

ФИЛЬТРАЦИЯ ПОМЕХ РОБАСТНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЕМ РОТОРА

Хлопенко Н. Я., д.т.н, профессор кафедры судового электрооборудования и средств автоматизации Херсонской государственной морской академии, e-mail: khlopenko.n@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7773-4721;

Рожков С. А., д.т.н, заведующий кафедры судового электрооборудования и средств автоматизации Херсонской государственной морской академии, e-mail: rozhkov_ser@mata.ua, ORCID: 0000-0002-1662-004X;

Хлопенко И. Н., аспирант Херсонской государственной морской академии

Целью работы заключается в теоретическом исследовании фильтрации помех стабилизирующим H_∞ -субоптимальным робастным регулятором в системе управления потокосцеплением ротора асинхронного электродвигателя. Для проведения исследований применялась математическая модель канала потокосцепления 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 системы управления потокосцеплением с единичной обратной связью с суммирующим устройством полезного сигнала и помехи. Проведено компьютерное моделирование передаточной функции H_∞ -субоптимального регулятора. Построена структурная схема в пакете Simulink системы робастного управления потокосцеплением ротора с единичной обратной связью с суммирующим устройством полезного сигнала и помехи. Получены кривые переходных процессов потокосцепления при различных значениях размахов помех. Проведен анализ фильтрации помех робастным регулятором. Разработана методика фильтрации помех H_∞ -субоптимальным робастным регулятором в системе управления потокосцеплением ротора асинхронного электродвигателя. Методика позволяет оценивать точность размаха отфильтрованных регулятором помех по рассчитанной кривой переходного процесса потокосцепления. Результаты моделирования переходных процессов потокосцепления ротора подтверждают высокую точность стабилизации потокосцепления и малую чувствительность системы к помехам при ограничении их размахов до допустимых значений. Использование разработанной методики позволяет проводить расчеты по уточнению допусков на фильтрацию помех H_∞ -субоптимальным робастным регулятором в системе управления потокосцеплением ротора асинхронного электродвигателя.

Ключевые слова: робастное управление, потокосцепление ротора, помехи.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.122-131

Постановка задачи. Обычно регулятор настраивается на номинальную модель объекта. Однако при реализации регулятор подключается не к модели, а к реальному объекту. Поэтому при эксплуатации наблюдается расхождение между сигналами управления. Эту разницу сигналов на выходе системы управления потокосцеплением в условиях структурной неопределенности и помех удобно фильтровать H_∞ -субоптимальным робастным регулятором. Расчет и проектирование такого регулятора изучались в работах [1, 2]. Однако в указанных работах задача фильтрации помех (например, шумов датчика, контактов в разъемах, электромагнитных полей, наводки с частотой питающей сети и пр.), в робастной системе управления потокосцеплением ротора асинхронного электродвигателя не рассматривалась. Ее решение имеет принципиальное значение для уточнения допусков на фильтрацию помех системой управления с робастным регулятором.

Анализ последних достижений и публикаций по данной проблеме. Помехи на выходе робастной системы управления потокосцеплением ротора асинхронного двигателя могут достигать весьма больших значений. Поэтому на стадии проектирования конструктор должен располагать информацией о способности робастного регулятора препятствовать прохождению таких сигналов в пределах допусков.

В настоящее время применяются несколько методов подавления помех в системах управления различного назначения. К ним относятся методы адаптивного и робастного управления [1, 2, 3–11], матричных неравенств [12], инвариантных множеств [13, 14],

инвариантных эллипсоидов [14, 15], скользящих режимов [16, 17], большого коэффициента усиления [18] и др.

Метод адаптивного управления [3-5] обеспечивает компенсацию неопределенностей объекта при эксплуатации за счет автоматической настройки регулятора. Однако «очистка» системы от всевозможных неопределенностей с использованием адаптивных методов является обременительной и часто невыполнимой задачей.

В отличие от метода адаптивного управления робастный метод, построенный на базе H_∞ -теории [6-11], в большинстве случаев обеспечивает заданное качество управления без компенсации неопределенностей. Он позволяет построить грубую систему управления, так как создан с учетом неполноты знаний о реальном объекте.

Метод матричных неравенств [12] используется в H_∞ -теории робастного управления для синтеза грубых стабилизирующих регуляторов по состоянию и динамических регуляторов заданного порядка по измеряемому выходу в классе ограниченных по норме вариаций их параметров. Задача разрешимости таких регуляторов является более сложной и сводится к поиску двух взаимобратных матриц, удовлетворяющих линейным матричным неравенствам.

