с этим целесообразно стабилизировать значение тока  $I_d$ , тогда значение электромагнитного момента будет пропорционально току  $I_q$ .

Также введем следующие допущения:

- сопротивление статора  $R_1^*$  много меньше виртуального сопротивления  $R^*$ ;
- перекрестные связи между контурами тока  $d$  и  $q$  полностью устраняются системой управления;
- контур тока  $d$  идеально поддерживает заданное значение;
- задержка и фильтрация информации с датчиков описывается по формуле скользящего среднего (moving average) согласно формуле

$$y_i = \frac{(x_i - x_{i-1})}{n} + y_{i-1}, \quad (7)$$

где  $y_i, y_{i-1}$  – текущее и предыдущее значения скользящего среднего;  $x_i, x_{i-1}$  – текущее и предыдущее значения усредняемой величины;  $n$  – число точек расчета на интервале ШИМ.

## Анализ устойчивости на основании уравнений

Для описания задержки управления воспользуемся апериодическим звеном первого порядка. Т.к. при моделировании фильтрация сигнала с датчиков осуществляется по методу скользящей средней, задержка  $H$  составит половину периода ШИМ. С учетом введенной задержки и указанных выше допущений характеристическое уравнение для контура тока по оси  $q$  имеет вид

$$(H \cdot p + 1) \cdot T_{pq} \cdot (L_q^* / \omega_0^*) \cdot p^2 + (H \cdot p + 1) \cdot T_{pq} \cdot R \cdot p + 1 = 1. \quad (8)$$

Приведем полином (8) к стандартному (нормированному) виду

$$T_\mu^3 \cdot p^3 + k_1 \cdot T_\mu^2 \cdot p^2 + k_2 \cdot T_\mu \cdot p + 1 = 1. \quad (9)$$

Тогда выражения основных параметров системы управления через коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  имеют вид

$$R = \frac{k_2 \cdot L_q^*}{c^2 \cdot H \cdot \omega_0};$$

$$T_{pq} = \frac{c^3 \cdot H^2 \cdot \omega_0}{L_q^*}; \quad (10)$$

$$c = T_\mu / H.$$

Из условия равенства соответствующих коэффициентов выражений (10) получим соотношение коэффициентов полинома (9)

$$k_2 = k_1 \cdot c - c^2; \quad (11)$$

$$k_1 = T_{pq} \cdot \frac{(L_q^* + H \cdot R)}{c^2 \cdot H^2}.$$

Условие устойчивости системы с полиномом (8) можно определить на основании критерия Рауса. Коэффициенты полинома (8) не отрицательны, для обеспечения устойчивости достаточно выполнения условия

$$k_1 \cdot k_2 \geq 1 \rightarrow k_1^2 \cdot c - k_1 \cdot c^2 - 1 > 0. \quad (12)$$

Тогда условие устойчивости системы приобретет следующий вид:

$$k_1 > 0,5 \cdot c \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4}{c^3}} \right). \quad (13)$$

Выражение для устойчивости (13) также может быть представлено через параметры  $T_{pq}$ ,  $R$  и  $H$  с помощью выражений (10) и (12):

$$T_{pq} \cdot \frac{(L_q + H \cdot R)}{c^2 \cdot H^2} \cdot \frac{R \cdot c^2 \cdot H}{L_q} > 1. \quad (14)$$

