

нии нечеткого регулятора (рис. 5, в). В дальнейшем необходимо рассматривать вопросы устой-

чивости предложенной схемы асинхронного многодвигательного электропривода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гейлер Л. Б. Электропривод в тяжелом машиностроении. М.: Машгиз, 1958. 588 с.
2. Singh G. K. Multi-phase induction drive research // Electric Power Systems Research. 2002. № 61. P. 139–147.
3. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет В. И. Ленина». Иваново, 2008. 297 с.
4. Шевченко В. И. Выравнивание нагрузок в многодвигательном асинхронном электроприводе // Изв. вузов: Горный журн. 1999. № 1–2. С. 168–171.

V. V. Bruslinovskiy
Ship Electric Engineering and Technology Institute (KSRC Branch)

A. V. Morozov
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

INDUCTION MULTI-MOTOR DRIVE'S LOAD DISTRIBUTION IN STATIC MODES

Problems of uniform load distribution between dual stator induction motors are considered. A comparative analysis of the proposed six-phase induction motor model and the conventional three-phase induction motor model is carried out from the viewpoint of static performance. An algorithm of indirect field-oriented control is used in the motor's control system. Investigation of different load balancing methods shows that the best results are achieved by using fuzzy logic control in the formation of the speed reference signal.

Multi-motor drive, dual stator induction motor, indirect vector control, load balancing

УДК 621.3.078.3

А. Д. Стоцкая, Т. О. Кузьмина
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

О робастности селективного регулятора положения ротора в электромагнитном подвесе

Предложена селективная система автоматического управления положением ротора в электромагнитном подвесе. Рассматриваются вопросы динамики системы в различных штатных и нештатных режимах работы. Результаты моделирования доказывают работоспособность регулятора и робастные свойства спроектированной селективной системы автоматического управления. Приводятся результаты разработки аппаратной части системы селективного управления положением ротора с применением Real-Time Windows Target Toolbox.

Электромагнитный подвес, селективный регулятор, робастность, Real-Time Windows Target Toolbox

В практических целях электромагнитный подвес (ЭМП) ротора при помощи активных магнитных подшипников (АМП), применяется в различных быстроходных машинах, работающих в условиях, не допускающих использование традицион-

ных подшипников с механическим контактом. Активный магнитный подшипник является сложным мехатронным устройством, позволяющим выполнить бесконтактный подвес ротора электрической машины относительно статора. Однако значитель-

ная сложность существующих систем управления электромагнитным подвесом ограничивает потенциальную область его применения. Характерная особенность состоит в том, что объект управления проектируемой системы представляет собой составной объект «электромагнит–ротор», обладающий сложным математическим описанием [1].

Основными преимуществами АМП являются относительно высокая грузоподъемность, высокая механическая прочность, возможность осуществления устойчивого неконтактного подвеса тела, возможность изменения жесткости и демпфирования в широких пределах, возможность использования при высоких скоростях вращения, в вакууме, при высоких и низких температурах, стерильных технологиях [2]. К недостаткам АМП можно отнести высокую стоимость конечного устройства, а также сложность проектирования и реализации системы управления. Различными научными группами, как в России, так и за рубежом, под руководством таких исследователей, как G. Schweitzer, E. Malsen, A. K. Plat, Ю. Н. Журавлев, Ю. Л. Макаричев, В. П. Верещагин, были предложены различные подходы к построению САУ ЭМП. Однако общей концепции управления до сих пор не выработано.

Использование АМП накладывает ряд ограничений, в том числе и на синтез систем управления магнитным подвесом ротора, так как следует учитывать сложную нелинейную динамику упругих опор и производить оценку их влияния на общую динамику системы. Основное влияние, которое оказывают активные магнитные подшипники на динамику, это появление изгибных колебаний на критических скоростях вращения ротора. При этом на таких скоростях могут возникать

явления резонанса, прецессии и нутации, которые должны быть предварительно исследованы моделированием, а их последствия учтены при синтезе закона управления и построении устройства управления.

Синтез системы автоматического управления положением ротора в электромагнитном подвесе. Рассматривается процесс синтеза селективного алгоритма управления положением ротора в электромагнитном подвесе. Структура проектируемой системы представлена на рис. 1. При этом используется программная реализация модели ротора, приведенная в [3].

