

controlling system, force compensation systems.

REFERENCES

1. Pyatibratov G.Ya., Papirnyak V.P., Polezhaev V.G., Supchev A.I. Sostoyanie, problem, i puti sovershenstvovaniya system imitatsii nevesomosti dlya nazemnoi otrabotki izdelii kosmitseskoj tehniky [Status, problems and ways to improve the systems of weightlessness simulation for ground testing of space technology products]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. Region. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Universities. North-Caucasus region. Technical sciences.], 1995, no.3-4, pp. 39-49 (in Russ.).
2. Kravchenko O.A. Pyatibratov G.Ya. Sozdanie i opyt ekspluatatsii silokompensiruyutscikh system, obespektivayuschikh mnogofunktionalnyu podgotovku k rabote v nevesomosti [Creating and operating experience the force compensation systems provide versatile training astronauts to work in weightlessness]. *Izv. vuzov. Electromekhanika*. [Proceedings of the Universities. Electromechanics.], 2008, no.2, pp. 42-47 (in Russ.).
3. Babkin A. Lunnyi stend dlya marsian [Lunar stand for the Martians]. *Novosti kosmonavтики* [News of the Astronautics], 2003, no.10, p. 20.
4. NASA. Active Response Gravity Offload System (ARGOS). Mode of access: [http://www.nasa.gov/centers/johnson/engineering-integrated environments /active response gravity/index.html](http://www.nasa.gov/centers/johnson/engineering-integrated%20environments/active%20response%20gravity/index.html).
5. Vladov I.P., Donelevskii V.N., Ionov P.B. *Sbalansirovannye manipulyatory* [Balanced manipulators]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 216 p.
6. Stanley. Mode of access: <http://www.stanleyassembly.com>.
7. Gorbel. Mode of access: <http://www.gorbel.com>.
8. Vallery H., Lutz P., Von Zitzewitz J., Rauter G., Fritsch M., C. Everarts, Ronsse R., Curtk A., Bollige M. Multidirectional Transparent Support for Overground Gait Training // Proceedings of the IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). 2013.
9. Patton J., Brown D.A., Peshkin M., Santos-Munné J.J., Makhlin A., Lewis E., Colgate J.E., Schwandt D. KineAssist: Design and Development of a Robotic Overground Gait and Balance Therapy Device // *Top Stroke Rehabil.* 2008. Vol. 15. Pp.131-139.
10. RF Patent 106104 РФ, МКИ А61G3/00106104 РФ, МКИ А61G3/00. Rehabilitation device for patients with supporting-motor apparatus disorder / O.A. Kravchenko, N.A. Demchenko; patent holder SEI HPE «SRSTU (NPI)». No. 2010129902/12; applied on 16.07.2010; published on 10.07.2011. Bulletin no. 19. p. 2.
11. Barylnik D.V., Kravchenko O.A., Bekin A.B. Features of establishing regimes of limited speed in power-regulation systems // *Russian Electrical Engineering.* 2014, vol. 85, Issue 3, pp. 156-161.
12. Pyatibratov G.Ya. Optimizatsiya sistem podchinnenogo regulirovaniya elektroprivodov pri uchete uprugosti mekhanicheskikh peredach [Optimization of the slave control of electric drives with allowance the elastic mechanical gears]. *Izv. vuzov. Electromekhanika* [Proceedings of the Universities. Electromechanics], 1986, no.6, pp. 72-82.
13. Kravchenko O.A., Pyatibratov G.Ya. Sintez optimalnogo regulatora usilii v elektromekhanicheskikh sistemah s uprugimi svyazyami [Synthesis of optimal control in Electromechanical systems with elastic couplings]. *Izv. vuzov. Electromekhanika* [Proceedings of the Universities. Electromechanics.], 1998, no.4, pp. 58-63.
14. Barylnik D.V. Kravchenko O.A., Bekin A.B. Realizatsiya regima dinamicheskogo tormozheniya sinhronnogo chastotno-reguliruemogo elektroprivoda pri otkluchenii pitayuschego napryazheniya [Implementing dynamic braking mode synchronous variable frequency drive when disconnecting the power supply]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. Region. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Universities. North-Caucasus region. Technical sciences.]. 2013, no.6, pp. 79-82.

