

И.Н. Хлопенко, С.А. Рожков, Н.Я. Хлопенко

УСТОЙЧИВОСТЬ И ТОЧНОСТЬ РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ СЛУЧАЙНЫХ ВАРИАЦИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ В ЗАДАННЫХ ГРАНИЦАХ

Мета. Метою роботи є дослідження стійкості й точності робастної системи стабілізації поточкозчеплення ротора асинхронного електроприводу при випадкових варіаціях невизначених параметрів об'єкта і регулятора в заданих межах. Методологія. Для проведення досліджень застосовувалась математична модель каналу поточкозчеплення ротора системи векторного керування асинхронного електроприводу з параметричною невизначеністю. Розраховувалась передавальна функція H_{∞} -субоптимального регулятора за методом мішаної чутливості. Ця передавальна функція використовувалась для побудови структурної схеми регулятора у вигляді з'єднання пропорційних та інтегровальних ланок та декількох суматорів. Визначалися аналітичні залежності коефіцієнтів передавальної функції регулятора від параметрів ланок такого з'єднання. Ці залежності служили для дослідження впливу невизначених параметрів ланок регулятора і об'єкта на стійкість робастної системи і точність стабілізації поточкозчеплення. Результати. Проведені дослідження стійкості робастної системи й точності стабілізації поточкозчеплення в пакеті Robust Control Toolbox. Побудовані криві перехідних процесів поточкозчеплення і діаграма Бode для розімкненої системи при випадкових варіаціях невизначених параметрів об'єкта та ланок регулятора у заданих межах. Вибір варіюваних параметрів здійснювався за методом Монте-Карло. За розкидом отриманих кривих перехідних процесів визначалась точність стабілізації поточкозчеплення, а по діаграмі Бode – запаси стійкості за амплітудою і фазою робастної системи. Встановлено високу точність стабілізації поточкозчеплення (відхилення менше 1 %) в досить широких діапазонах зміни невизначених параметрів об'єкта і регулятора при збереженні стійкості системи з допустимими запасами по амплітуді і фазі. Новизна. Вперше отримані аналітичні залежності коефіцієнтів передавальної функції H_{∞} -субоптимального регулятора від параметрів його структурної схеми, представлені у вигляді з'єднання пропорційних та інтегровальних ланок. Побудована методика розрахунку стійкості системи робастного керування поточкозчеплення і точності його стабілізації при випадкових варіаціях невизначених параметрів об'єкта і ланок регулятора в заданих межах. Практичне значення. Використання запропонованої методики дозволяє в процесі конструювання регулятора забезпечити вибір його елементів зі стандартних рядів. Бібл. 10, рис. 3.

Ключові слова: електропривод, векторне керування, канал поточкозчеплення, робастна система стабілізації, стійкість, точність.

Цель. Целью работы является исследование устойчивости и точности робастной системы стабилизации поточкозчепления ротора асинхронного электропривода при случайных вариациях неопределенных параметров объекта и регулятора в заданных границах. Методология. Для проведения исследований применялась математическая модель канала поточкозчепления ротора системы векторного управления асинхронного электропривода с параметрической неопределенностью. Рассчитывалась передаточная функция H_{∞} -субоптимального регулятора по методу смешанной чувствительности. Эта передаточная функция использовалась для построения структурной схемы регулятора в виде соединения пропорциональных и интегрирующих звеньев и нескольких сумматоров. Определялись аналитические зависимости коэффициентов передаточной функции регулятора от параметров звеньев такого соединения. Эти зависимости служили для исследования влияния неопределенных параметров звеньев регулятора и объекта на устойчивость робастной системы и точность стабилизации поточкозчепления. Результаты. Проведены исследования устойчивости робастной системы и точности стабилизации поточкозчепления в пакете Robust Control Toolbox. Построены кривые переходных процессов поточкозчепления и диаграмма Бode для разомкнутой системы при случайных вариациях неопределенных параметров объекта и звеньев регулятора в заданных границах. Выбор варьируемых параметров осуществлялся по методу Монте-Карло. По разбросу полученных кривых переходных процессов определялась точность стабилизации поточкозчепления, а по диаграмме Бode – запасы устойчивости по амплитуде и фазе робастной системы. Установлена высокая точность стабилизации поточкозчепления (отклонение менее 1 %) в достаточно широких диапазонах изменения неопределенных параметров объекта и регулятора при сохранении устойчивости системы с допустимыми запасами по амплитуде и фазе. Новизна. Впервые получены аналитические зависимости коэффициентов передаточной функции H_{∞} -субоптимального регулятора от параметров его структурной схемы, представленной в виде соединения пропорциональных и интегрирующих звеньев. Построена методика расчета устойчивости системы робастного управления поточкозчепления и точности его стабилизации при случайных вариациях неопределенных параметров объекта и звеньев регулятора в заданных границах. Практическое значение. Использование предложенной методики позволяет в процессе конструирования регулятора обеспечить выбор его элементов из стандартных рядов. Библ. 10, рис. 3.

