

УДК 681.5.015; 621.313.33

Интегральный критерий параметрической робастности асинхронного электропривода с наблюдателем состояния*

К.С. АФАНАСЬЕВ¹, К.В. ВАЩЕНКО²

¹ 634034, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, кандидат технических наук, ассистент. E-mail: afanks@tpu.ru

² 634034, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 30, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, студентка. E-mail: vashchenkokseniya@gmail.com

Разработка и исследование асинхронных электроприводов с наблюдателями состояния в настоящее время являются актуальными техническими задачами. Основная проблема подобных электроприводов – изменение внутренних параметров электродвигателя в процессе эксплуатации, что оказывает влияние на работу системы управления асинхронным электроприводом. При этом влияние нестабильности отдельных внутренних параметров на выходные переменные электропривода проявляется неодинаково. До настоящего времени не было предложено какого-либо квалитетического подхода для количественной оценки качества функционирования электроприводов с наблюдателями состояния. Цель работы – разработка и применение интегрального критерия, позволяющего комплексно учесть степень влияния изменения внутренних параметров на работу системы. Среди процессов, вызывающих флуктуацию параметров регулируемого электродвигателя, наиболее значимыми являются процессы нагрева и охлаждения, сопровождающиеся изменением активных сопротивлений обмоток. Для проверки работоспособности предлагаемого критерия используется имитационное моделирование асинхронных электроприводов с различными типами наблюдателей состояния в программной среде MATLAB Simulink. Программа исследований заключалась в расчете интегрального критерия при пуске электропривода с наблюдателем под нагрузкой. Исследованию были подвергнуты электроприводы с тремя различными видами наблюдателей состояния – расширенным фильтром Калмана и двумя вариантами наблюдателя полного порядка. Моделирование производилось с различными значениями активных сопротивлений обмоток двигателя, варьируемых в диапазоне $\pm 20\%$ от базового значения. Полученные результаты были сведены в массив данных, который был визуализирован в виде поверхности функции двух переменных – зависимости интегрального критерия одновременно от активных сопротивлений статора и ротора. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что модифицированный наблюдатель полного порядка обеспечивает меньшую степень зависимости асинхронного электропривода от влияния изменения активных сопротивлений обмоток.

* Статья получена 07 сентября 2016 г.

Ключевые слова: интегральный критерий, асинхронный электропривод, наблюдатель состояния полного порядка, параметрическая робастность, расширенный фильтр Калмана, активные сопротивления, асинхронный электродвигатель, моделирование

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-1-7-14

ВВЕДЕНИЕ

Современный асинхронный электропривод (АЭП) с векторным управлением [1, 2] – сложная нелинейная динамическая система. Это обусловлено, главным образом, математическим описанием асинхронного электродвигателя (АД), являющегося ядром электромеханической системы. На качество переходных процессов и установившихся режимов работы АЭП влияет огромное количество внешних и внутренних возмущающих факторов. При этом анализ динамической системы значительно усложняется, если в качестве обратной связи используется сигнал наблюдателя состояния [3–8], использующего в своей основе математическую модель асинхронного электродвигателя и имеющего ограниченный диапазон устойчивой работы. Синтез электроприводов с наблюдателями состояния является в настоящее время актуальной технической задачей, поэтому интерес вызывает учет влияния возмущающих факторов на динамические и статические показатели качества функционирования электропривода на стадии его разработки.

Известно, что на работу электропривода с наблюдателем существенное влияние оказывает изменение его внутренних параметров в процессе работы [9, 10]. В существующих работах предлагается оценивать качество процессов в АЭП по их качественным картинкам при моделировании или экспериментальных исследованиях, однако не представлен метод количественной оценки влияния параметрических возмущений на работу электропривода с наблюдателем. Целью данной работы является введение и обоснование эффективности интегрального критерия параметрической робастности АЭП с наблюдателем состояния в цепи обратной связи, позволяющего численно оценить качество работы электромеханической системы при любых параметрических возмущениях.

1. ОПИСАНИЕ ПОДХОДА К РАЗРАБОТКЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ РОБАСТНОСТИ

Из теории автоматического управления известно широкое применение интегральных методов для оценки качества процессов в нелинейных и нестационарных динамических системах [11]. Подобные методы основываются на численном или аналитическом интегрировании функций, описывающих процессы в исследуемых объектах. Для сходимости интеграла функционал представляют в виде отклонения переходной характеристики от установившегося значения, а не ее абсолютное значение [12]. Так как переходные процессы зачастую имеют колебательный характер, целесообразнее использовать модуль или квадрат от вышеуказанного отклонения, чтобы учесть знакопеременность подынтегрального функционала.