Вопросы гарантированного оценивания, фильтрации и минимаксного управления в динамических системах изложены в трудах [13, 14]. Фундаментом для них является метод инвариантных множеств.

Метод инвариантных эллипсоидов, предложенный в [14, 15], относится к инвариантным множествам. Он обеспечивает подавление ограниченных внешних возмущений в динамических системах. Главным инструментом для него служит техника линейных матричных неравенств.

Вопросами развития теории и построения систем управления скользящим режимом в технических системах занимаются многие ученые, так как этот режим является весьма уязвимым по отношению к структурным неопределенностям. Ряд их исследований [19-22], которые представляют теоретический и практический интерес, посвящены скользящим режимам в задачах управления электроприводов. Однако изменение корней характеристического уравнения в связи с изменением отдельных структур устройств управления может привести к нарушению условия существования и устойчивости скользящего режима.

Методы на основе большого коэффициента усиления [18] обладают повышенной точностью и робастной устойчивостью по отношению к неопределенным параметрам и внешним низкочастотным возмущениям. Однако при больших коэффициентах усиления не обеспечивается робастность переходных процессов. Кроме того, не все объекты допускают реализацию большого коэффициента усиления.

Задачами подавления внешних возмущений робастным регулятором в системах управления электроприводов занимаются многие ученые [23-29]. Характерным для данных работ является создание методов расчета подавления робастным регулятором случайных воздействий широкого спектра частот. Экспериментально подтверждено, что система с робастным регулятором имеет меньшую ошибку по сравнению с системой с типовым регулятором.

В последнее время интенсивно развивается теория стохастического робастного управления [30-32] на основе выпуклой и мультигенной оптимизации.

Таким образом, из проведенного обзора работ следует, что применение H_∞ -субоптимального робастного регулятора к задаче фильтрации помех в системе управления потокосцеплением ротора асинхронного электропривода представляется наиболее целесообразным.

Цель работы заключается в теоретическом исследовании фильтрации помех стабилизирующим H_∞ -субоптимальным робастным регулятором в системе управления потокосцеплением.

Методы и результаты исследований. Рассмотрим неопределенный объект управления [1], состоящий из преобразователя частоты и обмоток статора и ротора асинхронного электродвигателя.

Представим уравнения состояния объекта [1] в нормальной операторной матричной форме (1):

$$\begin{aligned} px &= Ax + Bu; \\ y &= Cx, \end{aligned} \tag{1}$$

где

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_2} & \frac{L_{12}I_n}{T_2\Psi_n} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{1eq}} & \frac{E_n}{R_{1eq}T_{1eq}I_n} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{fc}} \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_{fc}U_n}{T_{fc}E_n} \end{bmatrix}^T; \quad C = [1 \ 0 \ 0];$$

p – оператор Лапласа; $x=(x_1, x_2, x_3)^T$ – фазовый вектор, причем $x_1=\Psi/\Psi_n$; $x_2=I/I_n$; $x_3=E/E_n$; Ψ – модуль вектора потокосцепления ротора; I – ток в канале потокосцепления ротора; E – ЭДС преобразователя частоты; $u=U/U_n$ – управляющее воздействие; U – напряжение на выходе регулятора; y – одномерный вектор выхода, по которому замыкается обратная связь; T_{fc} – постоянная времени преобразователя частоты; $T_{1eq}=L_{1eq}/R_{1eq}$ – электромагнитная постоянная времени обмотки статора, причем $R_{1eq}=R_1+(k_r)^2R_2$ 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; $k_r=L_{12}/L_2$.

Соответствующую уравнениям (1) расширенную систему уравнений с неопределенными параметрами объекта $K_{fc}, R_{1eq}, R_2, L_1, L_2$ и L_{12} представим в виде (2):

$$\begin{aligned} px &= Ax + B_1w + B_2u; \\ z &= C_1x + D_{11}w + D_{12}u; \\ y &= C_2x + D_{21}w + D_{22}u, \end{aligned} \tag{2}$$