Ключевые слова: электропривод, векторное управление, канал поточкозчепления, робастная система стабилизации, устойчивость, точность.

Введение. В статье [1] построена методика структурного синтеза и получена структура стабилизирующего робастного H_{∞} -субоптимального регулятора в виде соединения пропорциональных и интегрирующих звеньев для канала поточкозчепления сис-

темы векторного управления асинхронного электропривода с параметрической неопределенностью объекта управления. Однако при проектировании такого регулятора из аналоговых устройств (операционных

© И.Н. Хлопенко, С.А. Рожков, Н.Я. Хлопенко

усилителей и RC-цепей) возникают ошибки округления его коэффициентов усиления и постоянных времени вследствие выбора элементов (резисторов, конденсаторов) этих устройств из стандартных рядов. Учет таких ошибок округлений в расчетной модели регулятора с параметрической неопределенностью объекта имеет принципиальное значение для обеспечения устойчивости робастной системы и необходимой точности стабилизации потокосцепления.

Робастными системами стабилизации параметров асинхронных электроприводов занимаются ряд отечественных и зарубежных ученых [2-9]. Ими решены многие задачи как по разработке математических методов исследования, так и по изучению устойчивости, точности регулирования и быстродействия систем с заданной неопределенностью объекта. Однако задача о влиянии параметрической неопределенности робастного регулятора на устойчивость и точность системы стабилизации потокосцепления не рассматривалась. В связи с этим задача исследования устойчивости робастной системы и точности стабилизации потокосцепления ротора с параметрической неопределенностью объекта и регулятора в заданных границах представляется актуальной.

Целью работы является исследование устойчивости и точности робастной системы стабилизации потокосцепления ротора асинхронного электропривода при случайных вариациях неопределенных параметров объекта и регулятора в заданных границах.

Методы и результаты исследований. В статье [1] приводится система уравнений состояния объекта, состоящего из преобразователя частоты и обмоток статора и ротора, в нормальной операторной форме:

$$\begin{aligned} px_1 &= -\frac{1}{T_2} x_1 + \frac{L_{12} I_n}{T_2 \Psi_n} x_2; \\ px_2 &= -\frac{1}{T_{1eq}} x_2 + \frac{E_n}{R_{1eq} T_{1eq} I_n} x_3; \\ px_3 &= -\frac{1}{T_{fc}} x_3 + \frac{K_{fc} U_n}{T_{fc} E_n} u, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$x_1 = \frac{\Psi}{\Psi_n}; \quad x_2 = \frac{I}{I_n}; \quad x_3 = \frac{E}{E_n}; \quad u = \frac{U}{U_n};$$

p – оператор Лапласа; E – ЭДС преобразователя частоты; U – управляющее воздействие; I – ток в канале потокосцепления ротора; Ψ – модуль вектора потокосцепления ротора; T_{fc} – постоянная времени преобразователя частоты; $T_{1eq} = L_{1eq}/R_{1eq}$ – электромагнитная постоянная времени обмотки статора, причем $R_{1eq} = R_1 + (k_r)^2 R_2$ и $L_{1eq} = \sigma L_1$ – ее эквивалентное сопротивление и индуктивность рассеяния; R_1, R_2 – активные сопротивления обмоток статора и ротора; $T_2 = L_2/R_2$ – электромагнитная постоянная времени обмотки ротора; L_1, L_2 – индуктивности обмоток статора и ротора; L_{12} – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; $\sigma = 1 - (L_{12})^2/(L_1 L_2)$ – коэффициент рассеяния магнитного поля; $k_r = L_{12}/L_2$.