Учитывая вышеуказанные факты, для количественной оценки степени параметрической робастности на этапе разработки асинхронных электроприводов с наблюдателями состояния предлагается использовать следующий интегральный критерий качества, основанный на интегрировании мгновенных значений выходных переменных электропривода:

$$I(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) = \frac{\int_0^{t_{\text{пп}}} |\omega_1(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n, t) - \omega_2(t)| dt}{\int_0^{t_{\text{пп}}} |\omega_2(t)| dt} 100 \%$$

Здесь $\omega_1(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n, t)$ – угловая частота вращения двигателя асинхронного электропривода с наблюдателем состояния; $\omega_2(t)$ – угловая частота вращения электропривода с датчиками переменных состояния; $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ – компоненты вектора внутренних параметров асинхронного электропривода.

Верхний предел интегрирования $t_{\text{пп}}$ представляет собой продолжительность исследуемого процесса в АЭП. Наибольшее влияние изменения внутренних параметров проявляется в переходных режимах работы электропривода, к которым относятся пуск, реверс, останов, набросы и сбросы нагрузки.

Таким образом, критерий позволит получить количественную оценку степени отклонения выходной координаты электропривода с наблюдателем состояния от выхода АЭП без наблюдателя при изменении внутренних параметров $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ в первой из указанных электромеханических систем, принимая вторую за эталонную.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В работах [13–15] доказано, что наибольшее влияние на работу асинхронного электропривода с наблюдателем состояния в цепи обратной связи оказывает изменение активных сопротивлений обмоток статора и ротора АД. Вариации индуктивностей в больших пределах не вносят существенных изменений в качественную картину выходных переменных АЭП, а увеличение эквивалентного момента инерции электропривода приводит исключительно к затягиванию длительности переходных процессов. Учитывая эти результаты, интегральный критерий параметрической робастности рассчитывался исключительно при изменении активных сопротивлений обмоток двигателя.

Схема исследования электропривода с наблюдателем состояния при помощи интегрального критерия параметрической робастности представлена на рис. 1.

Программа исследования степени параметрической робастности электропривода с наблюдателем состояния заключалась в сравнении выходных координат двух имитационных моделей асинхронных электроприводов в режиме пуска под номинальной нагрузкой. В качестве АД использовался двигатель типа АИР 90L4 с номинальной мощностью $P_{2н} = 2,2$ кВт и синхронной частотой вращения $n_0 = 1500$ об/мин. В одной из моделей асинхронного

электропривода с векторным управлением использовались в качестве обратных связей выходные сигналы датчиков угловой частоты вращения и потока сцепления ротора, а во второй – оценки, полученные наблюдателем состояния. При этом производилось варьирование активных сопротивлений обмоток двигателя в системе с наблюдателем состояния в пределах $\pm 20\%$ от базовых величин, за которые были приняты расчетные номинальные значения сопротивлений АД.

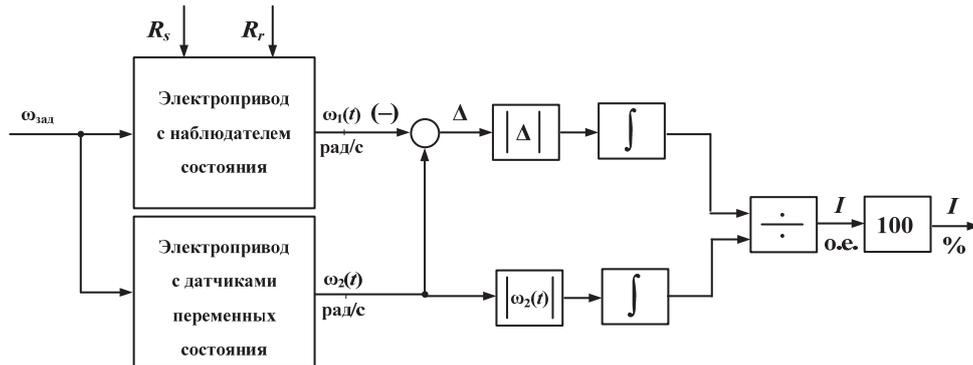


Рис. 1. Схема исследования электропривода с наблюдателем состояния при помощи интегрального критерия параметрической робастности

Исследования проводились при использовании трех различных типов наблюдателя состояния АД – расширенного фильтра Калмана [14], наблюдателя полного порядка [13], а также модифицированного наблюдателя состояния, предложенного в [15].

