

Ө.Ж. Жамбулатова*, Қ. Әлімхан

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтпаев көшесі, 2

*e-mail: aigerimzhambulat@gmail.com

АЙНЫМАЛЫ УАҚЫТ КІДІРІСІ БАР КОММУТАЦИЯЛАНАТЫН СЫЗЫҚТЫҚ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕРДІ КҮЙ-КЕРІ БАЙЛАНЫСПЕН БАСҚАРУ

Аңдатпа: Бұл мақалада айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын сызықтық емес жүйелердің шығыс бойынша қадағалау мәселесі зерттеледі. Мұндай жүйелер бірнеше ішкіжүйелер арасындағы коммутациямен, сондай-ақ уақыт бойынша өзгертін кідірістердің болуымен сипатталады, бұл олардың динамикасын едәуір күрделендіреді. Коммутация мен уақыт кідірісінің бірлескен әсері басқару сапасының төмендеуіне, тербелмелі режимдердің пайда болуына және кейбір жағдайларда орнықтылықтың бұзылуына әкелуі мүмкін. Осыған байланысты тиімді басқару заңдарын синтездеу мәселесі қазіргі заманғы басқару теориясындағы өзекті ғылыми міндеттердің бірі болып табылады. Жұмыста күй-кері байланысқа негізделген басқару заңы ұсынылады, ол жүйе шығысының қадағалау сипаттамаларын қамтамасыз етуге бағытталған. Ұсынылған тәсіл сызықтық емес қасиеттер, коммутация және айнымалы уақыт кідірісі жағдайында тұйықталған жүйедегі барлық сигналдардың шектелген күйде қалуын қамтамасыз етеді. Жүйенің орнықтылық қасиеттері мен қадағалау қатесінің динамикасы уақыт кідірісінің жүйе мінез-құлқына әсерін ескеруге мүмкіндік беретін Ляпунов-Красовский функционалдарын қолдану арқылы талданады. Басқару коэффициенттерін дұрыс таңдау коммутация мен уақыт кідірісінің орнықсыздандыратын әсерін азайтуға мүмкіндік беретіні көрсетіледі. Алынған теориялық нәтижелердің дұрыстығын растау мақсатында сандық модельдеу нәтижелері келтіріліп, ұсынылған басқару тәсілінің тиімділігі және оның айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын сызықтық емес жүйелер класына қолдануға жарамдылығы көрсетіледі.

Түйін сөздер: коммутацияланатын сызықтық емес жүйелер, күй-кері байланыс, кідірісі бар жүйелер, Ляпунов-Красовский функционалы, шығыс бойынша қадағалау.

Кіріспе

Сызықтық емес жүйелерді уақыт кідірістері мен коммутация жағдайында басқару қазіргі заманғы басқару теориясындағы негізгі мәселелердің бірі болып табылады [1-3]. Уақыт кідірістері есептеу, байланыс және атқарушы тетіктердің жұмысымен байланысты көптеген инженерлік қолданбаларда табиғи түрде пайда болады және олар жүйенің жұмыс сапасын төмендетіп, тіпті орнықсыздыққа әкелуі мүмкін [2, 6, 7]. Мұндай кідірістер бірнеше ішкіжүйелер арасындағы коммутациямен қатар орын алған жағдайда, жүйені талдау мен басқару заңын жобалау айтарлықтай күрделене түседі [4, 8, 9].