УДК 62-83

Ишматов З.Ш., Плотников Ю.В., Гурентьев Е.А.

**РОБАСТНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ ТОКА И СКОРОСТИ
ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Рассматривается асинхронный частотно-регулируемый электропривод с векторным управлением при параметрических и внешних возмущениях. Предложены робастные регуляторы проекций фазных токов и скорости, обеспечивающие слабую чувствительность к возмущениям.

Ключевые слова: частотно-регулируемый асинхронный электропривод, интервальная модель, робастное управление.

ВВЕДЕНИЕ

Асинхронный частотно-регулируемый электропривод с векторным управлением является многосвязным и нелинейным объектом управления. В состав уравнений, описывающих объект, входят параметры, значения которых подвержены изменениям. Кроме того, на электропривод действует ряд внешних возмущений. Традиционные способы представления объекта управления не дают возможности учесть вариацию параметров как явление, что затрудняет анализ статических и динамических свойств полученной системы в условиях внешних и внутренних возмущений.

Предлагается для анализа процессов в двигателе и связанном с ним исполнительном механизме использо-

вать известную схему замещения асинхронного двигателя и общепринятое представление обобщенной двухмассовой механической системы с упругостью первого рода.

Из Т-образной схемы замещения, представленной на **рис. 1**, видно, что основными параметрами асинхронного двигателя (АД) являются индуктивности рассеяния $L_{\sigma\sigma}$ и $L_{r\sigma}$, активные сопротивления R_s и R_r обмоток статора и ротора, взаимная индуктивность L_m .

Параметрами обобщенной двухмассовой упругой системы, изображенной на **рис. 2**, являются суммарные приведенные моменты инерции элементов, жестко связанных с двигателем J_1 и рабочим органом механизма J_2 , приведенная эквивалентная жесткость C_{12} ,

характеризующая безынерционную упругую связь между этими массами. Суммарные моменты нагрузок на валу двигателя и механизма обозначены соответственно m_{c1} и m_{c2} .

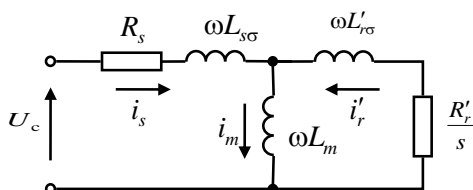


Рис. 1. Схема замещения фазы АД

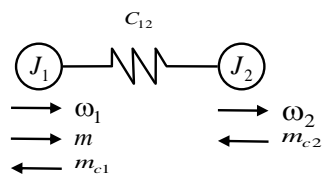


Рис. 2. Обобщенная двухмассовая механическая система

Проанализируем причины возникновения вариаций указанных выше параметров и диапазон их изменения.

Активные сопротивления статора и ротора. При векторном управлении эффект вытеснения тока в обмотках АД мало заметен, так как система регулирования стремится обеспечить минимальную частоту в роторе при плавном изменении частоты статора от 0 до номинальной [1]. Поэтому основной причиной изменения параметров R_s и R_r является изменение температуры статорных и роторных обмоток. Диапазон вариации сопротивлений не превышает 1,5, тем не менее, это играет важную роль в работе системы управления в целом.

Взаимная индуктивность обмоток статора и ротора. Для получения лучших технико-экономических показателей все асинхронные двигатели выполняются насыщенными: при номинальной нагрузке и номинальном потоке работа происходит на колене кривой намагничивания. Поэтому изменение потока намагничивания приводит к значительному (в 4-9 раз) изменению величины взаимной индукции L_m . [1-3].

Индуктивности рассеяния статора и ротора. Индуктивности рассеяния статора и ротора ($L_{s\sigma}$ и $L_{r\sigma}$) мало зависят от насыщения машины, так как их поля замыкаются по воздуху [1]. Поэтому обычно принимают $L_{s\sigma} \approx \text{const}$, $L_{r\sigma} \approx \text{const}$.