На рис. 2–4 приведены графики поверхностей интегрального критерия робастности, выраженного в процентах, как функции от активных сопротивлений обмоток статора и ротора АЭП с различными наблюдателями состояния.

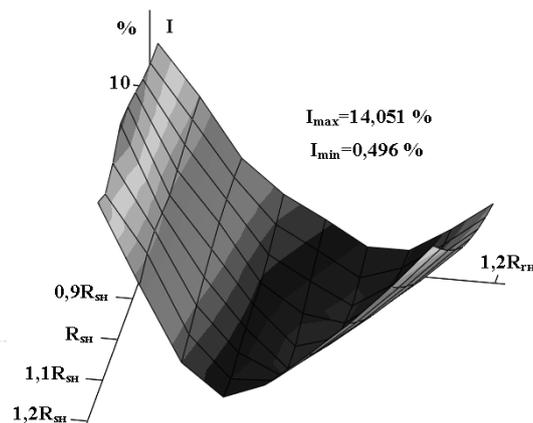


Рис. 2. Поверхность интегрального критерия параметрической робастности электропривода с наблюдателем полного порядка при вариации активных сопротивлений обмоток АД

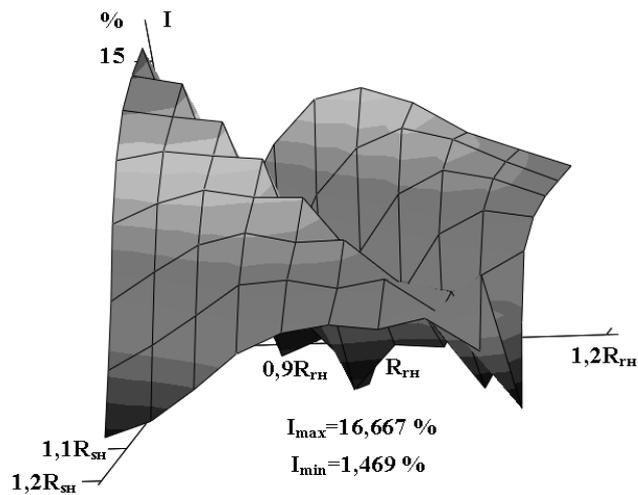


Рис. 3. Поверхность интегрального критерия параметрической робастности электропривода с расширенным фильтром Калмана при вариации активных сопротивлений обмоток АД

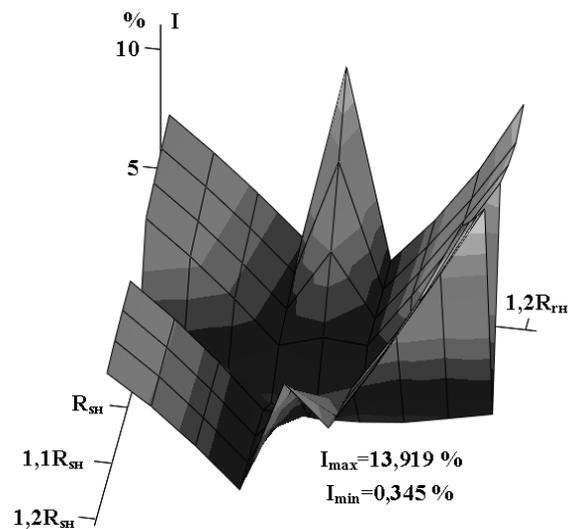


Рис. 4. Поверхность интегрального критерия параметрической робастности электропривода с модифицированным наблюдателем полного порядка при вариации активных сопротивлений обмоток АД

Результаты численного моделирования показали, что асинхронный электропривод с модифицированным наблюдателем полного порядка обеспечивает наименьшее значение предложенного интегрального критерия параметрической робастности как при изменении активных сопротивлений обмоток, так и при номинальных внутренних параметрах. Таким образом, предложенный интегральный критерий численно подтвердил качественные результаты [15], что свидетельствует о целесообразности его применения при исследовании

