UO‘K 517.9

DINAMIK SISTEMALARDA OBYEKT SHOVQINLARI KORRELYATSIYALANGANDA NOANIQ KIRISH TA’SIRLARINI TIKLASH ALGORITMLARI

Xolxodjayev Baxodir Asatilayevich,
Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti
“Oliy matematika” kafedrasi dotsenti
Kuralov Bekjon Abdullayevich,
Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti
“Oliy matematika” kafedrasi katta o‘qituvchisi
kuralovbekjon@mail.ru
Axralov Hamidullaxon Ziyatovich,
Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti
“Oliy matematika” kafedrasi katta o‘qituvchisi
axralovh@.ru

Annotatsiya. *Ushbu maqolada vaqt bo‘yicha korrelyatsiyalangan tasodifiy Gauss Markov jarayonlarining oq shovqin va to‘siqlardan farq qiluvchi tasodifiy jarayonlar kirish ta’sirlarining tavsifi, Kalmanning klassik optimal chiziqli filtrlash masalasini umumiy qo‘yilish shartini buzadi. Biroq ko‘rilayotgan holatlarda filtrlash usullarini umumlashtirish yo‘llari mavjud bo‘lganligi uchun ko‘rsatilgan holat Kalmanning filtrlash usulini amaliy qo‘llashni cheklamaydi. Bunga boshlang‘ich dinamik sistemaning matematik modelini kengaytirishga Gauss Markov tasodifiy jarayoni ko‘rinishidagi kirish ta’sirlarini shakllantiradigan qo‘shimcha matematik modeldan foydalanish hisobiga erishish mumkin.*

Kalit so‘zlar: *korrelyatsiyalangan, tasodifiy jarayonlar, adaptiv algoritm, dinamik tenglama, Kalman filtr, muntazamlashtirish, Gilbert fazo, singulyar yoyish, psevdomurojaat.*

АЛГОРИТМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЁННЫХ ВХОДНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ШУМАХ ОБЪЕКТА В ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Аннотация. *В данной статье исследуются входные воздействия в виде коррелированных по времени случайных Гауссовских Марковских процессов. Наличие подобных случайных процессов, отличающихся от белого шума и помех, нарушает общие условия классической задачи оптимальной линейной фильтрации Калмана. Однако существующие возможности обобщения методов фильтрации в рассматриваемых случаях не ограничивают практическое применение метода фильтрации Калмана. Это достигается за счёт расширения математической модели исходной динамической системы и использования дополнительной математической модели, формирующей входные воздействия в виде Гауссовских Марковских случайных процессов.*

Ключевые слова: *коррелированные процессы, случайные процессы, адаптивный алгоритм, динамическое уравнение, фильтр Калмана, регуляризация, пространство Гильберта, сингулярное разложение, псевдообращение.*

ALGORITHMS FOR RECOVERING UNCERTAIN INPUT EFFECTS WHEN OBJECT NOISE IS CORRELATED IN DYNAMIC SYSTEMS

Abstract. *This article investigates input effects represented by time-correlated Gaussian-Markov random processes. The presence of such random processes, which differ from white noise and disturbances, violates the general assumptions of the classical Kalman optimal linear filtering problem. However, the existence of generalized filtering approaches in such cases does not limit the practical application of the Kalman filtering method. This is achieved by extending the mathematical model of the original dynamical system and employing an additional mathematical model that generates input effects in the form of Gaussian-Markov random processes.*

Keywords: *correlated processes, random processes, adaptive algorithm, dynamical equation, Kalman filter, regularization, Hilbert space, singular decomposition, pseudoinverse.*

Kirish. Ushbu ko‘rib chiqilayotgan holatda baholashning parametrik adaptiv algoritmlarini amaliy jihatdan amalga oshirishda boshlang‘ich ma’lumotlarning kichik o‘zgarishlarida yechimi turg‘un bo‘lmagan masalani ko‘rib chiqishga to‘g‘ri kelganda, ularni shakllantirishdagi o‘sha holat bilan bog‘liq hisoblash tavsifidagi sezilarli qiyinchiliklar uchraydi. Ular shu bilan tavsiflanadiki, boshlang‘ich ma’lumotlarning shunchalik kichik o‘zgarishlari yechimlarning ixtiyoriy katta o‘zgarishlariga olib kelishi mumkin. Shu munosabat bilan obyektni kirish shovqinining korrelyatsiyalanganlik sharoitida dinamik sistema holatini baholash aniqligini oshirish uchun muntazamlashtirish usullaridan foydalanish maqsadga muvofiqdir.