Суммарные моменты инерции и жесткость упругой связи. Величины J_1 , J_2 и C_{12} могут меняться в широких пределах [2]. Причинами этого являются технологические особенности производственного процесса, изменение геометрии, перемещение и переключение исполнительного механизма, износ или замена узлов или деталей и т.д.

Кроме того, на систему электропривода действует также ряд внешних возмущающих факторов. Большинство внешних возмущений возникает случайным образом и варьируется в широких пределах. Примерами могут служить: изменение момента нагрузки двигателя, флюктуации значения напряжения контактной сети подвижных составов (трамваи, троллейбусы), «просадки» напряжения в «слабых» сетях (например, при питании электроприводов буровых установок, карьерных экскаваторов от длинных кабельных линий) и т.д. К

возмущающим воздействиям можно отнести, в частности, влияние перекрестных связей, которые обусловлены составляющими в уравнениях статорных цепей, основную роль в которых играет ЭДС вращения, упругости механической связи между двигателем и исполнительным механизмом, вязкое трение в механических передачах.

Поскольку векторная САР частотно-регулируемого электропривода строится на основе принципов подчиненного регулирования с последовательной коррекцией, изменение в процессе эксплуатации величины любого из перечисленных параметров влияет на работу всей системы в целом. Как правило, в однозонной системе регулирования скорости наиболее существенным изменениям подвержены активные сопротивления обмоток, зависящие от температуры, и параметры механической части привода [4], что приводит к ухудшению качества переходных процессов.

Так как проектирование САР электропривода осуществляется на основе упрощенных линеаризованных моделей объекта, не учитывающих внешних и внутренних возмущений, упругих связей, у подавляющего большинства промышленных электроприводов для сохранения удовлетворительной работоспособности необходимо снижать их быстродействие, что является серьезным препятствием к получению максимально возможного быстродействия современного привода.

Очевидно, что современные системы управления асинхронным электроприводом должны обеспечивать асимптотическую устойчивость в условиях внешних возмущений и изменения параметров замкнутой системы при сохранении высокого качества регулирования и требуемой статической точности.

МЕТОДИКИ

Для анализа влияния вариации параметров на качество процессов в электроприводе получены точечные и интервальные модели объектов регулирования: контуров регулирования тока и скорости системы ПЧ-АД. Первые, благодаря предельно простой структуре, используются для синтеза САУ, вторые, учитывающие влияние вариации параметров объекта и внешних воздействий, применяются для анализа полученных систем.

В общем виде расчетная (точечная, номинальная) передаточная функция объекта представляется в виде [5]

$$W_o(p) = \frac{P(p)}{p^i Q(p)}, \quad (1)$$

где коэффициенты полиномов $P(p) = \sum_{k=0}^{n_p} p_k p^k$ и

$$Q(p) = \sum_{k=0}^{n_q} q_k p^k$$

имеют фиксированные значения, обычно соответствующие номинальным значениям параметров объекта.

Если параметры объекта меняются в некотором ограниченном диапазоне и известны границы вариации этих параметров, то объект регулирования можно представить в виде интервальной передаточной функ-

ции:

$$\tilde{W}_o(p) = \frac{\tilde{P}(p)}{p^i \tilde{Q}(p)} = \frac{P(p)}{p^i Q(p)} \tilde{W}(p) = W_o(p) \tilde{W}(p), \quad (2)$$

где $\tilde{P}(p) = \sum_{k=0}^{n_p} \tilde{p}_k p^k$ и $\tilde{Q}(p) = \sum_{k=0}^{n_q} \tilde{q}_k p^k$ – интервальные полиномы, в которых коэффициенты принадлежат ограниченному интервалу $\tilde{p}_k \in [\underline{p}_k; \overline{p}_k]$ и $\tilde{q}_k \in [\underline{q}_k; \overline{q}_k]$, $\underline{p}_k, \overline{p}_k$ – нижние и верхние границы коэффициентов полинома $\tilde{P}(p)$; $\underline{q}_k, \overline{q}_k$ – нижние и верхние границы

коэффициентов полинома $\tilde{Q}(p)$; $\tilde{W}(p) = \frac{\tilde{P}(p)Q(p)}{\tilde{Q}(p)P(p)}$ –

относительная вариация передаточной функции объекта, характеризующая все отклонения параметров объекта регулирования от расчетных. Очевидно, что когда параметры объекта равны расчетным, $\tilde{W}(p) = 1$.