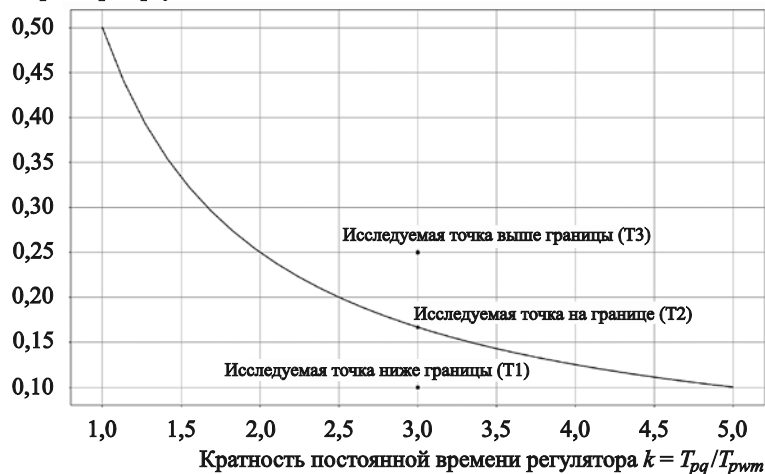
При упрощении получим следующее условие

$$L_q \cdot (R \cdot T_{pq} - H) + T_{pq} \cdot H \cdot R^2 > 0. \quad (15)$$

Из выражения (15) видно, что условие устойчивости при положительных значениях параметров выполняется для  $\forall L_q$  при условии

$$R \cdot T_{pq} = H. \quad (16)$$

#### Параметр виртуальной диссипации $R$



**Рис. 1.** Аналитическая граница гарантированной устойчивости и исследуемые точки

**Fig. 1.** Analytical boundary of guaranteed instability and investigated points

Таким образом, условие устойчивости становится инвариантно по отношению к индуктивности по оси  $q$ . Введем параметр  $k$ , показывающий, во сколько раз частота ШИМ меньше постоянной времени регулятора контура  $q$ . Тогда выражение для инвариантной устойчивости (16) примет вид

$$R = \frac{1}{2 \cdot k}. \quad (17)$$

Следует отметить, что ниже кривой (17) система тоже может быть устойчивой, т.к. в выражении (15) присутствует еще одно положительное слагаемое. При рассмотрении реальных систем необходимо учитывать, что выходное напряжение преобразователя частоты ограничено программными средствами (на уровне защит от перенапряжения) и величиной напряжения звена постоянного тока. Программное ограничение может быть описано формулой

$$\sqrt{U_d^{*2} + U_q^{*2}} \leq U_{огр}. \quad (18)$$

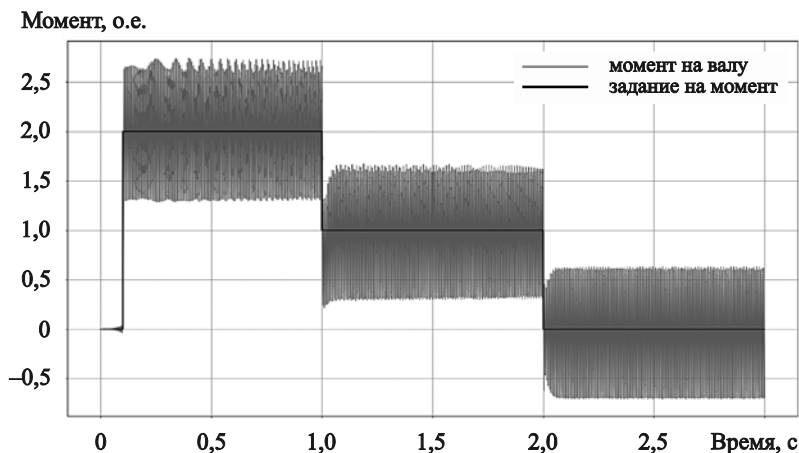
Ограничение задания на ток намагничивания связано с ограничением напряжения преобразователя. Таким образом, реальная система управления электромагнитным моментом отличается от аналоговой модели, описываемой характеристическим уравнением (8) не только наличием импульсного элемента, но и наличием нелинейного элемента ограничения выхода системы управления на задание напряжения.