В настоящей работе эта система уравнений совместно с неопределенными параметрами $K_{fc}, R_{1eq}, R_2,$

L_1, L_2 и L_{12} объекта используется для построения математической модели устойчивости и точности робастной системы стабилизации потокосцепления ротора асинхронного электропривода при случайных вариациях неопределенных параметров в заданных границах.

Для построения такой модели система уравнений (1) приводится к канонической форме [1]:

$$\begin{aligned} px &= Ax + B_1 w + B_2 u; \\ z &= C_1 x + D_{11} w + D_{12} u; \\ y &= C_2 x + D_{21} w + D_{22} u, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_{2n}}{L_{2n}} & \frac{R_{2n}}{L_{2n}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_{1eqn}}{L_{1eqn}} & \frac{R_{1eqn}}{L_{1eqn}} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{fc}} \end{bmatrix};$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{pR_2}{L_{2n}} & \frac{pL_{12}}{L_{2n}} & -pL_2 & -\frac{pR_2}{L_{2n}} \\ 0 & -pL_{1eq} & -\frac{pR_{1eq}}{L_{1eqn}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{pK_{fc}}{T_{fc}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_{1eqn}}{L_{1eqn}} & \frac{R_{1eqn}}{L_{1eqn}} \\ 0 & R_{1eqn} & 0 \\ 0 & R_{2n} & 0 \\ 0 & R_{2n} & 0 \\ -\frac{R_{2n}}{L_{2n}} & \frac{R_{2n}}{L_{2n}} & 0 \\ R_{2n} & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad C_2 = [1 \ 0 \ 0];$$

$$D_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -pL_{1eq} & -\frac{pR_{1eq}}{L_{1eqn}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & pR_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{pR_2}{L_{2n}} & \frac{pL_{12}}{L_{2n}} & -pL_2 & -\frac{pR_2}{L_{2n}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B_2^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{T_{fc}} \end{bmatrix}; \quad D_{12}^T = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0];$$

$$D_{21} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; \quad D_{22} = [0];$$

$x = (x_1, x_2, x_3)^T$ – фазовый вектор; y – одномерный вектор выхода, по которому замыкается обратная связь; $z = (z_1, z_2, \dots, z_7)^T$, $w = (w_1, w_2, \dots, w_7)^T$ – соответственно входной и выходной векторы неопределенности, связанные между собою матричным выражением $w(p) = \Delta(p)z(p)$, в котором матрица неопределенности $\Delta(p)$ имеет диагональный вид.

Записанная каноническая форма уравнений (2) совместно с весовыми функциями [10], предназначенными для контроля качества робастной системы стабилизации, позволяет в Robust Control Toolbox рассчитать передаточную функцию H_∞ -субоптимального регулятора для номинального объекта. Эту передаточную функцию можно представить в виде

$$K(p) = k \frac{p^2 + b_1 p + b_2}{p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3}, \quad (3)$$

где $k, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2$ – параметры регулятора.

Будем считать, что передаточная функция регулятора (3) сохраняет свой вид при случайных вариациях параметров $k, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2$.

Тогда, разложив (3) в цепную дробь по алгоритму Евклида, получим структурную схему регулятора, представленную на рис. 1. Она содержит неопределенные параметры $k, k_1, k_2, k_3, T_1, T_2$, обусловленные, как уже отмечалось ранее, ошибками округлений, возникающих при проектировании регулятора.

