

Б.И. КУЗНЕЦОВ, д-р техн. наук, проф., зав. отделом, НТЦ МТО
НАН Украины, Харьков

Т.Б. НИКИТИНА, канд. техн. наук, докторант, НТУ "ХПИ",
Харьков

О.В. ШУРЛО, аспирант, УИПА, Харьков

Б.Б. КОБЫЛЯНСКИЙ, аспирант, УИПА, Харьков

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО И ЦИФРОВОГО РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОБМОТОЧНЫМИ МАШИНАМИ

Розроблено метод синтезу безперервного та цифрового робастного керування електроприводами механізмів обмотувальних машин з урахуванням пружних елементів за допомогою Δ оператора. Наведено приклад динамічних характеристик синтезованої системи.

Разработан метод синтеза цифрового робастного управления электроприводами механизмов обмоточных машин с учетом упругих элементов помощью Δ оператора. Приведен пример динамических характеристик синтезированной системы.

Введение. Качество процесса нанесения обмоточных лент в значительной степени определяется точностью поддержания технологических параметров на заданном уровне. Для поддержания скорости вращения приводного механизма и натяжения обмоточной ленты современные обмоточные машины оборудуются электромеханическими системами автоматического поддержания этих технологических параметров на заданном уровне.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. Обмоточная машина как объект управления натяжением обмоточной ленты и скоростью вращения приводного механизма является нестационарным объектом, параметры которого изменяются в широких пределах в процессе работы. Наиболее существенное изменение параметров обмоточной машины происходит по мере выработки обмоточной ленты с кружка в процессе обмотки кабелей. При этом изменяется момент инерции кружка с обмоточной лентой и радиус схода обмоточной ленты с кружка [1, 2].

Методы синтеза систем управления, основанные на минимизации

квадратичного критерия, называются задачами H^2 -оптимизации. Однако, квадратичный критерий чувствителен к наличию неучтенных помех, возмущений, как со стороны внешних сигналов, так и параметрических возмущений самих объектов [3]. Поэтому в последнее десятилетие получили развитие методы минимизации H^∞ -нормы, которая, служит эффективным показателем реакции системы на различного типа воздействия при наличии неопределенностей в описании объекта управления [4]. Рассмотрим построение робастной системы управления для работы во всем диапазоне изменения радиусов размотки кружка с лентой.

Анализ последних достижений и публикаций. В [1-3] выполнен синтез оптимальных регуляторов, наблюдателей и компенсаторов для трех радиусов размотки кружка с обмоточной лентой – начального, среднего и конечного. Естественно, что эти регуляторы, наблюдатели и компенсаторы имеют различные коэффициенты усиления для разных радиусов размотки. Попытка использования компенсаторов, рассчитанных для одного какого либо радиуса кружка ленты – например среднего, начального либо конечного для работы системы управления во всем диапазоне изменения радиусов размотки приводит на определенных радиусах размотки либо к излишнему затягиванию времени переходных процессов, либо к повышению колебательности вплоть до потери устойчивости [3]. Поэтому в настоящее время основным методом синтеза систем управления обмоточными машинами является робастное управление [4 -8].

Цель и задачи работы. Целью статьи является сравнение динамических характеристик синтезированных с помощью Δ оператора аналоговой и цифровой робастной системы двухканального управления обмоточной машиной по каналам регулирования скорости вращения приводного механизма и натяжения обмоточной ленты. Задачей статьи является исследование динамических характеристик синтезированных аналоговой и цифровой систем робастного управления скоростью вращения приводного механизма и натяжения обмоточных лент.

Изложение материала исследования, полученных научных результатов. Для синтеза системы робастного управления необходима математическая модель обмоточной машины, как объекта робастной системы управления по каналам регулирования натяжения обмоточной ленты и скорости вращения приводного механизма с учетом исполнительных двигателей приводного и тормозного механизмов [1]. Обмотчик состоит из приводного механизма, зарядной катушки с лентой и

участка обмоточной ленты. Внешними силами являются: сила приводного механизма $F_n(t)$ и сила тормозного механизма $F_m(t)$ [2, 3].