Соңғы жылдары сызықтық емес жүйелерді орнықтыру және қадағалау басқаруы мәселелеріне айтарлықтай көңіл бөлінуде. Ляпунов әдістеріне негізделген күй-кері байланысқа сүйенетін басқару тәсілдері сызықтық емес динамиканы тиімді басқаруға мүмкіндік беретін құралдар ретінде өзін жақсы қырынан көрсетті [3, 4, 8]. Алайда, қолда бар зерттеулердің басым бөлігі кідіріссіз немесе тұрақты кідірісі бар жүйелерге бағытталған және жүйе құрылымы өзгермейді деп ұйғарады [3-6]. Ал айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын сызықтық емес жүйелер, желілік басқару жүйелері, энергетикалық жүйелер және динамикасы қайта бапталатын механикалық жүйелер сияқты практикалық қолданбалардағы маңыздылығына қарамастан, жеткілікті деңгейде зерттелмеген [8-11]. Ал айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын сызықтық емес жүйелер, желілік басқару жүйелері, энергетикалық жүйелер және динамикасы қайта бапталатын механикалық жүйелер сияқты практикалық қолданбалардағы маңыздылығына қарамастан, жеткілікті деңгейде зерттелмеген [8-11]. Соңғы жылдары коммутацияланатын сызықтық емес жүйелер үшін орнықтылық пен басқару мәселелері, соның ішінде айнымалы уақыт кідірісінің әсерін ескеру,

бірқатар еңбектерде қарастырылған [11-14]. Дегенмен шығыс бойынша қадағалау мәселесіне арналған зерттеулер саны шектеулі болып отыр.

Қадағалау басқаруының мақсаты жүйе шығысының берілген сигналды қадағалауын қамтамасыз ететін басқару заңын құрастыру болып табылады. Алайда көптеген практикалық жағдайларда модельдік белгісіздіктердің, сыртқы әсерлердің немесе уақыт кідірістің салдарынан қадағалау қатесін нөлге дейін асимптотикалық түрде түрде жеткізу мүмкін болмайды. Осыған байланысты қадағалау қатесінің уақыт өте келе нөлдің өзіне емес, оның кіші маңайындағы аймаққа шоғырлануын қамтамасыз ететін тәсілдер қарастырылады. Мұндай көзқарас әсіресе кідірісі бар және коммутацияланатын жүйелер үшін өзекті, себебі бұл жүйелерде қатаң асимптоталық нәтижелерге қол жеткізу көбіне мүмкін емес.

Сызықтық емес жүйелер үшін қадағалау және реттеу мәселелерін шешу мақсатында кері қадамдау әдісі, жоғары күшейткішті кері байланыс және динамикалық беттер әдісі сияқты әртүрлі басқару тәсілдері ұсынылған. Алайда бұл әдістерді айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын жүйелерге тікелей қолдану қиындықтар туындатады, себебі коммутация сигналдары мен кешіктірілген күйлер жүйенің динамикасына орнықсыздандыратын әсер етеді. Мұндай әсерлерді ескеру үшін қосымша талдау құралдарын пайдалану қажет. Уақыт кідірісі бар жүйелердің орнықтылық қасиеттерін зерттеуде Ляпунов-Красовский функционалдары тиімді теориялық негіз болып табылады. Аталған функционалдар кідіріс параметрлеріне тәуелді орнықтылық шарттарын тұжырымдауға және жүйенің орнықтылық қасиеттерін тереңірек талдауға мүмкіндік береді [3, 6, 7, 9].

Сызықтық емес жүйелер үшін қадағалау және реттеу мәселелерін шешу мақсатында кері қадамдау әдісі, жоғары күшейткішті кері байланыс және динамикалық беттерді басқару сияқты әртүрлі тәсілдер ұсынылған. Алайда бұл әдістерді айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын жүйелерге қолдану кезінде коммутация сигналдары мен кешіктірілген күйлердің жүйе динамикасына тигізетін орнықсыздандыратын әсерін ескеруді талап ететін қосымша құралдар қажет болады. Уақыт кідірісі бар жүйелердің орнықтылық қасиеттерін талдауда Ляпунов-Красовский функционалдары тиімді теориялық негіз болып табылады және олар кідіріс параметрлеріне тәуелді орнықтылық шарттарын алуға мүмкіндік береді.