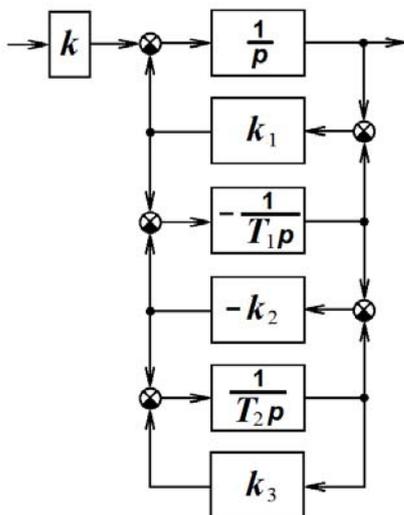


Рис. 1. Структурная схема H_∞ -субоптимального стабилизирующего робастного регулятора

Заменим представленную на рис. 1 структурную схему эквивалентной схемой по правилам преобразования структурных схем. Тогда получим следующие выражения для коэффициентов полиномов числителя и знаменателя передаточной функции робастного регулятора (3):

$$b_1 = \frac{1}{T_1}(k_2 - k_1) + \frac{1}{T_2}(k_3 - k_2); \quad a_1 = k_1 + b_1; \\ b_2 = \frac{1}{T_1 T_2} [k_3(k_2 - k_1) + k_1 k_2]; \quad (4)$$

$$a_2 = b_2 + k_1 \left[\frac{k_2}{T_1} + \frac{1}{T_2}(k_3 - k_2) \right]; \quad a_3 = \frac{k_1 k_2 k_3}{T_1 T_2}.$$

Система уравнений (1) совместно с (3) и выражениями (4) служит для исследования устойчивости и точности системы стабилизации потокосцепления ротора при случайных вариациях неопределенных параметров объекта и регулятора в заданных границах.

Точность стабилизации потокосцепления определяется по разбросу кривых его модуля переходных процессов, а запасы устойчивости по амплитуде и фазе – по диаграмме Бode при различных случайных вариациях неопределенных параметров регулятора $k, k_1, k_2, k_3, T_1, T_2$ и объекта $K_{fc}, R_{1eq}, R_2, L_1, L_2, L_{12}$ в заданных границах. При этом для случайного выбора параметров используется метод Монте-Карло [10]. Расчеты выполняются в MATLAB и прекращаются, когда на установившемся режиме работы системы переходные процессы не выходят за границы однопроцентной «трубки».

Процедура расчета устойчивости и точности системы стабилизации потокосцепления ротора при случайных вариациях неопределенных параметров в заданных границах сводится к следующей последовательности действий:

1. Рассчитывается передаточная функция (3) регулятора для номинального объекта.

2. Выполняется разложение найденной передаточной функции в цепную дробь.

3. Формируется структурная схема регулятора (рис. 1), соответствующая цепной дроби, и рассчитываются ее номинальные параметры $k_n, k_{1n}, k_{2n}, k_{3n}, T_{1n}, T_{2n}$.

4. Определяется программно передаточная функция объекта (1).

5. Формируется командой система стабилизации потокосцепления из последовательно соединенных передаточных функций регулятора (3) и объекта (1), охваченных единичной обратной связью.

6. Рассчитываются кривые переходных процессов потокосцепления и диаграмма Бode для разомкнутой системы при случайных вариациях параметров объекта $K_{fc}, R_{1eq}, R_2, L_1, L_2, L_{12}$ и регулятора $k, k_1, k_2, k_3, T_1, T_2$ в заданных границах.

7. Определяются по размахам кривых переходных процессов точность стабилизации потокосцепления, а по диаграмме Бode – запасы устойчивости по амплитуде и фазе.

Численное решение проводилось при следующих значениях исходных данных: $T_{fc}=0,001$ с; $R_{1n}=2,65$ Ом; $R_{2n}=2,0$ Ом; $L_{1n}=0,186$ Гн; $L_{2n}=0,189$ Гн; $L_{12n}=0,179$ Гн; $\sigma = 0,0996$, соответствующих асинхронному электроприводу с двигателем MDXMA100-32.

Рассчитанные по этим данным номинальные параметры регулятора оказались равными: $k_n=5,016 \cdot 10^5$; $k_{1n}=1,436 \cdot 10^4$; $k_{2n}=1,752 \cdot 10^4$; $k_{3n}=3,473 \cdot 10^3$; $T_{1n}=19,70$ с; $T_{2n}=1,256 \cdot 10^3$ с.