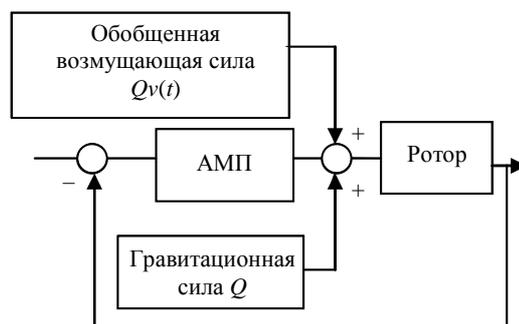


Рис. 1

Следует отметить, что в силу сложности поведения объекта управления при воздействии управляющих сигналов, синтез селективного алгоритма управления производится поэтапно для различных режимов работы, перечисленные в табл. 1. При этом основанием для перехода между режимами является достижение скорости вращения ротора окрестности критической частоты, рассчитанной предварительно.

Предварительным моделированием было выяснено, что при достижении ротором области критической частоты на графике переходного

Таблица 1

Номер режима	Наименование	Описание
1	Подъем ротора (вывешивание)	Формирование сигнала управления, активизирующего АМП. Стабилизация ротора в середине рабочего зазора. Скорость вращения ротора равна 0, возмущающие силы не действуют
2	Зона 1	Формирование сигнала управления положением ротора в диапазоне скоростей вращения $0 \dots \omega_3$. Гашение колебаний, вызванных обобщенными возмущающими силами
3	Зона 2	Формирование сигнала управления положением ротора в диапазоне скоростей вращения $\omega_3 \dots \omega_4$. Гашение колебаний, вызванных обобщенными возмущающими силами
4	Зона 3	Формирование сигнала управления положением ротора в диапазоне скоростей вращения $\omega_4 \dots \omega_5$. Гашение колебаний, вызванных обобщенными возмущающими силами

где $\alpha_9 = k_5 k_7$, $\alpha_{10} = -(k_5 k_7 + k_7)$, $\alpha_{11} = k_6 k_7$, $\alpha_{12} = -k_6 k_7$, $\alpha_{13} = k_5 k_8$, $\alpha_{14} = -(k_5 k_8 + k_8)$, $\alpha_{15} = k_6 k_8$, $\alpha_{16} = -k_6 k_8$.

Закон управления, реализуемый селективной трехуровневой системой управления, для одного канала имеет вид:

$$Y = \begin{cases} \beta_1(r-x) + \beta_2 \frac{1}{s}(r-x) + \beta_1 s(r-x), f = 0; \\ (\beta_1 + \gamma_1)(r-x) + (\beta_2 + \gamma_2) \frac{1}{s}(r-x) + (\beta_3 + \gamma_3)s(r-x); f < f_1 \\ \delta_1 r + \delta_2 x + \delta_3 s r + \delta_4 s x + \delta_5 \frac{r}{s} + \delta_6 \frac{x}{s} + \delta_7 s^2 r + \delta_8 s^2 x + \delta_5 \frac{r}{s^2} + \delta_6 \frac{x}{s^2}, f_1 < f < f_2; \\ \lambda_1 r + \lambda_2 x + \lambda_3 s r + \lambda_4 s x + \lambda_5 \frac{r}{s} + \lambda_6 \frac{x}{s} + \lambda_7 s^2 r + \lambda_8 s^2 x + \lambda_5 \frac{r}{s^2} + \lambda_6 \frac{x}{s^2}, f_2 < f < f_3, \end{cases} \quad (1)$$

где коэффициенты уравнений $\beta_1 \dots \beta_n$, $\gamma_1 \dots \gamma_n$, $\delta_1 \dots \delta_n$, $\lambda_1 \dots \lambda_n$ определяются как

$$\begin{aligned} \{\beta_1 \dots \beta_n\} &= \{k_{P1} \quad k_{I1} \quad k_{D1}\}, \\ \{\gamma_1 \dots \gamma_n\} &= \{k_{P2} \quad k_{I2} \quad k_{D2}\}, \\ \{\delta_1 \dots \delta_n\} &= \{\Phi_1(\alpha_{1 \dots 16}) \quad \dots \quad \Phi_{10}(\alpha_{1 \dots 16})\}, \\ \{\lambda_1 \dots \lambda_n\} &= \\ &= \left\{ \Phi_1 \left(\alpha_{1 \dots 16} \Big|_{k_0 \dots k_8 = k_9 \dots k_{17}} \right) \dots \right. \\ &\quad \left. \Phi_{10} \left(\alpha_{1 \dots 16} \Big|_{k_0 \dots k_8 = k_9 \dots k_{17}} \right) \right\}. \end{aligned}$$

Структура синтезируемого устройства управления представлена на рис. 2, где F_{mag} – магнитная сила; F – управляющее воздействие; Q – воздействие внешних сил; x – сигнал смещения ротора; e – сигнал ошибки.