Исполнительный двигатель приводного механизма расположен на значительном расстоянии от обмоточной машины и приводит во вращение обмотчики через общий редуктор. Для быстроходных обмоточных машин, особенно для бронеобмотчиков, на динамику движения обмоточной машины оказывает влияние наличие упругих элементов как между приводным двигателем и редуктором, так и между редуктором и приводным механизмом. При этом скорости вращения приводного двигателя V_d , редуктора V_p и приводного механизма V_n , особенно в переходных процессах, не совпадают, поэтому трансмиссию машины рассматривают как трехмассовую систему с тремя сосредоточенными массами: массой - двигателя m_d , массой редуктора m_p и моментом инерции приводного механизма I_n , соединенных упругими валами с коэффициентами жесткости C_1 и C_2 и коэффициентами внутреннего вязкого трения β_1 и β_2

По сравнению с двумассовой системой в трехмассовой системе новыми компонентами вектора состояния являются: F_{y1} , F_{y2} - силы упругости передаваемые быстроходными и тихоходными валами соответственно; V_d , V_p - скорости движения двигателя и редуктора.

Параметры обмоточной машины изменяются с течением времени. Наиболее сильно изменяется радиус кружка ленты R и момент инерции кружка с лентой I по мере выработки ленты в процессе обмотки. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать три варианта параметров обмоточной машины, соответствующие трем радиусам размотки - начальному r_n , среднему r_{cp} и конечному r_k .

Метод решения. В настоящее время наиболее широкое распространение получило решение задачи аналогового и цифрового робастного управления во временной области при описании системы с помощью Δ оператора [8] В этом случае уравнение состояния дискретной системы примет следующий вид

$$\delta \bar{x}(k) = A_{\delta} \bar{x}(k) + B_{1\delta} \bar{w}_1(k) + B_{2\delta} \bar{u}(k);$$

$$\bar{z}(k) = C_1 \bar{x}(k) + D_{11} \bar{w}_1(k) + D_{12} \bar{u}(k);$$

$$\bar{y}(k) = C_2 \bar{x}(k) + D_{21} \bar{w}_1(k) + D_{22} \bar{u}(k).$$

Из этих выражений, в частности, следует, что при $\Delta = 0$ матрицы состояния A_{δ} и управления B_{δ} дискретной системы при использовании Δ оператора равны матрицам состояния A и управления B исходной непрерывной системы, что и позволяет сравнивать результаты

синтеза систем непрерывного и цифрового управления.

Для нахождения цифрового робастного регулятора необходимо решить уравнение Риккати по управлению

$$0 = \hat{Q} + A^T X + XA + \Delta A^T X A - \left[\hat{L} + B^T X (\Delta A + I) \right]^T \left[\hat{R} + \Delta B^T X B \right]^{-1} \left[\hat{L} + B^T X (\Delta A + I) \right],$$

где

$$\hat{R} + \Delta B^T X B = \hat{R}_q / \Delta;$$

$$\hat{L} + B X (\Delta A + I) = \hat{L}_q / \Delta;$$

$$\hat{Q} = \hat{C}^T J \hat{C} / \Delta.$$

При этом замкнутая таким регулятором система

$$A - B \left(\hat{R} + \Delta B^T X B \right)^{-1} \left(\hat{L} + B X (\Delta A + I) \right)$$

является устойчивой.

Для нахождения цифрового робастного наблюдателя необходимо решить уравнение Риккати по наблюдению

$$0 = \hat{Q} + AZ + ZA^T + \Delta A Z \hat{A}^T - \left[\hat{L} + (\Delta \hat{A} + I) Z \hat{C}^T \right];$$

$$\left[\hat{R} + \Delta \hat{C} Z \hat{C}^T \right]^{-1} \left[\hat{L} + (\Delta \hat{A} + I) Z \hat{C}^T \right]^T,$$