где

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

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{p_{R_2}}{L_{2n}} & \frac{p_{L_{12}}}{L_{2n}} & -p_{L_2} & -\frac{p_{R_2}}{L_{2n}} \\ 0 & -p_{L_{1eq}} & -\frac{p_{R_{1eq}}}{L_{1eqn}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{p_{K_{fc}}}{T_{fc}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B_2^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{T_{fc}} \end{bmatrix};$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_{1eqn}}{L_{1eqn}} & \frac{R_{1eqn}}{L_{1eqn}} \\ 0 & R_{1eqn} & 0 \\ 0 & R_{2n} & 0 \\ 0 & R_{2n} & 0 \\ -\frac{R_{2n}}{L_{2n}} & \frac{R_{2n}}{L_{2n}} & 0 \\ R_{2n} & 0 & 0 \end{bmatrix}; D_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -p_{L_{1eq}} & -\frac{p_{R_{1eq}}}{L_{1eqn}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{R_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{p_{R_2}}{L_{2n}} & \frac{p_{L_{12}}}{L_{2n}} & -p_{L_2} & -\frac{p_{R_2}}{L_{2n}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$C_2 = [1 \ 0 \ 0]; D_{12}^T = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; D_{21} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; D_{22} = [0];$$

$z=(z_1, z_2, \dots, z_7)^T$, $w=(w_1, w_2, \dots, w_7)^T$ – соответственно входной и выходной векторы неопределенности, связанные между собою матричным выражением $w(p)=\Delta(p) \cdot z(p)$, в котором матрица неопределенности $\Delta(p)$ имеет диагональный вид.

Система уравнений (2) служила для численного определения передаточной функции H_∞ -субоптимального регулятора по методу смешанной чувствительности [11]. Эта передаточная функция имеет вид дробно-рационального выражения (3):

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

где $k, b_1, b_2, a_1, a_2, a_3$ – некоторые коэффициенты, значения которых определяются в процессе численного решения задачи.

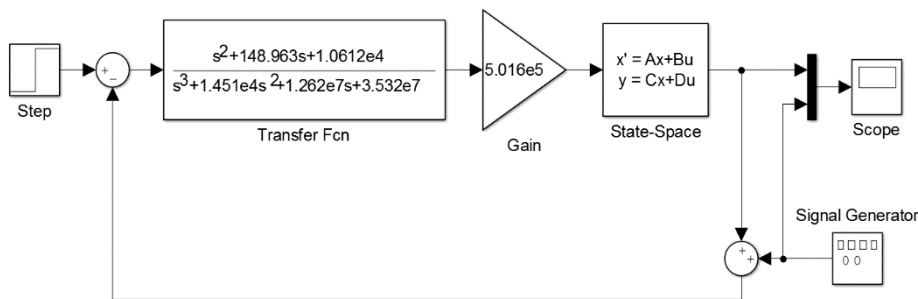


Рисунок 1 – Структурная схема системы робастного управления

Анализ фильтрации помех робастным регулятором проводился в пакете Simulink. В этом пакете для исследования влияния интенсивности случайного частотного спектра сигналов, характерного для шума датчика обратной связи, установленного на выходе робастной системы управления потокоцеплением, была построена структурная схема, представленная на рис. 1. В этой схеме помехи на выходе объекта создавались генератором случайных сигналов.

Расчеты выполнялись при следующих номинальных значениях исходных данных объекта (1): $T_{fc}=0,001$ 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.

Расчитанные по этим данным номинальные значения параметров регулятора (3), представленного передаточной функцией на рис. 1, оказались равными: $k=5,016 \cdot 10^5$; $b_1=148,963$; $b_2=1,0612 \cdot 10^4$; $a_1=1,451 \cdot 10^4$; $a_2=1,262 \cdot 10^7$; $a_3=3,532 \cdot 10^7$.

На рис.2 приведены отфильтрованные системой робастного управления кривые переходных процессов потокосцепления при значениях регулярных размахов помех 0,1, 0,3 и 0,5 (соответственно рис. 2 а, б, в).