#### Анализ устойчивости на основании численных экспериментов

Проанализируем переходные процессы при управлении электромагнитным моментом с учетом наличия и отсутствия ограничения напряжения на выходе

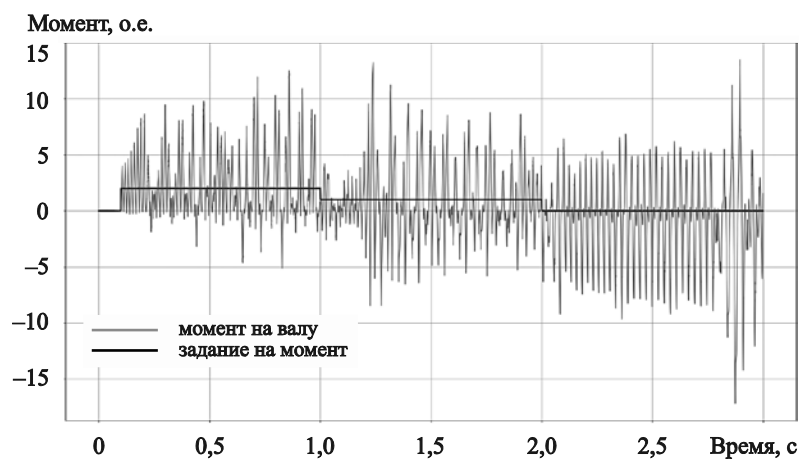
**Рис. 2.** Переходный процесс при ограничении напряжения в точке T1

**Fig. 2.** Transitory process with voltage limit: Point T1



**Рис. 3.** Переходный процесс без ограничения напряжения в точке T1

**Fig. 3.** Transitory process without voltage limit: Point T1

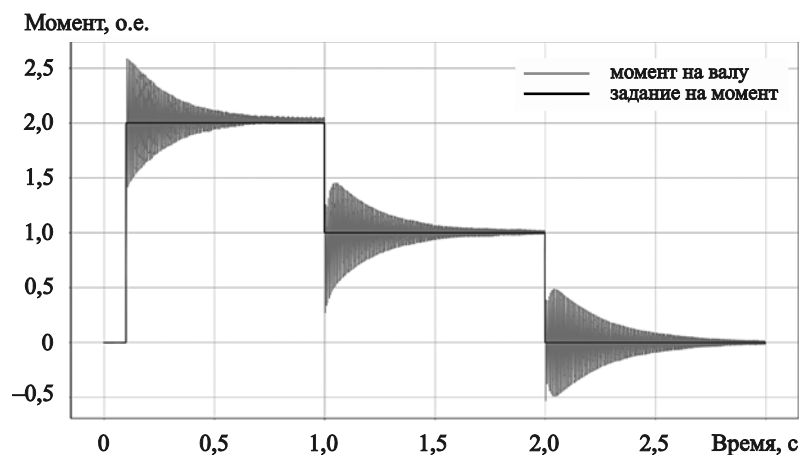


системы управления. Оценим устойчивость вне и в области устойчивости согласно (17). Для анализа возьмем 3 точки относительно границы устойчивости (рис. 1). Справедливо полагать, что неустойчивое состояние может быть достигнуто уменьшением параметров  $R$  и  $k$  в области ниже кривой (17).

При моделировании будем полагать, что механическая постоянная времени много большей постоянной времени по оси  $q$ , и осуществлять ступенчатое изменение задания на момент. Графики переходного процесса для системы в точке T1 с учетом ограничения и без представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

**Рис. 4.** Переходный процесс при ограничении напряжения в точке T2

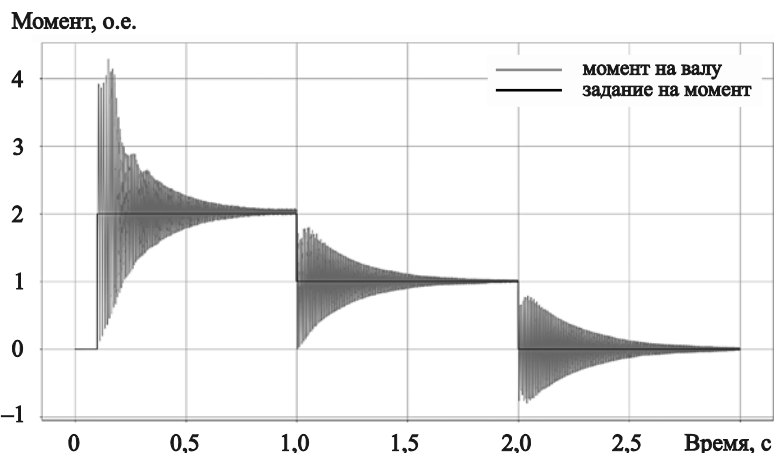
**Fig. 4.** Transitory process with voltage limit: Point T2