Определение режимов работы системы. На основании результатов литературного обзора [5]–[9], сформирован список рассматриваемых в проекте штатных и нештатных режимов работы системы (табл. 2). Для последующего моделирования выбраны режимы № 2, 4, 5.

Таблица 2

Номер режима	Режим работы	Наименование	Тип возмущения	Способ формирования режима в математической модели
1	Штатный	Вывешивание ротора	Внешнее	Для обеспечения процесса вывешивания в систему вводится контур тока (ПИ-регулятор), который обеспечивает плавный подъем ротора с минимальным перерегулированием $0 < \sigma < 5$
2	Штатный	Плановый пуск	Внешнее	Для формирования события использован блок скоростного задания с малым положительным коэффициентом наклона
3	Штатный	Плановый останов	Внешнее	Для формирования события использован блок скоростного задания с малым отрицательным коэффициентом наклона
4	Штатный	Помпаж	Внешнее	Для формирования события используется генератор гармонического сигнала, аддитивно включенный в схему одновременно с моделью обобщенных возмущающих сил. Данное событие рассматривается как мгновенное гармоническое изменение параметров нагрузки
5	Штатный	Выбег	Внутреннее	В случае скачкообразного прекращения подачи скоростного задания подключается дополнительный источник скоростного задания и обеспечивает вращение ротора с малой частотой вращения до полной остановки
6	Нештатный	Аварийный останов	Внешнее	Скачкообразное прекращение подачи скоростного задания. Уменьшение частоты вращения ротора с текущего значения до 0 за время $t = t_{min}$
7	Нештатный	Обрыв канала связи	Внешнее	Прерывание связи информационного обмена с помощью элемента Switch
9	Нештатный	Вибрация оборотной частоты	Внутреннее	Мультипликативное введение вибрационной помехи на оборотной частоте
10	Нештатный	Вибрация низкой частоты	Внутреннее	Мультипликативное введение вибрационной помехи на частоте $\omega_1 < \omega < \omega_2$

Исследование робастных свойств системы в различных режимах работы.

1. Плавный пуск и выход на рабочую скорость 830 рад/с. Рабочая скорость вращения рассматриваемого электротехнического комплекса – 830 рад/с. Разгон ротора начинается в момент $t = 1$ с. Для приближения условий моделирования к реальным условиям эксплуатации устройства, время разгона ротора определяется в 20 с. Время моделирования – 25 с. Система управления: селективная трехуровневая. В режиме выхода на рабочую скорость возникает вибрация оборотной частоты, которая задается согласно методике, изложенной на с. 53–54.

На рис. 3 представлена траектория перемещения центральной точки ротора под АМП 1 при разгоне ротора до 830 рад/с (ΔX – смещение вдоль оси x , ΔY – смещение вдоль оси y). Как видно из рис. 3, система управления обеспечивает требуемое качество переходных процессов перемещения ротора в штатном режиме работы комплекса.

2. Воздействие внешнего возмущения (помпаж). Разгон ротора начинается в момент $t = 0.2$ с. Время разгона ротора – 0.1 с. Время моделирования – 4 с. Внешнее воздействие амплитудой 500 Н подается в момент времени $t = 1.1$ с. Внешнее возмущение подается источником гармонического сигнала, таким образом имитируется помпаж турбины.

На рис. 4 представлены результаты моделирования в среде Matlab/Simulink процесса подачи внешнего возмущения – переходные процессы перемещения ротора.

На рис. 4, *a* представлена переходная характеристика канала x_2 (Sx – перемещение ротора вдоль оси x), на рис. 4, *б* – график изменения скорости вращения ротора (ω – скорость вращения ротора).