Объект с передаточной функцией (1) далее будем называть «точечным», а объект с передаточной функцией (2) – «интервальным» объектом. Таким образом, интервальный объект – это множество, образованное точечными объектами, параметры которых находятся в указанных интервалах.

На рис. 3 показаны структурные схемы традиционной и робастной САР. На рис. 3, б представлена структурная схема робастной САР, полученная с помощью общего решения полиномиального уравнения синтеза [5,6]. Из структурной схемы видно, что в состав робастного регулятора входят традиционный регулятор $W_p(p)$ и внутренняя точечная модель объекта $W_o(p)$, параметры которой неизменны. Невязка $e(t) = y(t) - y_m(t)$, равная разнице выходных сигналов реального объекта и его модели, проходя через звено с передаточной функцией $1/(W_p(p)W_o(p))$, преобразуется в сигнал, равный разнице ошибок замкнутых систем с реальным интервальным и эталонным точечным объектами. Далее через звено $D(p)$, которое является в общем случае фильтром, он подается на вход системы.

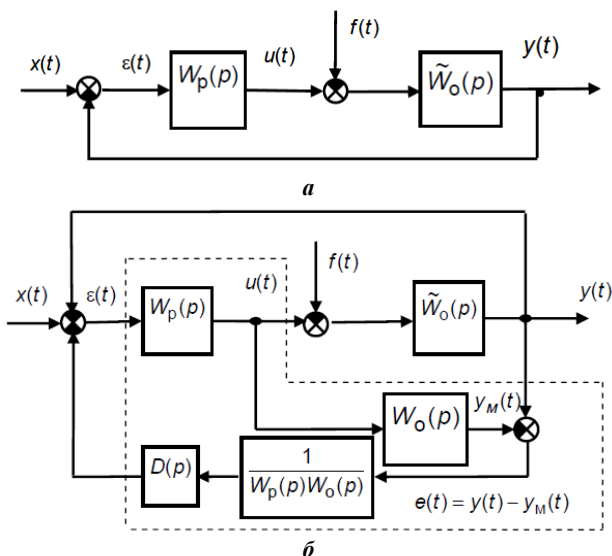


Рис. 3. Структуры типовой (а) и робастной (б) САР

Выберем дробно-рациональную функцию $D(p)$ в виде

$$D(p) = \frac{1}{A_D(p)} = \frac{1}{(T_D p + 1)^v}, \quad (3)$$

где $A_D(p)$ – устойчивый полином; T_D – настроечный параметр робастного регулятора, значение которого выбирается достаточно малым, с тем чтобы можно было считать $D(p) \approx 1$; степень v полинома $A_D(p)$ выбирается из условия реализуемости звена $\frac{D(p)}{W_p(p)W_o(p)}$.

Тогда передаточные функции от входа $x(t)$ к выходу $y(t)$ замкнутой типовой и робастной САР (см. рис. 3) примут соответственно вид:

$$\Phi^{\text{тип}}(p) = \frac{W_p(p)W_o(p)}{W_p(p)W_o(p) + 1/\tilde{W}(p)}; \quad (4)$$

$$\Phi^{\text{роб}}(p) = \frac{W_p(p)W_o(p)}{W_p(p)W_o(p) + D(p) + [1 - D(p)]/\tilde{W}(p)}. \quad (5)$$

Передаточные функции от возмущающего воздействия $f(t)$ к выходу $y(t)$ равны:

$$\Phi_f^{\text{тип}}(p) = \frac{W_o(p)}{W_p(p)W_o(p) + 1/\tilde{W}(p)}; \quad (6)$$

$$\Phi_f^{\text{роб}}(p) = \frac{[1 - D(p)]W_o(p)}{W_p(p)W_o(p) + D(p) + [1 - D(p)]/\tilde{W}(p)}. \quad (7)$$