довании чувствительности электроприводов с наблюдателями в цепи обратной связи к флуктуации параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный интегральный критерий позволяет путем сопоставления траекторий выходных сигналов электропривода в динамических режимах получить количественную оценку степени чувствительности асинхронных электроприводов с наблюдателями состояния к изменению внутренних параметров двигателя. Установлено, что модифицированный наблюдатель полного порядка получает преимущество при использовании по сравнению с рассмотренными аналогами в условиях изменения активных сопротивлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Blaschke F.* The principle of field orientation applied to the new trans-vector closed-loop control system for rotating field machines // *Siemens-Review*. – 1972. – Vol. 39. – P. 217–220.
2. *Виноградов А.Б.* Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: Иван. гос. энергет. ун-т им. В.И. Ленина, 2008. – 298 с.
3. *Kubota H., Matsuse K., Nakano T.* DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1993. – Vol. 29, N 2. – P. 344–348.
4. *Marchesoni M.A., Soressi E.* Simple approach to flux and speed observation in induction motor drives // *Proceedings IECON'94*. – Piscataway, NJ: IEEE, 1994. – Vol. 1. – P. 305–310.
5. *Sensorless control of AC motor drives: speed and position sensorless operation* / ed. by K. Rajashekar, A. Kawamura, K. Matsuse. – Piscataway, NJ: IEEE press, 1996.
6. *Holtz J.* Sensorless control of induction motor drives // *Proceedings of the IEEE*. – 2002. – Vol. 90, N 8. – P. 1359–1394.
7. *Hinkkanen M.* Analysis and design of full-order flux observers for sensorless induction motors // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2004. – Vol. 51, N 5. – P. 1033–1040.
8. Синтез идентификатора координат для бездатчикового асинхронного электропривода / В.В. Вдовин, А.А.З. Диаб, Д.А. Котин, В.В. Панкратов // *Научный вестник НГТУ*. – 2014. – № 1 (54). – С. 5–17.
9. *Каширских В.Г.* Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей. – Кемерово: Изд-во КузГТУ, 2005. – 139 с.
10. *Виноградов А., Сибирцев А., Колодин И.* Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ // *Силовая электроника*. – 2006. – № 3. – С. 46–51.
11. *Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 2. Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления* / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 640 с.
12. *Диллигенская А.Н.* Идентификация объектов управления: учебное пособие / Самарский государственный технический университет. – Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2009. – 136 с.
13. *Ланграф С.В., Глазырин А.С., Афанасьев К.С.* Применение наблюдателя Люенбергера для синтеза векторных бездатчиковых асинхронных электроприводов // *Известия вузов. Электротехника*. – 2011. – № 6. – С. 57–61.
14. *Афанасьев К.С., Глазырин А.С.* Применение расширенного фильтра Калмана для улучшения параметрической робастности бездатчикового асинхронного электропривода // *Электротехнические комплексы и системы управления*. – 2012. – № 1. – С. 2–7.
15. *Афанасьев К.С., Глазырин А.С.* Наблюдатель полного вектора состояния и момента нагрузки асинхронного электродвигателя // *Электротехнические комплексы и системы управления*. – 2013. – № 4. – С. 24–30.

Афанасьев Кирилл Сергеевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры электропривода и электрооборудования Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований – идентификация состояния асинхронных электродвигателей. E-mail: afanks@tpu.ru

Ващенко Ксения Вячеславовна, студентка кафедры электропривода и электрооборудования Национального исследовательского Томского политехнического университета. Основное направление научных исследований – синтез наблюдателей состояния асинхронных электродвигателей. E-mail: vashchenkokseniya@gmail.com

An integral criterion of the parametric robustness of an induction motor drive with an observer*

K.S. AFANASIEV¹, K.V. VASHCHENKO²

¹*National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Ave., Tomsk, 634034, Russian Federation, PhD (Eng.), assistant lecturer. E-mail: afanks@tpu.ru*

²*National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Ave., Tomsk, 634034, Russian Federation, student. E-mail: vashchenkokseniya@gmail.com*