где

$$\hat{R} + \Delta \hat{C} Z \hat{C}^T = \Delta \hat{R}_q;$$

$$\hat{L} + (\Delta \hat{A} + I) Z \hat{C}^T = \hat{L}_q;$$

$$Q = \hat{B} J \hat{B}^T / \Delta.$$

При этом робастный наблюдатель может быть представлен в виде \hat{A} , \hat{B} , \hat{C} , \hat{D} реализации

$$\left[\begin{array}{c|c|c} \hat{A} & \hat{B} & \\ \hline \hat{C} & \hat{D} & \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c|c} A - B_1 R_d^{-1} L_d & B_1 V_{21}^{-1} & 0 \\ \hline V_{12} R_3^{-1} (\hat{L}_2 - \hat{R}_2 R_d^{-1} L_d) & V_{12} \hat{R}_3^{-1} V_{21}^{-1} & I \\ \hline C_2 - D_{21} R_d^{-1} L_d & D_{21} V_{21}^{-1} & 0 \end{array} \right],$$

где

$$R_d = R_1 - R_2^T R_3^{-1} R_2;$$

$$L_d = L_1 - R_2^T R_3^{-1} L_2;$$

$$V_{12}^T V_{12} = R_3 ;$$

$$V_{21}^T V_{21} = -\gamma^{-2} (R_1 - R_2^T R_3^{-1} R_2) .$$

Естественно, что наблюдатель в замкнутом виде

$$\hat{A} - [\hat{L} + (\Delta \hat{A} + I) Z \hat{C}^T] (\hat{R} + \Delta \hat{C} Z \hat{C}^T)^{-1} \hat{C}$$

также является асимптотически устойчивой системой.

Тогда цифровой робастный регулятор и цифровой робастный наблюдатель представляет собой цифровой робастный компенсатор, входом которого является измеряемый вектор исходной системы $\bar{y}(k)$, а выходом является вектор управления исходной системы $\bar{u}(k)$. Робастный компенсатор с матрицами A_p , B_p , C_p , D_p описывается следующим уравнением состояния

$$\delta \bar{x}_p(k) = A_p \bar{x}_p(k) + B_p \bar{y}(k) ;$$

$$\bar{u}(k) = C_p \bar{x}_p(k) + D_p \bar{y}(k) ,$$

где

$$A_p = \hat{A} - B_2 V_{12}^{-1} \hat{C}_1 + B_2 V_{12}^{-1} \tilde{R}_2 \tilde{R}_3^{-1} \hat{C}_2 - \tilde{L}_2 \tilde{R}_3^{-1} \hat{C}_2 ;$$

$$B_p = -B_2 V_{12}^{-1} \tilde{R}_2 \tilde{R}_3^{-1} + \tilde{L}_2 \tilde{R}_3^{-1} ;$$

$$C_p = -V_{12}^{-1} \hat{C}_1 + V_{12}^{-1} \tilde{R}_2 \tilde{R}_3^{-1} \hat{C}_2 ;$$

$$D_p = -V_{12}^{-1} \tilde{R}_2 \tilde{R}_3^{-1} .$$

Результаты моделирования. В качестве примера на рис. 1. показаны переходные процессы: а) скорости двигателя V_d ; б) силы упругости F_y ; в) скорости приводного механизма $V_{п}$; г) силы тормозного механизма V_t ; д) скорости схода ленты с кружка V_c и е) изменения натяжения S по заданию на регулятор скорости в цифровой системе управления в робастной двухмассовой дискретной системе бронеобмотчика ВА2 – 2/700. Анализ этих кривых показывает, что в системе имеется астатизм по каналам регулирования скорости приводного механизма и натяжения обмоточной ленты, как по задающему, так и по возмущающему воздействию. Влияние перекрестных задающих воздействий проявляется только в переходных режимах, а в установившихся режимах выходные координаты равны задающим воздействиям. Переходные процессы в аналоговой и цифровой системах управления практически совпадают.