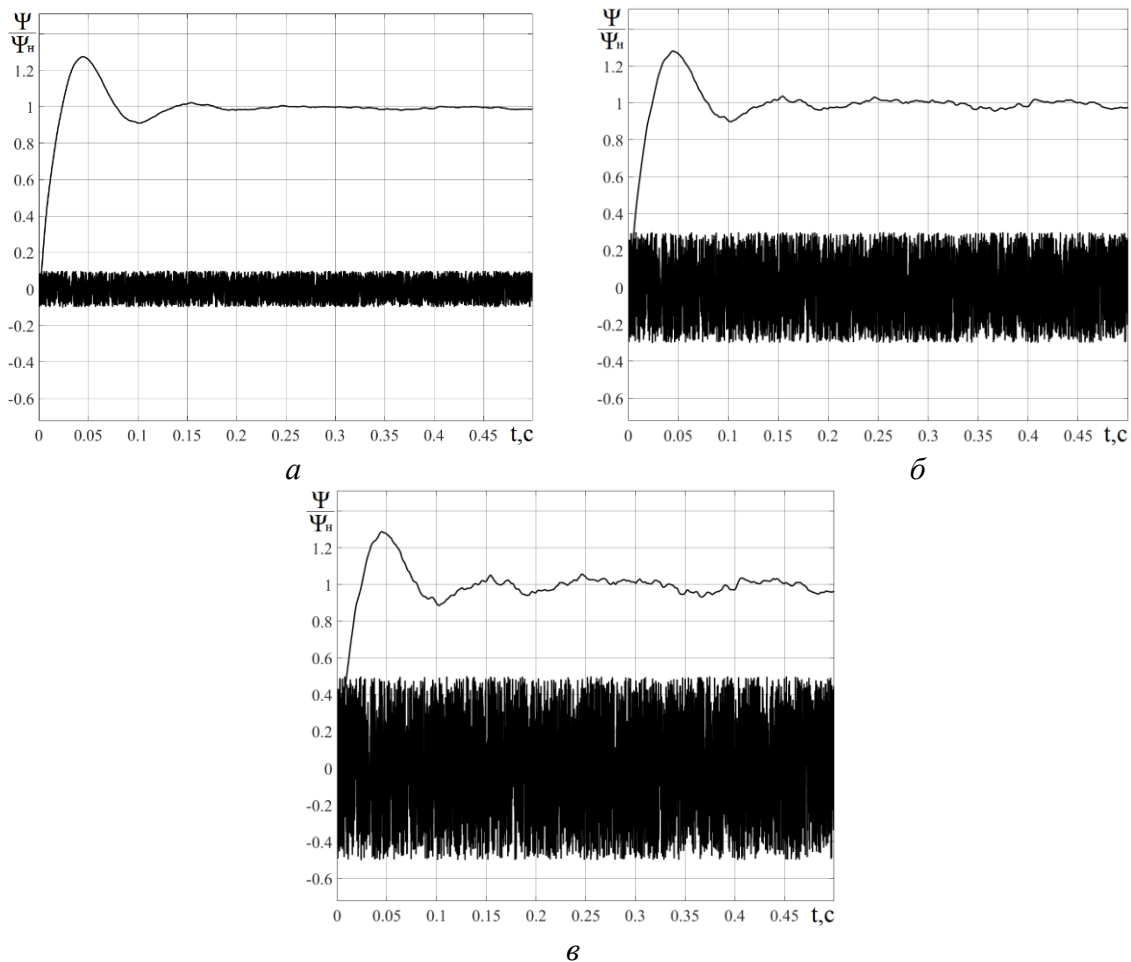


Рисунок 2 – Зависимость потокосцепления Ψ/Ψ_n от времени t при различных значениях размахов сгенерированных помех: а – размах 10 %; б – 30 %; в – 50 %

Из анализа кривых, представленных на рис. 2, видно, что с ростом размахов помех возрастает и уровень размаха выходного сигнала системы Ψ/Ψ_n . Поэтому величину размахов случайных помех следует ограничивать до допустимых значений, предусмотренных технической документацией. Если робастным регулятором ограничить помехи до допустимых значений не удастся, то необходимо установить причину их появления и затем свести их до минимума известными мероприятиями, освещенными в научно-технической литературе [33] (например, экранированием от наводок, заземлением корпусов и пр.)

Выводы

1. Разработана методика фильтрации помех H_∞ -субоптимальным робастным регулятором в системе управления потокосцеплением ротора асинхронного электродвигателя. Методика позволяет оценивать точность фильтрации помех по рассчитанной кривой переходного процесса потокосцепления.

2. Результаты моделирования переходных процессов потокосцепления ротора подтверждают высокую точность стабилизации и малую чувствительность системы к помехам.

3. Использование разработанной методики позволяет проводить расчеты по уточнению допусков на фильтрацию помех H_∞ -субоптимальным робастным регулятором в системе управления потокосцеплением ротора асинхронного электродвигателя.