Анализ этих выражений показывает, что при отсутствии параметрических возмущений ($\tilde{W}(p) = 1$) в обеих системах настройки определяются регулятором и соответствуют расчетным, а выражения (4) и (5) практически совпадают. При отклонении параметров объекта от расчетных в типовой САР относительная вариация объекта $\tilde{W}(p)$ оказывает существенное влияние на характеристический полином замкнутой системы и, как следствие, показатели САР. В робастной системе, из-за наличия сомножителя $1 - D(p) \approx 0$, влияние относительной вариации объекта $\tilde{W}(p)$ минимально, и система сохраняет показатели устойчивости, качества и точности близкими к расчетным. Те же закономерности наблюдаются и в выражениях (6) и (7). Кроме того, из-за наличия сомножителя $1 - D(p) \approx 0$ в числителе (7) передаточная функция по возмущению в робастной системе близка к нулю, что обеспечивает эффективную отработку возмущающих воздействий.

Для проверки полученных результатов выполнено математическое моделирование частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением. Результаты моделирования представлены на рис. 4-6.

Для изучения влияния внутренних перекрестных связей двигателя на качество переходных процессов из структуры векторной САР исключен блок компенсации перекрестных связей, и исследование контура тока осуществлялось при расторможенном роторе.

Как видно из рис. 4, робастные регуляторы тока позволяют эффективно подавлять влияние вариации активного сопротивления статора \tilde{R}_{se} на качество переходных процессов. Кроме того, представленный вы-

ше анализ САР и результаты компьютерного моделирования позволяют сделать вывод, что системы с робастным регулятором тока, по сравнению с традиционными системами, обладают улучшенной обработкой внешнего возмущающего воздействия (например, «просадки» напряжения сети), позволяют подавлять влияние внутренних перекрестных связей. Поэтому использование робастного регулятора тока в векторных САР дает возможность исключить из структуры системы управления блок компенсации перекрестных связей.

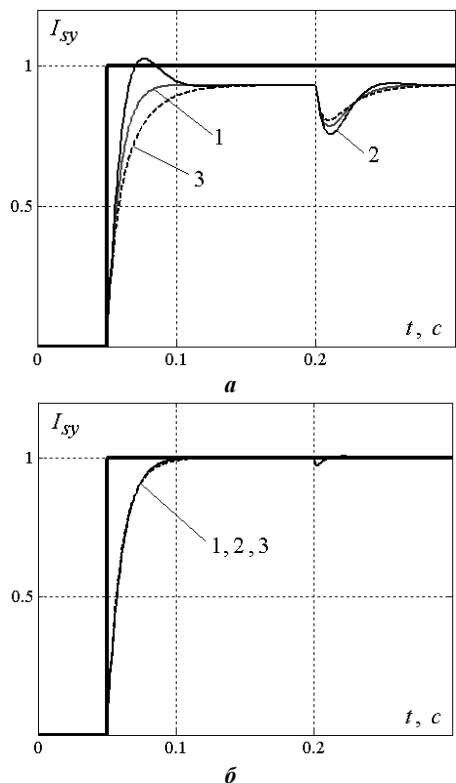


Рис. 4. Процессы в САР тока с традиционным (а) и робастным (б) регуляторами (двигатель не заторможен) на ступенчатые изменения задающего и возмущающего воздействий: 1 – при расчётном R_{se} ; 2 – при уменьшении R_{se} в 1,5 раза; 3 – при увеличении R_{se} в 1,5 раза

На рис. 5, 6 представлены результаты моделирования контура скорости. При моделировании использованы данные двигателя 1LA7083-4AA60-Z ($P_N=0,75$ кВт). Из процессов видно, что робастная система инвариантна к изменению суммарного момента инерции, с существенно меньшими ошибками обрабатывает возмущающее воздействие (наброс и сброс нагрузки) и более эффективно демпфирует колебания, связанные с влиянием упругости.