Видно, что без ограничения выходного напряжения даже при ограничении напряжением преобразователя частоты переходный процесс может приобретать неконтролируемый характер. В системе возникают возрастающие по амплитуде колебания на частотах, много меньших частот ШИМ. Т.е. наблю-

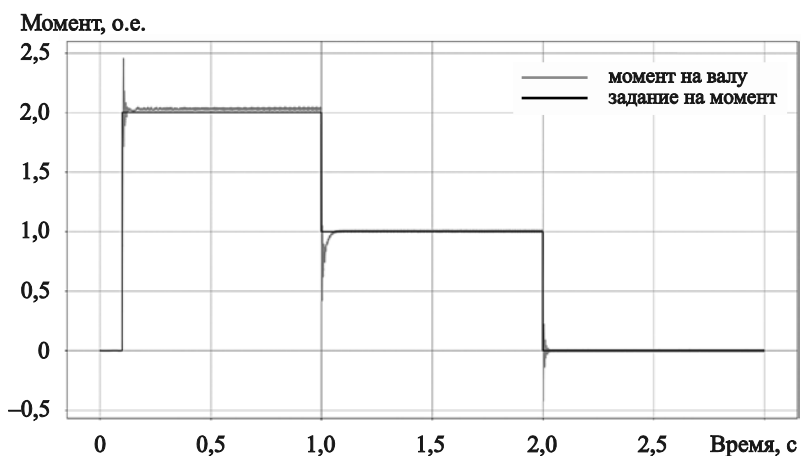
дается классическая (аналоговая) потеря устойчивости, связанная с несоблюдением критерия Рауса (12).

Рассмотрим ситуацию на границе устойчивости (рис. 4 и 5). В данном случае переходные процессы являются асимптотически устойчивыми, поскольку в соответствии с условием (15) на данной границе



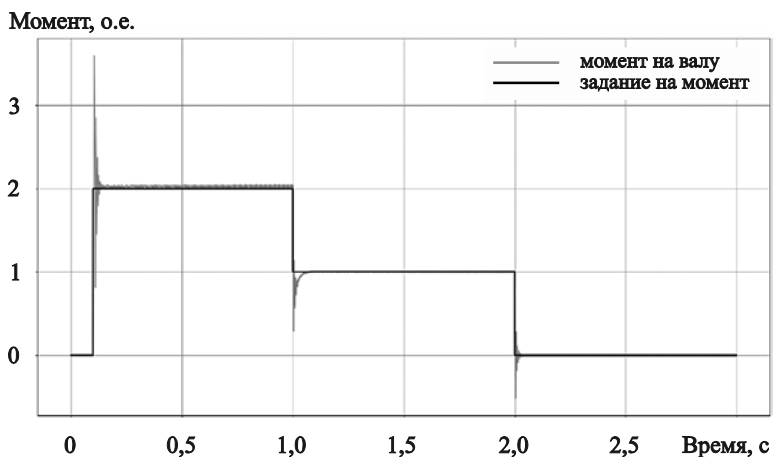
**Рис. 5.** Переходный процесс без ограничения напряжения в точке T2

**Fig. 5.** Transitory process without voltage limit: Point T2



**Рис. 6.** Переходный процесс при ограничении напряжения в точке T2

**Fig. 6.** Transitory process with voltage limit: Point T2



**Рис. 7.** Переходный процесс без ограничения напряжения в точке T2

**Fig. 7.** Transitory process without voltage limit: Point T2

система имеет запас устойчивости, определяемый дополнительным неотрицательным слагаемым.