4. Дальнейшие исследования будут направлены на экспериментальную проверку уровня фильтрации помех H_∞ -субоптимальным робастным регулятором.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хлопенко Н. Я., Хлопенко И. Н. Структурный синтез стабилизирующего робастного регулятора потокосцепления ротора. *Електротехніка і електромеханіка*. 2017. № 1. С.21–25. doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.04.

2. Хлопенко И. Н., Рожков С. А., Хлопенко Н. Я. Устойчивость и точность робастной системы стабилизации потокосцепления ротора асинхронного электродвигателя при случайных вариациях неопределенных параметров в заданных границах. *Електротехніка і електромеханіка*. 2018. №4. С.35–39. doi: 10.20998/2074-272X/2018.4.06.

3. Никифоров В. О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. СПб. : Наука, 2003. 282 с.

4. Цыкунов А. М. Робастное управление с компенсацией возмущений. Москва : Физматлит, 2012. 298 с.

5. Цыкунов А. М. Робастная система слежения с компенсацией возмущений и помех. *Вестник АГТУ*. 2014. № 1. С. 54–61.

6. Francis B. A., Zames G. On H_∞ -optimal sensitivity theory for SISO feedback systems. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1984. Vol. 29. P. 9–16.

7. Glover K. Robust stabilization of linear multivariable systems: relation to approximation. *Intern. J. Control*. 1986. Vol. 43. N 3. P. 741–766.

8. Doyle J. C., Glover K., Khargonekar P. P., Francis B. A. State-space solution to standard H_2 and H_∞ control problems. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1989. Vol. 34. N 8. P. 831–847.

9. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / под ред. Н. Д. Егупова. Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 744 с.

10. Честнов В. Н. H_∞ -подход к синтезу регуляторов при параметрической неопределенности и полигармонических внешних возмущениях. *Автоматика и телемеханика*. 2015. № 6. С. 112–127.

11. Richard Y., Chiang R., Michael G., Safonov M. MATLAB: Robust Control Toolbox. User's Guide. Version 2, 1998. 230 p. URL : <http://www.mathworks.com> (Accessed 12 May 2016).

12. Баландин Д. В., Коган М. М. Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. Москва : Физматлит, 2007. 280 с.

13. Куржанский А. Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности. Москва : Наука, 1977. 392 с.

14. Черноусько Ф. Л. Оценивание фазового состояния динамической системы. Москва : Наука, 1988. 320 с.

15. Назин С. А., Поляк Б. Т., Топунов М. В. Подавление ограниченных внешних возмущений с помощью метода инвариантных эллипсоидов. *Автоматика и телемеханика*. 2007. № 3. С. 106–125.

16. Уткин В. И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. Москва : Наука, 1981. 368 с.

17. Емельянов С. В. Системы автоматического управления с переменной структурой. Москва : Наука, 1967. 336 с.

18. Мееров М. В. Синтез структур систем автоматического управления высокой точности. Москва : Наука, 1967. 423 с.