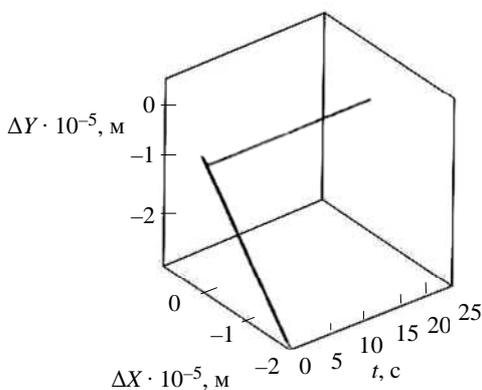


Рис. 3

3. Выбег ротора. В случае скачкообразного прекращения подачи скоростного задания, которое идентифицируется наблюдателем скоростного задания, включится дополнительный источник скоростного задания и обеспечит вращение ротора с малой частотой вращения до полной остановки.

Исследуется динамика ротора при различных коэффициентах наклона блока скоростного задания от 5 до 45 с. Результаты моделирования переходных процессов перемещения ротора при выбеге представлены на рис. 5, где Δ – смещение, 1 – результат моделирования при коэффициенте 45; 2 – при 40; 3 – при 35; 4 – при 30; 5 – при 25; 6 – при 15; 7 – при 5.

4. Аварийный останов. Режим аварийной остановки ротора в процессе вращения моделируется с помощью скачкообразного прекращения подачи скоростного задания. При этом скорость вращения электрической машины мгновенно достигает нулевого значения вращения ротора с текущего значения до 0 за время $t = t_{\min}$.

Исследуется несколько случаев прерывания подачи скоростного задания в моменты времени, когда скорость вращения ротора была равна $\omega_1 = 250$ рад/с, $\omega_2 = 500$ рад/с, $\omega_3 = 750$ рад/с, $\omega_4 = 1000$ рад/с.

Результаты моделирования представлены на рис. 6, где ΔX – смещение вдоль оси x ; ΔY – смещение вдоль оси y ; 1 – результат моделирования при скорости вращения ротора ω_1 ; 2 – при ω_2 ; 3 – при ω_3 ; 4 – при ω_4 . Как видно из результатов математического моделирования, система управления обеспечивает эффект подхват ротора, т. е. в случае прекращения подачи скоростного задания, система управления удержит ротор в ненулевом положении, что предотвратит падение ротора на страховочные подшипники.

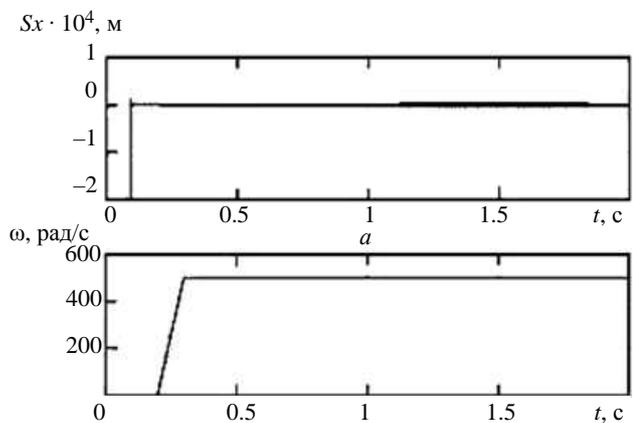


Рис. 4

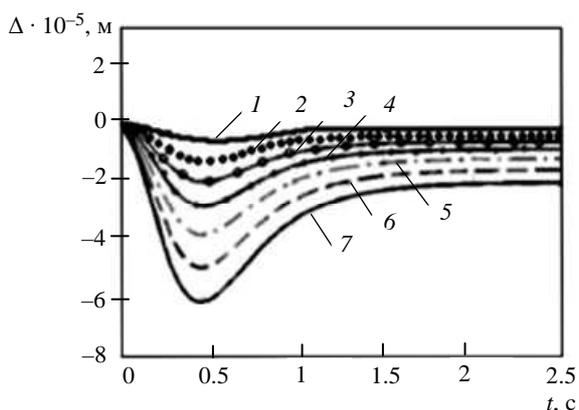


Рис. 5

Анализ функциональных возможностей вращающихся механизмов ведущих зарубежных фирм показывает, что «подхват на лету» может рассматриваться как обязательный элемент алгоритмов управления общепромышленными электроприводами [10].