Metod. Kalmanning optimal filtrlash nazariyasida kirishda oq shovqin tipidagi mustaqil tasodifiy gauss jarayoni tushadigan gauss markov tasodifiy jarayoni dinamik sistemaning chiqishida qayta ishlanadi. O‘lchash shovqini ta’siri o‘lchash sistemasining matematik modelida hisobga olinadigan oq shovqin tipidagi gauss tasodifiy jarayonini ham aks ettiradi. Real sharoitlarda kirish ta’sirlarini funksionirlash sistemasi oq shovqindan farq qilishi mumkin va vaqt bo‘yicha korrelyatsiyalangan tasodifiy gauss markov jarayonlarini aks ettiradi.

Kengaytirilgan dinamik sistemaning kuzatish va dinamik tenglamasini yuqorida shakllantirilgan shartlarda quyidagi ko‘rinishda yozish mumkin:

$$x_{i+1}^{*} = A^{*} x_i^{*} + D^{*} w_i^{*}, \tag{5}$$

$$z_{i+1}^{*} = H^{*} x_{i+1}^{*} + v_{i+1}^{*}, \tag{6}$$

bu yerda $A^{*} = \left[\begin{array}{c|c} A & \Gamma D_1 \\ \hline 0 & D_2 \end{array}\right]$, $H^{*} = \left[\begin{array}{c|c} H_1 & 0 \\ \hline 0 & H_2 \end{array}\right]$, $D^{*} = \left[\begin{array}{c} 0 \\ \hline D_3 \end{array}\right]$,

$x_{i+1}^{*} = \left[\begin{array}{c} x_{i+1} \\ \hline \xi_{i+1} \end{array}\right]$, $v_{i+1}^{*} = \left[\begin{array}{c} v_{1,i+1} \\ \hline v_{2,i+1} \end{array}\right]$, $z_{i+1}^{*} = \left[\begin{array}{c} z_{1,i+1} \\ \hline z_{2,i+1} \end{array}\right]$, $w_i^{*} = w_i$.

(5), (6) tenglamalar asosida kengaytirilgan holat vektorini baholash uchun Kalmanning an’anaviy filtridan foydalanish mumkin:

$$x_{i+1|i}^{*} = A^{*} x_{i|i}^{*}, \tag{7}$$

$$P_{i+1|i}^{*} = A^{*} P_{i|i}^{*} A^{*T} + D^{*} \hat{Q}_i D^{*T}, \tag{8}$$

$$x_{i+1|i+1}^{*} = x_{i+1|i}^{*} + K_{i+1}^{*} y_{i+1}^{*}, \tag{9}$$

$$y_{i+1|i}^{*} = z_{i+1}^{*} - H^{*} x_{i+1|i}^{*}, \tag{10}$$

$$K_{i+1}^{*} = P_{i+1|i}^{*} H^{*T} [C_{i+1}^{*}]^{-1}, \tag{11}$$

$$C_{i+1}^{*} = H^{*} P_{i+1|i}^{*} H^{*T} + R_{i+1}, \tag{12}$$

$$P_{i+1|i+1}^{*} = (I - K_{i+1}^{*} H^{*}) P_{i+1|i}^{*}. \tag{13}$$

Har bir qadamda ξ_{i+1} qiymat bilan hisoblangan (3) ifoda ς_{i+1} noma’lum kirish ta’sirining qiymatini beradi. (7)-(13) ko‘rinishlardagi Kalman filtridan kelib chiqib K_{i+1}^{*} Kalman filtrlashi algoritmining kuchaytirish koeffitsiyenti Q_i va R_{i+1} matritsasiga bog‘liqligini ko‘rish qiyin emas.