Результаты экспериментов на стенде с преобразователем SIMOVERT MASTERDRIVE Vector control и двигателем 1LA7083-4AA60-Z ($P_N=0,75$ кВт) представлены на рис. 7, 8. Из рисунков видно, что замкнутая система с робастным регулятором скорости действительно не только обладает слабой параметрической чувствительностью и улучшенной обработкой внешних возмущающих воздействий, но и позволяет значительно снизить упругие колебания по сравнению с традиционным регулятором скорости.

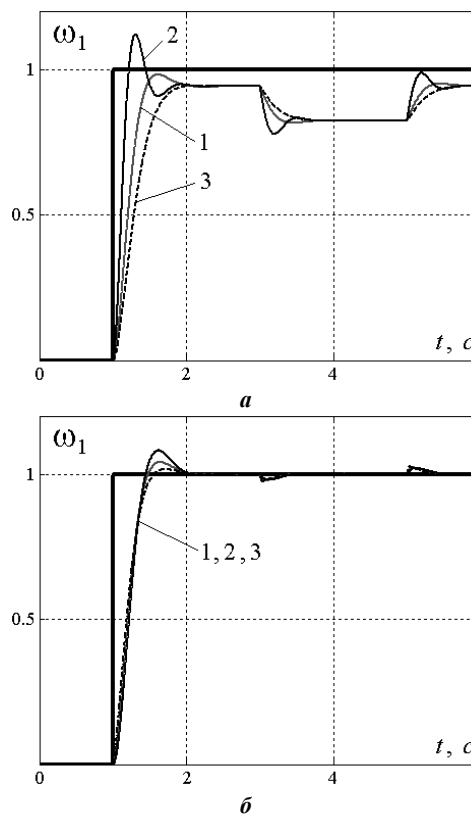


Рис. 5. Реакция контура регулирования скорости с традиционным П-регулятором (а) и робастным регулятором (б) на ступенчатые изменения задающего и возмущающего воздействий при вариации суммарного момента инерции: 1 – при расчётном J_{Σ} ; 2 – при уменьшении J_{Σ} в 2 раза; 3 – при увеличении J_{Σ} в 2 раза

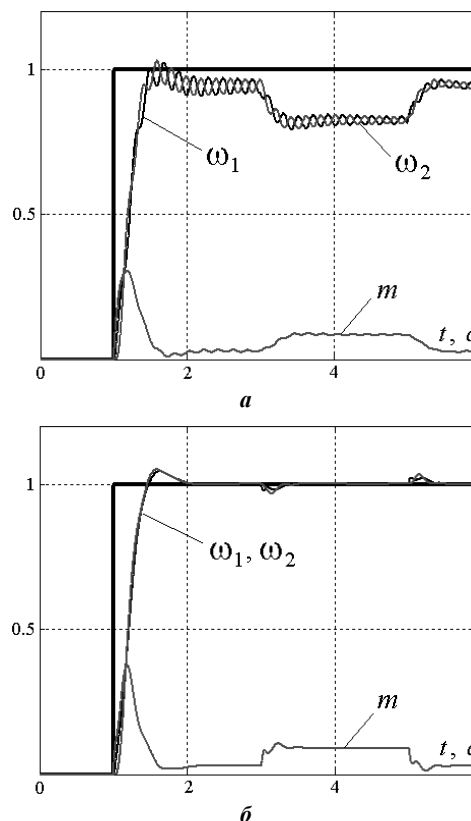


Рис.6. Реакция контура регулирования скорости с традиционным (а) и робастным (б) регуляторами на ступенчатые изменения задающего и возмущающего воздействий при упругой связи двигателя и механизма

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты, полученные при моделировании и на лабораторном стенде, подтвердили работоспособность и высокое качество робастной системы. Робастный регулятор тока может быть рекомендован для получения качественных переходных процессов в системах управления при питании двигателя от «слабых» линий или от сетей, для которых характерны значительные просадки напряжения; робастный регулятор скорости – для получения качественных переходных процессов в промышленных САР асинхронного электропривода с 3–4-кратной вариацией момента инерции и (или) заметным влиянием упругостей механической части.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решмин Б.И. Уточненная модель асинхронного двигателя как объект для построения системы управления // *Электротехника*. 2005. №7. С.14–19.
2. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 216 с.
3. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1998. 704 с.
4. Виноградов А.Б., Чистосердов В.Л., Сибирцев А.Н. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом // *Электротехника*. 2007. №7. С. 7–17.
5. Ишматов З.Ш. Микропроцессорное управление электроприводами и технологическими объектами. Полиномиальные методы. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ. 2007. 278 с.
6. Goodwin G.C., Graebe S.F., Salgado M.E. Control system design. Valparaiso, 2000. 883 p.