Development and research of the induction motor drive with an observer is an urgent problem. The main problem of these motor drives is a change of internal parameters of the motor during operation. An impact of the instability of individual internal parameters on the output variables of the motor drive manifests itself differently. Up to now any qualimetric approaches to quantify the operation quality of the motor drive with observers have not been proposed. The paper is aimed to introduce a concept of an integral criterion that allows taking into account the degree of impact of internal parameter changes on the system operation. Among the processes that cause fluctuations in the motor parameters, the most significant are the processes of heating and cooling accompanied by a change in resistance of the windings. To test the efficiency of the proposed criterion, simulation of induction motors with different types of the observer were used in the software environment MATLAB Simulink. The research program was to calculate an integral criterion when starting the electric drive with an observer under load. We investigated induction motor drives with three types of observers – the Extended Kalman Filter and two versions of the full-order observer. Simulation was performed with different resistances of the motor windings in the range $\pm 20\%$ of the base value. The findings were presented in the form of an array of data. The array was visualized as function surfaces of two variables, namely the dependence of the integral criterion on the active resistance of both the stator and the rotor. The results of these studies indicate that the modified full-order observer provides a lower degree of dependence of the electric drives on the effects of winding active resistance changes.

Keywords: integral criterion, induction motor drive, full-order observer, parametric robustness, Extended Kalman Filter, active resistance, induction motor, simulation

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-1-7-14

REFERENCES

1. Blaschke F. The principle of field orientation applied to the new trans-vector closed-loop control system for rotating field machines. *Siemens-Review*, 1972, vol. 39, pp. 217–220.
2. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector control of induction drive]. Ivanovo, Ivanovo State Power University Publ., 2008. 298 p.
3. Kubota H., Matsuse K., Nakano T. DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1993, vol. 29, no. 2, pp. 344–348.

* Received 07 September 2016.

4. Marchesoni M.A., Soressi E. Simple approach to flux and speed observation in induction motor drives. *Proceedings of IECON'94*. Piscataway, NJ, IEEE, 1994, vol. 1, pp. 305–310.
5. Rajashekara K., Kawamura A., Matsuse K., eds. *Sensorless control of AC motor drives: speed and position sensorless operation*. Piscataway, NJ, IEEE press, 1996.
6. Holtz J. Sensorless control of induction motor drives. *Proceedings of the IEEE*, 2002, vol. 90, no. 8, pp. 1359–1394.
7. Hinkkanen M. Analysis and design of full-order flux observers for sensorless induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, vol. 51, no. 5, pp. 1033–1040.
8. Vdovin V.V., Diab A.A.Z., Kotin D.A., Pankratov V.V. Sintez identifikatora koordinat dlya bezdatchikovogo asinkhronnogo elektroprivoda [Synthesis of coordinates identifier for sensorless induction motor drive]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2014, no. 1 (54), pp. 5–17.
9. Kashirskikh V.G. *Dinamicheskaya identifikatsiya asinkhronnykh elektrodvigatelye* [Dynamic identification of induction motor]. Kemerovo, KuzGTU Publ., 2005. 139 p.
10. Vinogradov A., Sibirtsev A., Kolodin I. Adaptivno-vektornaya sistema upravleniya bezdatchikovogo asinkhronnogo elektroprivoda serii EPV [Adaptive sensorless vector control system of induction drive series EPV]. *Silovaya elektronika – Power electronics*, 2006, no. 3, pp. 46–51.
11. Pupkov K.A., Egupov N.D., eds. *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya*. T. 2. *Statisticheskaya dinamika i identifikatsiya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classical and modern automatic control theory. Vol. 2. Statistical dynamics and identification of automatic control systems]. 2nd ed. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004. 640 p.
12. Diligenskaya A.N. *Identifikatsiya ob"ektov upravleniya* [Identification of object control]. Samara State Technical University. Samara, SamSTU Publ., 2009. 136 p.
13. Langraf S.V., Glazyrin A.S., Afanas'ev K.S. Primenenie nablyudatelya Lyuenbergera dlya sinteza vektornykh bezdatchikovykh asinkhronnykh elektroprivodov [Application Lyuenberger observer for the synthesis of vector sensorless induction motor drives]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2011, no. 6, pp. 57–61.
14. Afanas'ev K.S., Glazyrin A.S. Primenenie rasshirennoogo fil'tra Kalmana dlya uluchsheniya parametricheskoi robastnosti bezdatchikovogo asinkhronnogo elektroprivoda [Application of extended Kalman filter to improve the parametric robust of sensorless induction motor drive]. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya – Electrical systems and control systems*, 2012, no. 1, pp. 2–7.
15. Afanas'ev K.S., Glazyrin A.S. Nablyudatel' polnogo vektora sostoyaniya i momenta nagruzki asinkhronnogo elektrodvigatelya [Observer of full state vector and load torque of induction motor]. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya – Electrical systems and control systems*, 2013, no. 4, pp. 24–30.