19. Изосимов Д. Б., Рывкин С. Е. Скользящий режим в электроприводе : препринт. Москва : Институт проблем управления, 1993. 134 с.
20. Рывкин С. Е. Скользящие режимы в задачах управления автоматическим синхронным электроприводом. Москва : Наука, 2009. 237 с.
21. Вишнеvский В. И., Лазарев С. А. Адаптивный скользящий режим управления скоростью асинхронного электродвигателя. *Вестник Чувашского университета*. 2011. № 3. С. 52–59.
22. Полилов Е. В., Батрак А. М., Руднев Е. С. Практическая реализация разрывных алгоритмов в системах векторного управления синхронными электродвигателями. *Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського*. 2010. Ч. 3. С. 30–36.
23. 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 «ХПИ»*. 2015. № 12 (1121). С. 68–71.
24. 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.
25. Пересада С. М., Ковбаса С. Н., Бовкунович В. С. Грубое векторное управление моментом и потоком асинхронного двигателя. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 1. С. 60–66.
26. Полилов Е. В., Руднев Е. С., Скорик С. П. Синтез алгоритмов робастного управления синхронным электродвигателем методами H_∞ -теории. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. 2010. № 4 (63). Ч. 3. С. 15–20.
27. Елистратов В. Д., Ильина А. Г. Робастное управление следящим электроприводом с нежестко присоединенной нагрузкой с ограничением нормы H_∞ . *Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технологии*. Астрахань, 2016. № 4. С. 89–94.
28. Поляков В. Н., Ишматов З. Ш. Робастная система регулирования токов электроприводов с машиной двойного питания. *Электроприводы переменного тока (ЭППТ 2015) : труды международной шестнадцатой научно-технической конференции*. Екатеринбург, 2015. С. 89–94.
29. Никитина Т. Б., Коломиец В. В., Титарченко М. О., Хоменко В. В. Разработка и экспериментальное исследование стенда стохастической двухмассовой электромеханической системы. *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2013. № 19 (992). С. 113–120.
30. Чайковский М. М. Синтез субоптимального анизотропийного стохастического робастного управления методами выпуклой оптимизации : автореферат дис. доктора технических наук : 05.13.01. Москва : Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2012. 46 с.
31. Никитина Т. Б. Многокритериальный синтез робастного управления многомассовыми системами. Харьков : ХНАДУ, 2013. 432 с.
32. Кузнецов Б. И., Никитина Т. Б., Коломиец В. В., Хоменко В. В. Многокритериальный синтез стохастического робастного управления многомассовыми электромеханическими системами на основе стохастической мультигенной оптимизации. *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2014. № 62 (1104). С. 77–86.
33. Тесленко В. А. Влияние помех на измерительные цепи. *Промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика (ПиКАД)*. 2007. № 1. С. 52–56.

REFERENCES

1. Khlopenko, N. J. & Khlopenko, I. N. (2017). Structural synthesis of a stabilizing robust controller of the rotor flux linkage. *Electrical engineering & electromechanics*, 1, 21–25. doi: 10.20998/2074-272X.2017.1.04.
2. Khlopenko, I. N., Rozhkov, S. A. & Khlopenko, N. J. (2018). 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. *Electrical engineering & electromechanics*, 4, 35–39. doi: 10.20998/2074-272X.2018.4.06.
3. Nikiforov V. O. (2003). *Adaptivnoe i robstnoe upravlenie s kompensatsiei vozmushchenii*. Saint Petersburg : Nauka Publ.
4. Tsykunov A. M. (2012). *Robstnoe upravlenie s kompensatsiei vozmushchenii*. Moscow : Fizmatlit Publ.
5. Tsykunov A. M. (2014). Robust tracking system with compensation of perturbations and noises. *Vestnik AGTU. Ser.: Upravlenye, vychyslytelnaia tekhnika i informatyka*, 1, 54–61.
6. Francis, B. A. & Zames, G. (1984). On H_∞ -optimal sensitivity theory for SISO feedback systems. *IEEE Trans. Automat. Control*, Vol. 29, 9–16.
7. Glover K. (1986). Robust stabilization of linear multivariable systems: relation to approximation. *Intern. J. Control*. Vol. 43, 3, 741–766.
8. Doyle, J. C., Glover, K., Khargonekar, P. P. & Francis, B. A. (1989). State-space solution to standard H_2 and H_∞ control problems. *IEEE Trans. Automat. Control*. Vol. 34, 8, 831–847.
9. Egupov N. D. (2002). *Metody robstnogo, neuro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniia*. Moscow : Publishing House of the MSTU named after N.E. Bauman.
10. Chestnov V. N. (2015). H_∞ -approach to controller synthesis under parametric uncertainty and polyharmonic external disturbances. *Automation and Remote Control*, 6, 112–127.
11. Richard, Y., Chiang, R., Michael, G., Safonov, M. (1998). MATLAB: Robust Control Toolbox. User's Guide. Version 2. Retrieved from <http://www.mathworks.com>.
12. Balandin, D. V. & Kogan, M. M. (2007). *Sintez zakonov upravleniia na osnove lineinykh matrichnykh neravenstv*. Moscow : Nauka Publ.
13. Kurzhanskyi, A. B. (1977). *Upravlenye y nabliudenye v uslovyakh neopredelennosti*. Moskva : Nauka.
14. Chernousko F. L. (1988). *Otsenyvanye fazovoho sostoiانيا dynamicheskoi systemy*. Moskva : Nauka.
15. Nazin, S. A., Poliak, B. T. & Topunov M. V. (2007). Podavlenie ogranichennykh vneshnykh vozmushchenii s pomoshch'iu metoda invariantnykh ellipsoidov. *Avtomatika i telemekhanika*, 3, 106–125.
16. Utkyn, V. Y. (1981). *Skolziashchye rezhymy v zadachakh optymyzatsyi i upravleniia*. Moskva : Nauka.
17. Emelianov, S. V. (1967). *Systemy avtomaticheskoho upravleniia s peremennoi strukturoi*. Moskva : Nauka.
18. Meerov, M. V. (1967). *Syntez struktur system avtomaticheskoho upravleniia vysokoi tochnosti*. Moskva : Nauka.
19. Izosymov, D. B. & Ryvkyn, S. E. (1993). *Skolziashchyi rezhym v elektropryvide : prepynt*. Moskva : Instytut problem upravleniia.
20. Ryvkin, S. E. (2009). *Skolziashchye rezhymy v zadachakh upravleniia avtomaticheskym synkhronnym elektropryvodom*. Moskva : Nauka.
21. Vishnevskiy, V. I., Lazarev, S. A. & Mityukov, P. V. (2011). The adaptive sliding-mode speed observer for sensorless induction motors drives. *Bulletin of the Chuvash University*, 3, 52–59.
22. Polilov, E. V., Batrak, A. M. & Rudnev, E. S. (2010). Practical implementation of algorithms in a discontinuous system of vector control synchronous motors. *Bulletin of the Kremenchuk State University n.a. Mikhail Ostrogradsky*, 3, 30–36.