Неопределенные параметры объекта варьировались в диапазонах $\pm 90\%$, а параметры регулятора k_1, k_2 – в диапазонах $\pm 3\%$, k – в диапазоне $\pm 15\%$, а k_3, T_1, T_2 в диапазонах $\pm 20\%$ от их номинальных значений.

На рис. 2 представлено 20 кривых переходных процессов потокосцепления ротора, соответствующих случайным вариациям выбранных по методу Монте-Карло неопределенных параметров объекта и регулятора в заданных границах. Они получены в пакетах приложения MATLAB при единичном скачкообразном изменении задающего воздействия.

Как видно, кривые переходных процессов, изображенные на рис. 2, не выходят за границы 1% трубки.

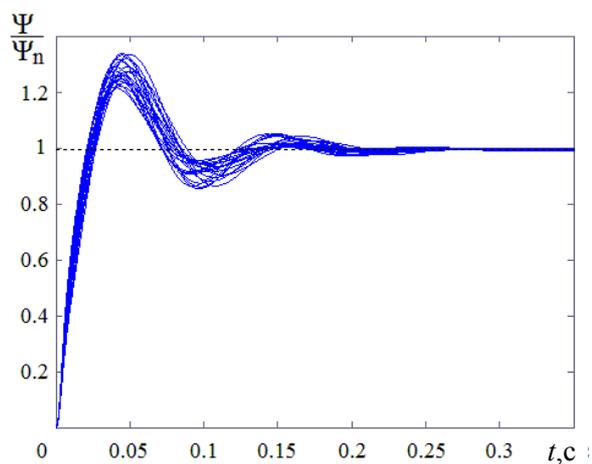


Рис. 2. Переходные процессы потокосцепления ротора

На рис. 3 изображена диаграмма Боде с 20 сгенерированными кривыми амплитудных $L(\omega)$ и с 20 кривыми фазовых $\varphi(\omega)$ частотных характеристик при тех же неопределенных параметрах, что и в предыдущем случае. Из представленных на этой диаграмме амплитудных $L(\omega)$ и фазовых $\varphi(\omega)$ характеристик видно, что система устойчива, так как амплитудная характеристика пересекает ось абсцисс раньше, чем фазовая характеристика, окончательно спадая, переходит за значение угла -180° . При этом расчетное значение запаса устойчивости по амплитуде составляет 19,9 дБ, а по фазе $-47,9^\circ$ для номинальных значений параметров объекта и регулятора при разбросах случайных кривых, не превышающих 4 дБ для амплитудных и 15° для фазовых частотных характеристик.

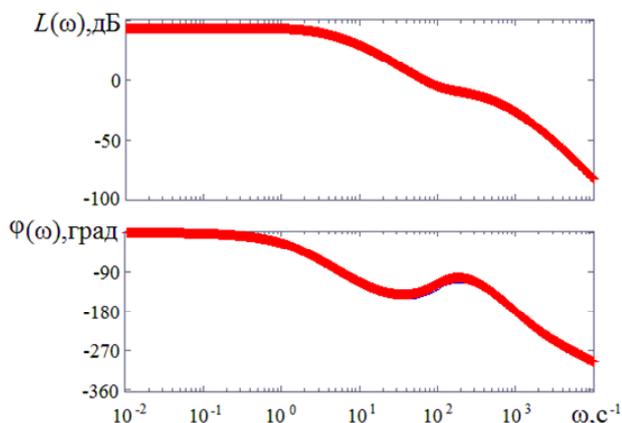


Рис. 3. Диаграмма Боде разомкнутой системы

Таким образом, результаты расчетов подтверждают целесообразность применения предложенной методики при конструировании робастных H_∞ -субоптимальных регуляторов из элементарных звеньев.

Выводы.

1. Впервые получены аналитические зависимости коэффициентов передаточной функции H_∞ -субоптимального регулятора от параметров его структурной схемы, представленной в виде соединения пропорциональных и интегрирующих звеньев.