(7)-(13) ifodalarni tahlil qilib, ularni hisoblash jarayonida Q_i va R_{i+1} baholardan foydalanilganligi uchun, (8), (10)-(13) munosabatlarini ekstrapolyatsiya va filtrlash algoritmlaridan istisno qilish maqsadga muvofiq, degan xulosaga kelish mumkin. [3, 8, 13] da bundagi K_{i+1}^{*} kuchaytirish koeffitsiyentini hisoblashda quyidagi ikki bosqichli hisoblash tartibi asosida Z_{i+1}^{i+l} o‘lchamini tanlab ishlab chiqish mumkinligi ko‘rsatildi:

$$SL^{*} = M_y, \tag{14}$$

va

$$K_{i+1}^{*} \Phi^{*} = L^{*}, \tag{15}$$

bu yerda

$$S=\begin{bmatrix} H^* \\ \hline H^*A^* \\ \hline \cdots\cdots \\ \hline H^*A^{*l-1} \end{bmatrix} A^*,\ L^*=P^*_{i+1/i}H^{*T},\ M_y=\begin{bmatrix} y^*_{i+2|i}y^{*T}_{i+1|i} \\ \hline y^*_{i+3|i}y^{*T}_{i+1|i} \\ \hline \cdots\cdots\cdots\cdots \\ \hline y^*_{i+l|i}y^{*T}_{i+1|i} \end{bmatrix},\ \Phi^*=[y^*_{i+1|i}y^{*T}_{i+1|i}].$$

Bunday modifikatsiyalashtirish K_{i+1} filtrning kuchaytirish koeffitsiyenti real o‘lchash axborotiga bog‘liq bo‘lib, K_{i+1} matritsaning aprior ma’lumotlarga qat’iy bog‘liqligini bartaraf qilishga olib keladi. Shunday qilib, keltirilgan algoritm yaxshi ishlanmagan hisoblanadi, ya’ni aprior ma’lumotlarning o‘zgarishiga kam sezuvchandir. Aprior axborot noaniq berilganda, ushbu holat jiddiy ahamiyatga ega.

(14) va (15) tenglamalar sistemasi yomon shartlangan, ya’ni boshlang‘ich ma’lumotlarning kichik o‘zgarishlariga yechimning katta o‘zgarishlari javob berishi mumkin. Ushbu tenglamalarni yechishdagi belgilangan holatlar muntazamlashtirish usullarini qo‘llash zarurligiga olib keladi [4, 6-9]. Ularning orasidan A.N.Tixonov muntazamlashtirishining umumiy prinsipiga asoslangan [4, 6] va S matritsani singulyar yoyilishida bazalangan (14) samarali psevdomurojaat usuli kabi usullar guruhini alohida ta’kidlash kerak [7, 12].

(14) tenglamani yechishga o‘tamiz. Yozuvlarni qisqartirish va kelgusida qulay ifodalash uchun (14) tenglamani quyidagi ko‘rinishda yozamiz:

$$S l^*_{i,j}=m_{y,i,j}\ , \tag{16}$$

bu yerda: S – H_1 gilbert fazosidan H_2 gilbert fazosiga harakatlanuvchi chiziqli operator; $l^*_{i,j}-L^*$ matritsaning i– ustuni $j=1,2,...,$; $m_{y,i,j}-M_y$ matritsaning i– ustuni.

Samarali psevdomurojaat usuli S matritsani (singulyar yoyilishda) faktorizatsiyalashga, ya’ni uni [4, 6, 12] dagi ko‘rinishiga asoslangan

$$S=UTV^T, \tag{17}$$

bu yerda:U – $(m\times m)$ – o‘lchamli ortogonal matritsa; V – $(n\times n)$ – o‘lchamli ortogonal matritsa; T – $(m\times n)$ – o‘lchamlidiagonal matritsa.

U va$V$ matritsalarning u_i va v_i ustunlari SS^T va S^TS matritsa xususiy vektorlarining mohiyatidir, T matritsaning μ_i diagonal elementlari esa S^TS (yoki SS^T) matritsa λ_i xususiy qiymatlarining musbat ildizlaridir.

Natija. S^+ psevdoteskari matritsa (Mur – Penrouz) quyidagi bahoni olish imkonini beradi [12]:

$$\hat{l}^*_{i,j}=VT^+U^Tm_{y,i,j}=\sum_{i=1}^{r}\frac{1}{\mu_i}v_iu_i^T\ , \tag{18}$$

bu yerda: $T^+=diag(t_1^+,...,t_i^+)$ –T –matritsa uchun matritsa; r – S –matritsa rangi ($\mu_i(i=\overline{1,n})$ singulyar sonni noldan farqlaydigan son), bu yerda agar $\mu_i\neq 0$, va$t_i^+=0$, yoki $\mu_i=0$ bo‘lsa $t_i^+=1/\mu_i$.