23. Kuznetsov, B. Y., Nykytyna, T. B., Kolomyets, V. V. & Khomenko, V. V. (2015). Issledovanye vliyaniya nelyneinosti i varyatsyy parametrov obyekta upravleniya na dynamycheskye kharakterystyky elektromekhanicheskyykh slediashchykh system. *Visnyk NTU «KhPI»*, 12 (1121), 68–71.
24. Nesenчук, A. A., Opeiko, O. F. & Odnolko, D. S. (2014). Dynamics simulation and calculation of robust parameters for the electric drive control system on the basis of the root locus portraits. *Artificial Intelligence*, 3, 90–103.
25. Peresada, S. M., Kovbasa, S. N. & Bovkunovich, V. S. (2010). Rough vector control torque and flux induction motor. *Tekhnichna elektrodynamika*, 1, 60–66.
26. Polilov, E. V., Rudnev, E. S., Skorik, S. P. (2010). Synthesis of robust control algorithms for a synchronous electric motor means H_∞ -theory. *Transactions of Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State University*, 4/2010 (63), part 3, 15–20.
27. Elistratov, V. D. & Ilina, A. G. (2016). 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*, 4, 89–94.
28. Poliakov, V. N. & Ishmatov, Z. Sh. (2015). Robastnaia sistema rehulyrovaniya tokov elektropryvodov s mashynoi dvoynoho pytaniya. *Elektropryvody peremennoho toka (EPPT 2015) : trudy mezhdunarodnoi shestnadsatoi nauchno-tekhnycheskoi konferentsyy*. Ekaterynburh, 89–94.
29. Nykytyna, T. B., Kolomyets, V. V., Tytarchenko, M. O. & Khomenko V. V. (2013). Razrabotka i eksperymentalnoe issledovanye stenda stokhastycheskoi dvukhmassovoi elektromekhanicheskoi systemy. *Vestnyk NTU «KhPY»*, 19 (992), 113–120.
30. Chaikovskiy M. M. (2012). Syntez suboptymalnoho anyzotropyinoho stokhastycheskoho robastnoho upravleniya metodamy vypukloi optymyzatsyy. *Extended abstract of candidate's thesis*. Moskva.
31. Nikitina T. B. (2013). *Mnogokriterial'nyj sintez robastnogo upravlenija mnogomassovymi sistemami*. Kharkiv : Kharkiv National Automobile and Highway University Publ.
32. Kuznetsov, B. Y., Nykytyna, T. B., Kolomyets, V. V. & Khomenko, V. V. (2014). Mnohokryteryalnyi syntez stokhastycheskoho robastnoho upravleniya mnogomassovymy elektromekhanicheskymy systemamy na osnove stokhastycheskoi multyhennoi optymyzatsyy. *Vestnyk NTU «KhPY»*, 62 (1104), 77–86.
33. Nykytyna, T. B., Kolomyets, V. V., Tytarchenko, M. O. & Khomenko, V. V. (2013). Razrabotka y eksperymentalnoe issledovanye stenda stokhastycheskoi dvukhmassovoi elektromekhanicheskoi systemy. *Vestnyk NTU «KhPY»*, 19 (992), 113–120.
34. Teslenko V. A. (2007). Vliyanye pomekh na izmerytelnye tsepy. *Promyshlennye izmereniya, kontrol, avtomatyzatsiya, dyahnostyka*, 1, 52–56.