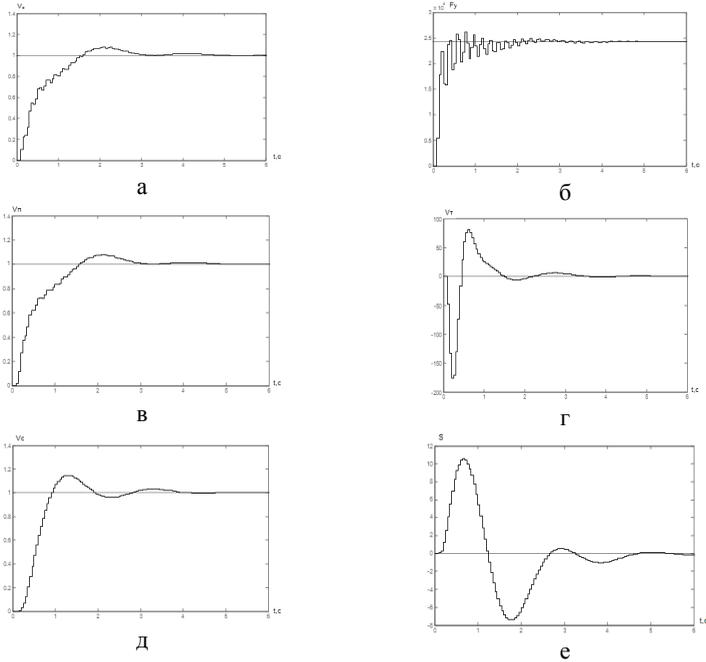


Рис. 1.

Выводы из проведенного исследования, перспективы этого направления. Разработана математическая модель обмоточной машины в виде двух и трехмассовой электромеханической системы приводного механизма. Синтезированы аналоговые и цифровые астатические законы робастного управления скоростью вращения приводного механизма и натяжения обмоточной ленты. Приведен пример синтеза робастного управления для двухмассовой модели бронеобмотчика ВА2 – 2/700.

Список литературы: 1. Кузнецов Б.И., Новоселов Б.В., Чаусов А.А. Проектирование взаимосвязанных систем управления. – К.: Техника, 1994. – 232 с. 2. Кузнецов Б.И., Новоселов Б.В., Богаенко И.Н. Проектирование систем со сложными кинематическими цепями. – К.: Техника, 1996. – 282 с. 3. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями. – Харьков: УИПА, 2005. – 511 с. 4. Khar-gonekar P., Petersen I., Rotea M. H^∞ optimal control with state feedback // IEEE Trans. Automat. Contr. – 1988. – AC – 33. – P. 783 – 786. 5. Doyle J., Glover K., Khar-gonekar P. and Francis B. State-space solutions to standard H^2 and H^∞ control

problems // IEEE Trans. Automat. Contr. – 1989. – AC – 34. – No. 8. – P. 831-847.
6. *Doyle J.C.* Synthesis of Robust Controllers and Filters // Proc. IEEE Conf. On Decision and Control, San Antonio, TX, December 14-16, 1983. 7. *Safonov M.G., Chiang R.Y. and Flashner H.* H^∞ Control Synthesis for a Large Space Structure // AIAAJ. Guidance, Control and Dynamics, 14, 3, pp. 513-520, May/June 1991.
8. *Stein G.* Lecture Notes, Tutorial Workshop on H^∞ Control Theory, Los Angeles, CA, Dec. 7-8, 1987.



Кузнецов Борис Иванович, д.т.н., проф., заведующий отделом Научно-технического центра магнетизма технических объектов Национальной академии наук Украины. Защитил докторскую диссертацию в 1990 году по синтезу структур и оптимизации многоканальных квазиитерационных систем управления.



Никитина Татьяна Борисовна, к.т.н., докторант кафедры системного анализа и управления Национального технического университета "ХПИ", защитила кандидатскую диссертацию в 2001 году по синтезу систем управления главными электроприводами блюминга в режиме пробуксовки валков.



Шурло Ольга Владимировна, ассистент кафедры электромеханики электротехнологического факультета Украинской инженерно-педагогической академии.



Коблянский Борис Борисович, ассистент кафедры электромеханики электротехнологического факультета Украинской инженерно-педагогической академии.

Поступила в редколлегию 15.06.2010

ISSN 2079-3944. Вісник НТУ "ХПИ". 2010. № 29