5. Вибрация низкой частоты. Для моделирования режима появления вибрации низкой частоты (в интервале скоростей вращения между первой и второй предварительно рассчитанными критическими скоростями) мультипликативно вводилось значение виброперемещения ротора согласно гармоническому закону в модель обобщенных возмущающих сил (внутренних). Результаты исследования, представленные на рис. 7, иллюстрируют колебания сигнала перемещения ротора под действием вибрации низкой частоты с амплитудой $A_1 = 0.01\delta$ и $A_2 = 0.1\delta$ (ΔX – смещение вдоль оси x , ΔY – смещение вдоль оси y , 1 – A_1 ; 2 – A_2).

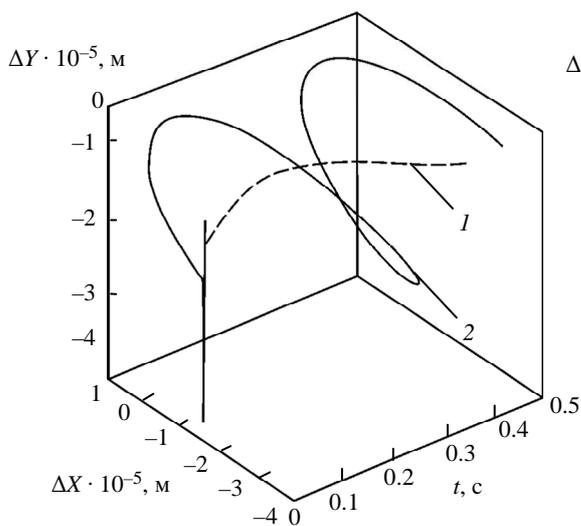


Рис. 7

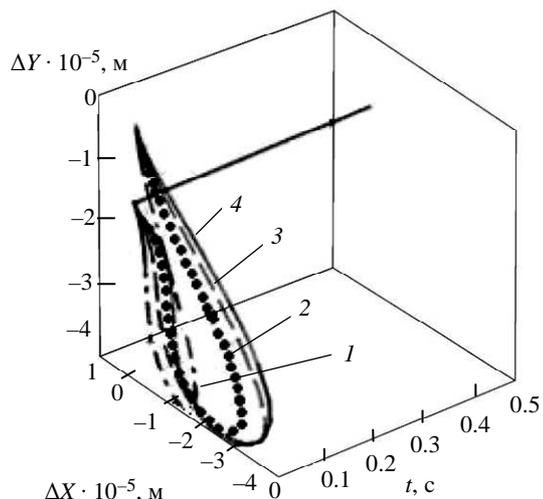


Рис. 6

Из результатов исследования можно сделать вывод, что система управления обеспечивает устойчивую работу системы при различных амплитудах виброперемещения, появляющихся на низкой частоте.

6. Вибрация высокой частоты. Для моделирования режима появления вибрации низкой частоты (в интервале скоростей вращения между третьей и пятой предварительно рассчитанными критическими скоростями) мультипликативно вводилось значение виброперемещения ротора согласно гармоническому закону в модель обобщенных возмущающих сил (внутренних). Результаты исследования, представленные на рис. 8, иллюстрируют колебания сигнала перемещения ротора под действием вибрации высокой частоты с амплитудой $A_1 = 0.01\delta$ и $A_2 = 0.1\delta$ (ΔX – смещение вдоль оси x , ΔY – смещение вдоль оси y , 1 – A_1 ; 2 – A_2).