Agar S matritsa rangi $r=n$ bo‘lsa, psevdoteskari matritsa EKKU bo‘yicha [9] bahosiga mos keladi:

$$\hat{l}^*_{i,j,\alpha}=(S^TS+\alpha I)^{-1}S^Tm_{y,i,j},$$

va mos holda past aniqlik bilan tavsiflanadi. Shu munosabat bilan shunday nomlanadigan samarali psevdoteskari matritsa va baholar qo‘llaniladi
[6, 12]

$$\hat{l}^*_{i,j,\tau}=VT^+_\tau U^Tm_{y,i,j}=\sum_{i=1}^{r'}\frac{1}{\mu_i}v_i\cdot u_i^T\ , \tag{19}$$

bu yerda: T^+_τ – samarali $T=diag(t^+_{1\tau},...,t^+_{n\tau})$; $r'<r$ psevdoteskari matritsa, agar $\mu_i>\tau$ va$t^+_{i\tau}=0$, yoki $\mu_i=0$ bo‘lsa, $t^+_{i\tau}=1/\mu_i$ bo‘ladi.

Xatolikning minimal o‘rtacha me’yoriga ega bo‘lgan $\hat{l}^*_{i,j,\alpha}$ va $\hat{l}^*_{i,j,\tau}$ baholarni olish uchun α muntazamlashtirish parametri va τ yoki r' parametrlar $m_{y,i,j}$ vektorni o‘lchash xatoligining dispersiyasi bilan moslashtirilgan bo‘lishi kerak. Amaliyotda ularni ko‘pincha xatoliklar usuli bo‘yicha aniqlanadi.

Endi (15) tenglamani yechishga o‘tamiz. Yozuvlarni qisqartirish va kelgusida qulay ifodalash uchun (15) tenglamani quyidagi ko‘rinishda yozamiz:

$$W_i k_{i,j} = l^{\delta}_{i,j} = l_{i,j} + \delta l_{i,j}, \tag{20}$$

bu yerda: $W_i = \Phi^{*T}$ – gilbert fazosida *Z* dan *Z* ga harakatlanuvchi chiziqli operator: $k_{i,j} - K^{*T}_{i+1}$ matritsaning *i*- chi qatori,

$$j = 1,2,...; l^{\delta}_{i,j} - \delta^2 = \left\|\delta l_{i,j}\right\|^2_E, \ \delta^2_{\min} < \left\|\delta l_{i,j}\right\|^2_E < \delta^2_{\max}$$

ko‘rinishda approksimatsiyalash shartidagi L^{*T} matritsaning *i*- chi ustuni; $l_{i,j}$ –(20) tenglama o‘ng qismining aniq qiymati.

(20) ifodani hisobga olib (15) tenglamani yechish uchun M.M.Lavrentev usulidan foydalanamiz [2, 5, 10].

W_i operator musbat va o‘z-o‘ziga bog‘liq bo‘lgan holatni ko‘rib chiqamiz. U holda M.M.Lavrentev usuli quyidagi ko‘rinishdagi tenglamaga keladi:

$$\alpha k_{i,j} + W_i k_{i,j} = l^{\delta}_{i,j}, \tag{21}$$

bu yerda: α – muntazamlashtirish parametri.

(21) tenglamaning yechimini quyidagi shaklda ifodalash mumkin

$$k_{i,j,\alpha} = (\alpha I + W_i)^{-1} l^{\delta}_{i,j} = \theta_{\alpha}(W_i) l^{\delta}_{i,j},$$

bu yerda

$$\theta_{\alpha}(\lambda) = (\alpha + \lambda)^{-1}$$

- keltirib chiqaruvchi funksiya sistemasi, $0 \le \lambda < \infty$ –spektral parametr.