INFORMATION IN ENGLISH

ROBUST CURRENT AND SPEED CONTROLLERS OF VARIABLE SPEED INDUCTION MOTOR DRIVE

Ishmatov Z.Sh., Plotnikov Y.V., Gurentjev E.A.

The frequency-controlled electric drive with vector control system under parametric and external disturbances is considered. Robust current and speed controllers, which are used to reduce the sensitivity to different disturbances, are offered.

Keywords: frequency-controlled induction electric drive, interval model, robust control.

REFERENCES

1. Reshmin B.I. Utochnennaya model asinhronnogo dvigatelya kak obyekt dlya postroyeniya sistemy upravleniya [Refined model of induction motor as an object for control system development]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2005, no. 7, pp. 14–19.
2. Bortsov Yu.A., Polyakhov N.D., Putov V.V. *Elektromekhanicheskie sistemi s adaptivnym i modalnym upravleniem* [Electromechanical systems with adaptive and mod-

al control]. Leningrad: Energoatomizdat, 1984, 216 p.

3. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Theory of electric drive]: textbook for universities. M.: Energoatomizdat, 1998. 704 p.

4. Vinogradov A.B., Chistoserdov V.L., Sibirtsev A.N. Adaptivnaya sistema vektornogo upravleniya asinhronnym elektroprivodom [Adaptable system of induction electric drive vector control]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2007, no. 7, pp. 7–17.

5. Ishmatov Z.S. *Mikroprotsessornoye upravlenie elektroprivodami i tehnologicheskimi obyektami. Polinomialnye metody* [Microprocessor based control of electric drives and production facilities. Polynomial methods]. Yekaterinburg: Publishing house of UGTU-UPI, 2007, 278 p.

6. Goodwin G.C., Graebe S.F., Salgado M.E. Control system design. Valparaiso, 2000. 883 p.

УДК 62-83:621.313.3

Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Сидоренко Н.Ю.

СИЛОВЫЕ ЦЕПИ СИНХРОННЫХ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С НЕЗАВИСИМЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПО КАНАЛУ ВОЗБУЖДЕНИЯ

В статье представлены схемы силовых цепей синхронных реактивных электроприводов с независимым управлением по каналу возбуждения. Показано, что количество ключей определяется числом фаз и лежит в диапазоне от $2m$ до $4m$. Методами регрессионного анализа установлено, что удельная цена на полупроводниковые преобразователи при малых значениях тока не зависит от величины тока и определяется стоимостью микропроцессорной системы управления. При токах, больших 100 А, зависимость между ценой и током приближается к линейной, поэтому отказ от трехфазной конфигурации силовых цепей полупроводникового преобразователя и переход к многофазной конфигурации не приводят к увеличению массогабаритных показателей источника питания. Таким образом, усложнение конфигурации схем силовых цепей (увеличение количества фаз) для технологических установок с установленной мощностью более 200 кВт позволяет улучшить массогабаритные показатели электромеханического преобразователя при сохранении габаритов полупроводникового преобразователя.

Ключевые слова: полупроводниковые преобразователи частоты, многофазность, удельные массогабаритные показатели.

ВВЕДЕНИЕ

В установках с тяжёлыми и весьма тяжёлыми условиями эксплуатации хорошо зарекомендовали себя

синхронные реактивные электроприводы с независимым управлением по каналу возбуждения (СРМНВ), в которых роль обмотки возбуждения выполняет обмотка, размещённая в пазах статора, когда её витки нахо-