2. Построена методика расчета устойчивости и точности робастной системы стабилизации потокосцеп-

ления ротора асинхронного электропривода при случайных вариациях неопределенных параметров объекта и регулятора в заданных границах.

3. Результаты проведенных расчетов показывают высокую точность стабилизации потокосцепления (отклонение менее 1 %) и малую чувствительность робастной системы стабилизации к случайным вариациям неопределенных параметров в заданных достаточно широких границах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хлопенко Н.Я., Хлопенко И.Н. Структурный синтез стабилизирующего робастного регулятора потокосцепления ротора // *Электротехника і електромеханіка*. – 2017. – №1 – С. 21-25. doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.04.
2. Елистратов В.Д., Ильина А.Г. Робастное управление следящим электроприводом с жесткой присоединенной нагрузкой с ограничением нормы H_∞ // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. – 2016. – №4. – С. 89-94.
3. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В., Хоменко В.В. Исследование влияния нелинейностей и вариации параметров объекта управления на динамические характеристики электромеханических следящих систем // *Вісник НТУ «ХП»*. – 2015. – №12(1121). – С. 68-71.
4. Несенчук А.А., Опейко О.Ф., Однолько Д.С. Моделирование динамики и расчет робастных параметров системы управления электропривода на основе корневых портретов // *Искусственный интеллект*. – 2014. – №3. – С. 90-103.
5. Никитина Т.Б. Парето-оптимальное решение многокритериальной задачи синтеза робастных регуляторов многомассовых электромеханических систем на основе многокритериальной стохастической мультигенной оптимизации // *Электротехника і електромеханіка*. – 2017. – №2 – С. 34-38. doi: 10.20998/2074-272X.2017.2.05.
6. Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Бовкунович В.С. Грубое векторное управление моментом и потоком асинхронного двигателя // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – №1. – С. 60-66.
7. Потапенко Е.М., Казурова А.Е., Савранская А.В. Обзор работ по динамике многомассовых неопределенных электромеханических систем, выполненных на кафедре электропривода ЗНТУ // *Электротехніка та електроенергетика*. – 2011. – №1. – С. 7-10. doi: 10.15588/1607-6761-2011-1-1.
8. Островерхов М.Я., Пижов В.М. Робастна система векторного керування швидкістю вентиляційно-індукторного електропривода // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2015. – Вип.3/2015(31). – С. 32-38.
9. Руднев Е.С., Морозова Д.И. μ -синтез робастного регулятора скорости синхронного электропривода // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2015. – №20. – С. 42-50. doi: 10.15276/eltecs.20.96.2015.06.
10. Richard Y., Chiang R., Michael G., Safonov M. MATLAB: Robust Control Toolbox. User's Guide. Version 2, 1998. – 230 p. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com>.

REFERENCES

1. Khlopenko N.J., Khlopenko I.N. Structural synthesis of a stabilizing robust controller of the rotor flux linkage. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.1, pp. 21-25. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.04.
2. Elistratov V.D., Ilina A.G. Robust control by servo drive with non-rigid load with H-infinity norm limitation. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*, 2016, no.4, pp. 89-94. (Rus).
3. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V., Khomenko V.V. Investigation of the effect of nonlinearities and variations of the control object parameters on dynamic characteristics of