Agar W_i operator o‘z-o‘ziga bog‘liq o‘zgaruvchan ishorali bo‘lsa, u holda bu yerda M.M.Lavrentev usulining quyidagi aynan yaqinlashgan yechimlar modifikatsiyasini qo‘llash maqsadga muvofiq [1]

$$k_{i,j,\alpha} = g_{\alpha}(W_i) l^{\delta}_{i,j},$$

bu yerda:

$$\bar{k}_{i,j,\alpha} = g_{\alpha}(W_i) W_i \ k_{i,j,\alpha} = \bar{g}_{\alpha}(W_i) l^{\delta}_{i,j}, \ \bar{g}_{\alpha}(\lambda) = \lambda g^2_{\alpha}(\lambda);$$

quyidagi tenglamadan aniqlanadi:

$$\mu\alpha k_{i,j} + W_i k_{i,j} = l^{\delta}_{i,j}, \ \alpha > 0, \ \mu = \sqrt{-1}. \tag{22}$$

quyidagi

$$k_{i,j,\alpha} = \operatorname{Re} v_{\alpha}, \ v_{\alpha} = (i\alpha I + W_i)^{-1} l^{\delta}_{i,j},$$

ko‘rinishdagi ifodadan yoki A.N.Tixonov usulining maxsus hisoblash sxemasidan ham foydalanish mumkin [1, 7]:

$$\alpha^2 k_{i,j,\alpha} + W_i^2 k_{i,j,\alpha} = W_i l^{\delta}_{i,j}.$$

Nokorrekt qo‘yilgan masalalarni yechish usullari asosida ko‘rsatish mumkinki [9, 14], (15) sistemani sezilarli darajada yaxshi shartlanganligini ta’minlash uchun quyidagi ko‘rinishdagi sistemani qarab chiqish maqsadga muvofiq:

$$W_{i,\alpha} k_{i,j,\alpha} = \lambda l^{\delta}_{i,j},$$

bu yerda

$$W_{i,\alpha} = [(\mathsf{D}_W + \alpha \mathsf{D}_W^{-1}) + (1-\beta)(W_i - \mathsf{D}_W)],$$

D_W – W_i matritsa diagonali,

$$\lambda = \lambda_{\alpha} = \frac{(l^{\delta}_{i,j}, W_i \tilde{k}_{i,j,\alpha})}{\left\|W_i \tilde{k}_{i,j,\alpha}\right\|^2_E},$$

$$\beta = 1 - \sqrt{\frac{\left\| \mathsf{D}_W + \alpha \mathsf{D}_W^{-1} \right\|_E^2 - \left\| \mathsf{D}_W \right\|_E^2}{\left\| W_i - \mathsf{D}_W \right\|_E^2}},$$

$\tilde{k}_{i,j,\alpha}$ –sistema yechimi

$$W_{i,\alpha} \tilde{k}_{i,j,\alpha} = l_{i,j}^{\delta}.$$

$\hat{k}_{i,j}$ vektorni aniqlash quyidagi

$$\left\| l_{i,j}^{\delta} - W_i \tilde{\tilde{k}}_{i,j,\alpha} \right\|_E^2 < \delta_{\min}^2$$

tengsizlikni qanoatlantiruvchi $\tilde{\tilde{k}}_{i,j,\alpha}$ vektorni aniqlashga olib keladi [11].

$\tilde{\tilde{k}}_{i,j,\alpha}$ vektorni aniqlash α kattaligi to‘plamining ratsional masalasiga olib kelinadi:

$$\alpha_1,\ \alpha_l = q_l \alpha_{l-1},\ \ l = 2,3,...,$$

bu yerda q_l hisoblash jarayonida aniqlanishi kerak bo‘lgan kattalikning mohiyati.

Ularni quyidagi ifoda bo‘yicha aniqlash maqsadga muvofiq:

$$q_l = \left(\delta_{\min}^2 / \mathsf{v}_{l-1}^2 \right)^{1/2},$$

bu yerda

$$\mathsf{v}_{l-1}^2 = \left\| l_{i,j}^{\delta} - W_i k_{i,j,\alpha_{l-1}} \right\|_E^2.$$

Bunda α_1 qiymatini shunday berish kerakki, natijada

$$\mathsf{v}_1^2 = \left\| l_{i,j}^{\delta} - W_i k_{i,j,\alpha_1} \right\|_E^2 \approx \delta_{\max}^2$$

bo‘lsin, α_l ning navbatdagi qiymatlari esa

$$\left\| l_{i,j}^{\delta} - \tau_2 W_i \tilde{\tilde{k}}_{i,j} \right\|_E^2 < \delta_{\min}^2$$

uchun $\tilde{\tilde{k}}_{i,j}$ vektorini yetarli darajada tez topishni ta’minlashi kerak, bu yerda τ_2 quyidagi

$$\left\| l_{i,j}^{\delta} - \tau_2 W_i \tilde{\tilde{k}}_{i,j,\alpha} \right\|_E^2 = \delta_{\min}^2$$

tenglama yechimi asosida aniqlanadi [11].