Хлопенко М. Я., Рожков С. О., Хлопенко І. М. ФІЛЬТРАЦІЯ ПЕРЕШКОД РОБАСТНИМ РЕГУЛЯТОРОМ В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯМ РОТОРА

Мета роботи полягає в теоретичному дослідженні фільтрації перешкод стабілізуючим H_∞ -субоптимальним робастним регулятором в системі керування потокозчепленням ротора асинхронного електродвигуна. Для проведення досліджень застосовувалася математична модель каналу потокозчеплення ротора системи векторного керування асинхронного електроприводу з параметричною невизначеністю. Розраховувалася передавальна функція H_∞ -субоптимального регулятора за методом мішаної чутливості. Ця передавальна функція використовувалася для побудови структурної схеми системи керування потокозчепленням з одиничним зворотним зв'язком із сумуючим пристроєм корисного сигналу та перешкоди. Проведено комп'ютерне моделювання передавальної функції H_∞ -субоптимального регулятора. Побудовано структурну схему в пакеті Simulink системи робастного керування потокозчепленням ротора з одиничним зворотним зв'язком із сумуючим пристроєм корисного сигналу та перешкоди. Отримано криві перехідних процесів потокозчеплення при різних значеннях розмахів перешкод. Проведено аналіз фільтрації перешкод робастним регулятором. Розроблено методика фільтрації перешкод H_∞ -субоптимальним робастним регулятором в системі керування потокозчепленням ротора асинхронного електродвигуна. Методика дозволяє оцінювати точність розмаху відфільтрованих регулятором

перешкод по розрахованій кривій перехідного процесу поточкозчеплення. Результати моделювання перехідних процесів поточкозчеплення ротора підтверджують високу точність стабілізації поточкозчеплення та малу чутливість системи до перешкод при обмеженні їх розмахів до допустимих значень. Використання розробленої методики дозволяє проводити розрахунки з уточнення допусків на фільтрацію перешкод H_∞ -субоптимальним робастним регулятором в системі керування поточкозчепленням ротора асинхронного електродвигуна. Бібл.33. рис.2.

Ключові слова: робастне керування, поточкозчеплення ротора, перешкоди.

Khlopenko N. J., Rozhkov S. A., Khlopenko I. N. FILTRATION OF UNDESIRE SIGNALS BY THE ROBUST CONTROLLER IN THE ROTOR FLUX-LINKAGE CONTROL SYSTEM

Purpose. The aim of the work is to theoretically study undesired signals being filtered by a stabilizing H_∞ -suboptimal robust controller in the rotor flux-linkage control system of an asynchronous motor.

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 has been applied. The transfer function of the H_∞ -suboptimal controller has been calculated using the mixed sensitivity method. This transfer function has been used to design a structural scheme of a flux-linkage control system with single feedback with a summing device of desired and undesired signals. **Results.** Computer simulation of the transfer function of the H_∞ -suboptimal controller has been carried out. A structural scheme of a robust control system for rotor flux-linkage with single feedback with a summing device of desired and undesired signals has been built in the Simulink application. The curves of the flux-linkage transient processes for various values of the amplitude of undesired signal have been obtained. The analysis of undesired signal filtering by a robust controller has been carried out. **Originality.** The method for filtering undesired signal by a H_∞ -suboptimal robust controller in the rotor flux-linkage control system of an asynchronous motor is developed. The method allows to evaluate the accuracy of the range of undesired signals filtered by the controller from the calculated flux-linkage transient process curve. The rotor flux-linkage transient processes simulation results prove the high accuracy of flux-linkage stabilization and the low sensitivity of the system to undesired signals while limiting their range to acceptable values. **Practical value.** The application of designed method allows to carry out calculations to clarify the tolerances for undesired signals filtering by the H_∞ -suboptimal robust controller in the rotor flux-linkage control system of an asynchronous motor.

Keywords: robust control, rotor flux-linkage, undesired signals.

© Хлопенко М. Я., Рожков С. О., Хлопенко І. М.

Статтю прийнято
до редакції 17.04.19