В представленных графиках переходного процесса выше границы (17) (рис. 6, 7) колебания в статическом режиме имеют значительно меньшую амплитуду в сравнении с колебаниями момента в системе ниже границы устойчивости и имеют своей причиной воздействие ШИМ. Частоты колебаний в статическом режиме в данном случае сопоставимы или больше частоты ШИМ. В случае потери устойчивости при отсутствии ограничения по напряжению (рис. 3) колебания момента имеют амплитуду, сопоставимую или много большую величины задания при частотах, много меньших частоты ШИМ.

## Заключение

### Conclusion

Рассмотрена быстродействующая система управления электромагнитным моментом СДАМПР с введением контура виртуальной диссипации [4]. При принятых допущениях аналитическое выражение передаточной функции системы с учетом задержек управления, связанных с периодом ШИМ, описывается полиномом третьего порядка. Определены аналитические условия устойчивости и граница устойчивости, связывающая постоянную времени регулятора, величину ШИМ и параметр виртуальной диссипации  $R$  (15). Рассмотрены переходные процессы в различных точках относительно границы устойчивости (17). Определено влияние программного ограничения задания на выходное напряжение системы управления.

На основании графиков переходных процессов можно сделать вывод, что при наличии программного ограничения напряжения система не может быть асимптотически неустойчивой. Если параметры системы находятся вне зоны устойчивости и присутствует ограничение по напряжению, в статическом режиме возникают незатухающие колебания высокой амплитуды. При снятии ограничения система с аналогичными параметрами становится неустойчивой с низкочастотными колебаниями высокой амплитуды.

Системы с параметрами, находящимися выше границы, оказываются асимптотически устойчивы при наличии и отсутствии ограничения напряжения. Выявлена отрицательная корреляция величины амплитуды пульсаций момента в статическом режиме и расстояния от кривой (17) до исследуемой точки. В дальнейших исследованиях может быть установ-

лена зависимость между величиной колебаний в статическом режиме и расстоянием до кривой (17).

Таким образом, при выборе параметров системы целесообразно ориентироваться на выражение (17) и пространство параметров  $R$  и  $k$ . Представленный подход не только позволяет выбрать устойчивую систему и минимизировать колебания в статическом режиме, но и предоставляет удобные соотношения для дальнейшего анализа систем.

## Список использованной литературы

1. Гавриш В.В., Корпусов А.В., Грушин А.И. Алгоритм параметрического анализа на ЭВМ частотных свойств линейных систем автоматического управления // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника – 2020: Материалы VI Всерос. научно-технической конференции. Севастополь: СевГУ, 2020. С. 77–80.
2. Муромцев Ю.Л., Муромцев Д.Ю. Основы автоматики и системы автоматического управления. Тамбов: Изд-во Тамбовского гос. техн. ун-та, 2008. [23] с.
3. Гребной электропривод на основе реактивной электрической машины для судов ледового класса / Ф.А. Гельвер, И.В. Белоусов, В.Ф. Самосейко, А.В. Саушев // Российская Арктика. 2024. Т. 6, № 3. С. 15–25. DOI: 10.24412/2658-42552024-3-15-25.
4. Управление реактивной электрической машиной с анизотропной магнитной проводимостью ротора / Ф.А. Гельвер, И.В. Белоусов, В.Ф. Самосейко, В.А. Хомяк // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Вып. 3(389). С. 127–138. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-127-138.
5. Синхронные машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Методика проектирования. Алгоритмы управления / В.Ф. Самосейко, Ф.А. Гельвер, В.А. Хомяк, Д.А. Хайров. Санкт-Петербург: Крыловский государственный научный центр, 2016. 174 с.
6. Широтно-импульсные преобразователи электрической энергии: [монография] / И.В. Белоусов, Ф.А. Гельвер, В.Ф. Самосейко, В.А. Хомяк. Санкт-Петербург: Крыловский государственный научный центр, 2019. 226 с.
7. Сорокин И.В. Исследование быстродействующей системы управления моментом синхронного двигателя с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Труды Крыловского государственного научного центра. 2025. Вып. 1(411). С. 129–134.
8. Ильюшин Ю.В., Кравцова А.Л. Исследование запаса устойчивости систем автоматического управления // Альманах современной науки и образования. Тамбов: Грамота, 2012. № 1(56). С. 26–37. URL: <http://www.gramota.net/materials/1/2012/1/9.html> (дата обращения: 24.11.2025).