- the electromechanical servo systems. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2015, no.12(1121), pp. 68-71. (Rus).
4. Nesenchuk A.A., Opeiko O.F., Odnolko D.S. Dynamics simulation and calculation of robust parameters for the electric drive control system on the basis of the root locus portraits. *Artificial Intelligence*, 2014, no.3, pp. 90-103. (Rus).
 5. Nikitina T.B. Pareto optimal solution of multiobjective synthesis of robust controllers of multimass electromechanical systems based on multiswarm stochastic multiagent optimization. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.2, pp. 34-38. doi: 10.20998/2074-272X.2017.2.05.
 6. Peresada S.M., Kovbasa S.N., Bovkunovich V.S. Rough vector control torque and flux induction motor. *Technical electrodynamics*, 2010, no.1. pp. 60-66. (Ukr).
 7. Potapenko E.M., Kazurova A.E., Savranskaya A.V. Review of works on dynamics of multimass uncertain electromechanical systems carried out in ZNTU electric drive department. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 2011, no.1, pp. 7-10. (Rus). doi: 10.15588/1607-6761-2011-1-1.
 8. Ostroverkhov M.J., Pyzhov V.M. Robust speed vector control system of gated inductor type electrical drive. *Electromechanical and energy saving systems*, 2015, iss.3/2015(31), pp. 32-38. (Ukr).
 9. Rudnev E.S., Morozova D.I. μ -synthesis of robust speed controller of synchronous electric drives. *Electrotechnic and computer systems*, 2015, no.20, pp. 42-50. (Rus). doi: 10.15276/eltecs.20.96.2015.06.
 10. Richard Y., Chiang R., Michael G., Safonov M. *MATLAB: Robust Control Toolbox. User's Guide. Version 2*, 1998. 230 p. Available at: <http://www.mathworks.com> (Accessed 12 May 2016).

Поступила (received) 23.04.2018

Хлопенко Иван Николаевич¹, магистр,
 Рожков Сергей Александрович¹, д.т.н., проф.,
 Хлопенко Николай Яковлевич², д.т.н., проф.,
¹ Херсонская государственная морская академия,
 73009, Херсон, пр. Ушакова, 20,
 e-mail: rozhkov_ser@meta.ua
² Национальный университет кораблестроения
 имени адмирала Макарова,
 54021, Николаев, пр. Центральный, 3,
 e-mail: khlopenko.n@gmail.com

I.N. Khlopenko¹, S.A. Rozhkov¹, N.J. Khlopenko²

¹ Kherson State Marine Academy,
 20, Ushakov Ave., Kherson, 73009, Ukraine.

² Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
 3, Central Ave., Nikolaev, 54021, Ukraine.

Stability and accuracy of the robust system for stabilizing the rotor flux-linkage of an asynchronous electric drive at random variations of the uncertain parameters within the specified boundaries.

Purpose. The aim is to investigate the stability and the accuracy of a robust system for stabilizing the rotor flux-linkage of an asynchronous electric drive at random variations of the uncertain parameters of the object and the regulator within the specified boundaries. **Methodology.** To make the research, the mathematical model of the rotor flux-linkage channel of the vector control system of an asynchronous electric drive with parametric uncertainty was applied. The transfer function of the H_∞ -suboptimal regulator was calculated using the mixed sensitivity method. This transfer function was used to construct the regulator structural scheme in the form of a connection of proportional and integrating links and several adders. Analytical dependences of the coefficients of the regulator's transfer function on the parameters of links of such a connection are determined. These dependences served to researching the influence of uncertain parameters of the regulator links and the object on the stability of the robust system and the accuracy of flux-linkage stabilization. **Results.** Investigations of the robust system stability and the accuracy of flux-linkage stabilization in the Robust Control Toolbox are done. The curves of the flux-linkage transient processes and the Bode diagram for the open system at random variations of the indeterminate parameters of the object and the regulator links within the specified boundaries are constructed. A choice of variable parameters was carried out by the Monte Carlo method. By the scatter of the obtained curves of the transient processes, the accuracy of flux-linkage stabilization was determined, and according to the Bode diagram, stability reserves in the amplitude and the phase of the robust system were determined. A high accuracy of flux-linkage stabilization (deviation less than 1 %) in fairly wide ranges of changing the uncertain parameters of the object and the regulator, while maintaining the stability of the system with permissible reserves in amplitude and phase, is established. **Originality.** For the first time, analytical dependences of the coefficients of the transfer function of the H_∞ -suboptimal regulator on the parameters of its structural scheme, which represented in the form of a connection of proportional and integrating links, are obtained. The method for calculating the stability of a robust flux-linkage control system and the accuracy of its stabilization at random variations of the uncertain parameters of the object and the regulator links within the specified boundaries is developed. **Practical value.** The use of the proposed method allows, during the design of the regulator, to ensure the selection of its elements from standard series. References 10, figures 3.

Key words: electric drive, vector control, flux-linkage channel, stabilizing robust system, stability, accuracy.