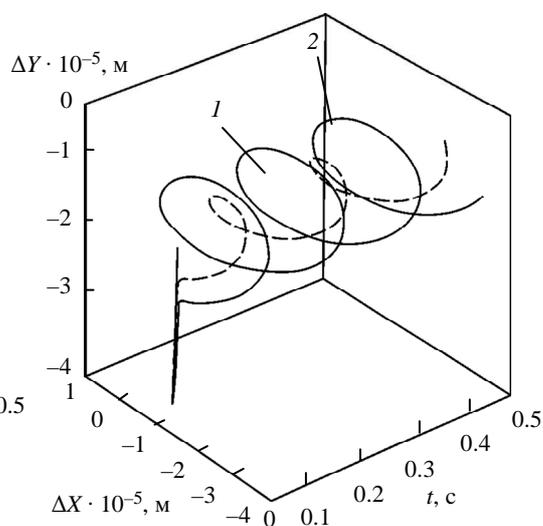


Рис. 8

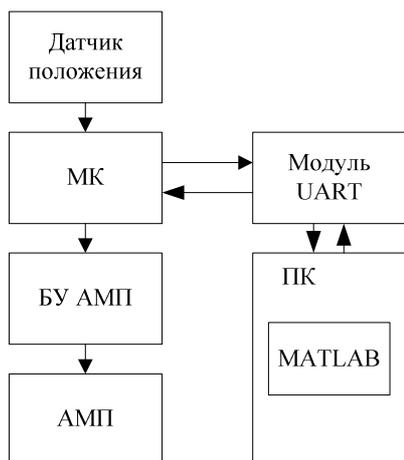


Рис. 9

Real-Time Windows Target Toolbox – программное расширение Matlab Simulink, позволяющее из-под операционной системы Windows моделировать и тестировать системы реального времени. Объединение Simulink в режиме External и Matlab Real-Time Windows Target обеспечивает возможность визуализации сигналов модели в реальном времени, а также возможность настройки параметров в реальном времени.

Показания датчика положения, передаются микроконтроллером (МК) с помощью UART-модуля на персональный компьютер (ПК) с Matlab Real-Time Windows Target. Затем разработанный в Matlab Simulink регулятор формирует сигнал для управления смещением ротора. Этот сигнал с помощью UART-модуля передается микроконтрол-

леру, откуда передается в блок управления активными магнитными подшипниками (БУ АМП), а оттуда на АМП.

В заключение можно сказать следующее. Представлена трехуровневая система селективного управления положением ротора в электромагнитном подвесе, включающая ПИД-регуляторы и децентрализованные каскадные ПИ/ПД-регуляторы. Система управления является робастной в силу структуры.

Представлены результаты исследования системы управления при изменении скорости вращения ротора от 0 до 1000 рад/с при имитации штатных и нештатных режимов работы системы: выход на рабочую скорость, разгон-торможение, воздействие внешнего возмущения (помпаж), выбег ротора, аварийный останов, обрыв канала связи, вибрация низкой частоты, вибрация высокой частоты.

Результаты моделирования подтверждают робастные свойства спроектированной селективной системы автоматического управления положением ротора в электромагнитном подвесе, т. е. малое изменение выхода замкнутой системы управления при малом изменении параметров объекта управления.

Разработана аппаратная часть системы селективного управления положением ротора в электромагнитном подвесе с применением Real-Time Windows Target Toolbox.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлев Ю. Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение. СПб.: Политехника. 2003, С. 22–30.
2. Bleuler H. Magnetic levitation: a challenge for control design in mechatronics // Toshiba chair for intelligent mechatronics. 2011. № 44 (12). P. 578–583.
3. Стоцкая А. Д. Разработка и исследования системы управления положением ротора в электромагнитном подвесе: дис. ... канд. техн. наук / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2013.
4. Гаврилов С. В., Мордовченко Д. Д., Стоцкая А. Д. Разработка и исследование системы управления магнитным подвесом вращающегося ротора // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 1. С. 62–69.
5. Чурилин А. С. Исследование изгибно-продольных колебаний роторов бытовых машин при упругой подвеске // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2010. № 4 (14). С. 14–17.
6. Пановко Я. Г. Введение в теорию механических колебаний: учеб. пособие для вузов. 3-е изд., перераб. М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1991. 256 с.
7. Кельзон А. С., Журавлев Ю. Н., Январев Н. В. Расчет и конструирование роторных машин. М.: Машиностроение, 1977. 288 с.
8. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985. 488 с.
9. Lurie A. I. Theory of Elasticity. Berlin: Springer. 2005. 1050 p.
10. Панкратов В. В., Усачев А. П., Гордейчик А. В. Режим «подхвата на лету» в преобразователях частоты СМ-400 и станциях группового управления электроприводами СЧ-400 на их базе. URL: http://sib-mech.ru/netcat_files/userfiles/doc/articles/6.pdf.

A. D. Stotskaya, T. O. Kuzmina
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

ABOUT ROBUSTNESS PROPERTIES OF SELECTIVE POSITION CONTROLLER FOR ROTOR IN AN ELECTROMAGNETIC SUSPENSION

A selective automatic control system of the rotor position in the electromagnetic suspension is proposed. System dynamics problems in various normal and abnormal operating modes are considered. The simulation results prove the efficiency of the regulator, and the robust properties of designed selective automatic control system. Development results of selective control system hardware using Real-Time Windows Target Toolbox are briefly discussed.

Electromagnetic suspension, selective control, robustness, Real-Time Windows Target Toolbox