## References

1. *Gavrish V.V., Korpusov A.V., Grushin A.I.* Algorithm of computer-based parametric analysis for frequency properties of linear automatic control systems // *Intellectual systems, control and mechatronics 2020: Materials of 6<sup>th</sup> All-Russian Research & Engineering Conference*. Sevastopol : Sevastopol State University, 2020. P. 77–80 (*in Russian*).
2. *Muromtsev Yu.L., Muromtsev D.Yu.* Fundamentals of automation and automatic control systems. Tambov : Publishing House of Tambov State Technical University, 2008. [23] p. (*in Russian*).
3. SRM-based propulsion drive for ice-class ships / *F.A. Gelver, I.V. Belousov, V.F. Samoseyko, A.V. Saushev.* // *Russian Arctic*. 2024. Vol. 6, No. 3. P. 15–25, DOI: 10.24412/2658-42552024-3-15-25 (*in Russian*).
4. Control of synchronous reluctance motor (SynRM) with anisotropic magnetic conductive rotor / *F.A. Gelver, I.V. Belousov, V.F. Samoseyko, V.F. Khomyak* // *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2019. Vol. 3(389). P. 127–138. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-3-389-127-138 (*in Russian*).
5. Synchronous machines with anisotropic permeance of rotor. Design methodology. Control algorithms / *V.F. Samoseyko, F.A. Gelver, V.F. Khomyak, D.A. Khairov*. St. Petersburg: Krylov State Research Centre, 2016. 174 c. (*in Russian*).
6. Pulsewidth converters / *I.V. Belousov, F.A. Gelver, V.F. Samoseyko, V.A. Khomyak*. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2019. 226 p. (*in Russian*).
7. *Sorokin I.V.* Investigation of fast control system of electromagnetic torque of synchronous motor with anisotropic magnetic permeance of rotor. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2025. Vol. 1(411). P. 129–134 (*in Russian*).
8. *Ilyushin Yu.V., Kravtsova A.L.* Stability margin of automatic control systems // *Almanac of Modern Science and Education*. Tambov : Gramota, 2012. Vol. 1(56). P. 26–37. URL: <http://www.gramota.net/materials/1/2012/1/9.html> (Accessed: 24.11.2025) (*in Russian*).

---

### Сведения об авторах

*Сорокин Илья Владимирович*, начальник сектора филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. E-mail: [idefo@list.ru](mailto:idefo@list.ru).  
*Белоусов Игорь Владимирович*, к.т.н., ведущий инженер отдела перспективных разработок ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; доцент кафедры электропривода и электрооборудования береговых установок ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова». Адрес: 198035, Россия, Санкт-Петербург, Двинская ул., д. 5/7. E-mail: [ibel@bk.ru](mailto:ibel@bk.ru).

### About the authors

*Iliya V. Sorokin*, Head of Sector, TSNII SET branch of Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. E-mail: [idefo@list.ru](mailto:idefo@list.ru).  
*Igor V. Belousov*, Cand. Sci. (Eng.), Lead Engineer of the Advanced Development Department, Krylov State Research Centre; Ass. Prof. of the Department of Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. Address: 5/7, Dvinskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 198035. E-mail: [ibel@bk.ru](mailto:ibel@bk.ru).

Поступила / Received: 29.10.25  
Принята в печать / Accepted: 20.02.26  
© Сорокин И.В., Белоусов И.В., 2026