Yuqoridagi munosabat asosida $\tilde{\tilde{k}}_{i,j}$ vektorni aniqlab, so‘ng $\tilde{\tilde{k}}_{i,j}$ vektori bo‘yicha quyidagi

$$\left\| l_{i,j}^{\delta} - W_i \hat{k}_{i,j} \right\|_E^2 < \Delta^2,\ W_i \hat{k}_{i,j}, l_{i,j}^{\delta} - W_i \hat{k}_{i,j}) = 0,$$

bu yerda $\Delta^2 = (\delta_{\min}^2 + \delta_{\max}^2)/2$ ikki shartni qanoatlantiradigan $\hat{k}_{i,j}$ vektorni topish mumkin.

Xulosa. Shuni ta’kidlash kerakki, bu yerda λ va β kattaliklar α parametrining tanlangan qiymati asosida topiladi. Bunda $\beta = \beta_\alpha$ matritsani muntazamlashtirishda evklid normasini saqlash prinsipi bo‘yicha aniqlanadi.

Shunday qilib, keltirilgan algoritmlar obyekt shovqinining korrelyatsiyalangan shartlarida dinamik sistemalardagi noma’lum kiruvchi ta’sirlarni tiklash masalasini muntazamlashtirish imkonini beradi.

ADABIYOTLAR:

1. Levine, W.S.(ed) The control handbook (second edition). Control system applications. –CRC Press, 2010. – NW: Taylor & Francis Group, 2011. –1702 p.

2. Егупов Н.Д., Пупков К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления. Учебник в 5 томах. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

3. Kodirova F., Kholkhodjaev B.A., Kuralov B.A., Xudoyberdiev A., "Advanced control systems for dynamic engineering applications" AIP Conf. Proc. 3304, 030057 (2025). (Scopus) https://doi.org/10.1063/5.0270490

4. Холходжаев Б.А. Алгоритмы восстановления входных воздействий динамических систем в условиях неопределённости. «Technical science and innovation», №4/2020. Ташкент, 2020. С. 150–154.

5. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб.: Наука, 2000.

6. Zayniddinov B., Kholkhodjayev.B.A., Abdishukurov SH., Zayniddinova Z. AIP Conference Proceedings, 2023, 2612, 020004. (2023) -pp. 1-7. (Scopus) https://doi.org/10.1063/5.0116887

7. Бакушинский А.Б. Гончарский А.В. Итеративные методы решения некорректных задач. М-Наука 1989. -128 с.

8. Игамбердиев Х.З., Холходжаев Б.А., Мамиров У.Ф. Формирование устойчивых алгоритмов оценивания неизвестных входных сигналов в динамических системах управления. ТДТУ, Техника фанлари ва инновация, 2019 й., -№1.

9. B. Kholhodjaev, B.A.Kuralov, K. Daminov. (2023) Block diagram and Mathematical model of an invariant system/ «Technical science and innovation» ТГТУ. №2 (16), 2023 г. Ст. 186-194.

10.Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Семичевская Н.П., Чепак Л.В, Шеленок Е.А. Управление техническими системами в условиях неопределенности. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2014. – 211 с.

11. Афанасьев В.Н. Динамические системы управления с неполной информацией: Алгоритмическое конструирование. Изд-во: КомКнига, 2007.

12. Короткий А. И. Восстановление управлений и параметров динамических систем при неполной информации. Изв. высш. учеб. заведений. 1998. № 11 (438). – С. 109-120.

13. B. Kholhodjaev, B.A.Kuralov, K. Daminov. (2023) Block diagram and mathematical model of an invariant system/ «Technical science and innovation» ТГТУ. №2 (16), 2023 г. Ст. 186-194.

14. Krasnova S.A., Utkin A.V. Analysis and synthesis of minimum-phase nonlinear systems under the action of external uncoordinated perturbations // Problems of Control, 2014, No. 6, –S. 22-30.