Осы алғышарттарды негізге ала отырып, бұл мақала айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын жоғары ретті сызықтық емес жүйелердің шығыс бойынша қадағалау мәселесін зерттеуге арналған. Күй бойынша кері байланысқа негізделген басқару заңы ұсынылып, тұйықталған жүйедегі барлық сигналдардың шектелгендігі және қадағалау қатесінің уақыт өте келе нөлдің алдын ала берілген кіші маңайында қалуы қамтамасыз етіледі. Ұсынылған басқару тәсілі коммутация әсерлері мен шектелген уақыт кідірістерін тікелей ескеруге мүмкіндік беретін Ляпунов-Красовский талдауына және басқару коэффициенттерін тиісті түрде таңдауға негізделген.

Бұл жұмыстың негізгі нәтижелерін келесідей түйіндеуге болады:

- айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын жоғары ретті сызықтық емес жүйелер үшін күй бойынша кері байланысқа негізделген басқару сұлбасы ұсынылды;
- тұйықталған жүйенің орнықтылық қасиеттерін және қадағалау сапасын қамтамасыз ететін жеткілікті шарттар алынған;
- ұсынылған басқару тәсілінің тиімділігін көрсету мақсатында сандық мысал келтірілді.

Зерттеу шарттары мен әдістері

Сызықтық емес жүйелер үшін қадағалау және реттеу мәселелерін шешуге бағытталған бірқатар тәсілдер ұсынылған. Коммутацияланатын және уақыт кідірісі бар жүйелердің мұндай қойылымы әдебиеттерде кеңінен қолданылады [2, 4, 8].

Есептің қойылымы. Айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын сызықтық емес жүйені қарастырайық:

$$\dot{x}(t) = f_{\sigma(t)}(x(t), x(t - \tau(t))) + g_{\sigma(t)}(x(t))u(t) \quad (1)$$

$$y(t) = h(x(t)) \quad (2)$$

мұнда $x(t) \in R^n$ - жүйенің күй векторы, $u(t) \in R$ – басқару сигналы, $y(t) \in R$ – жүйе шығысы, $\sigma(t) \in M := \{1, 2, \dots, m\}$ – коммутация сигналы, ал $\tau(t)$ – шектелген айнымалы кідірісі. Кідіріс үшін келесі типтік болжамдар қабылданады: $0 \leq \tau(t) \leq \bar{\tau}$, $\mu(t) \leq \mu < 1$.

Берілген сигнал $y_d(t)$ үшін қадағалау қатесін келесідей анықтаймыз:

$$e(t) = y(t) - y_d(t) \quad (3)$$

Қадағалау мақсаты күй-кері байланысқа негізделген $u(t) = k(\cdot)$ басқару заңын құрастыру, мұнда тұйықталған жүйедегі барлық сигналдар шектелген болып қалады және кез келген алдын ала $\varepsilon > 0$ үшін $\limsup_{t \rightarrow \infty} |e(t)| \leq \varepsilon$ шартты орынлады.

Жоғары ретті сызықтық емес жүйелер үшін күй бойынша кері байланысқа негізделген басқару заңы ұсынылады. Басқару параметрлері сызықтық емес мүшелердің әсерін әлсірететіндей және тұйықталған жүйе динамикасында айнымалы уақыт кідірісінің туындататын ықпалын өтеуге мүмкіндік беретіндей етіп таңдалады. Мұндай таңдау жүйенің орнықтылық қасиеттерін сақтауға және басқару сапасын қамтамасыз етуге бағытталған.

Зерттеу нәтижелері

Жүйенің орнықтылық қасиеттерін зерттеу үшін Ляпунов-Красовский әдісі қолданылады. Жүйенің орнықтылық қасиеттерін талдау Ляпунов-Красовский функционалдарын қолдану арқылы жүргізіледі. Ұсынылған функционал уақыт кідірісінің әсерін ескеруге мүмкіндік береді және тұйықталған жүйенің орнықтылық аймағын анықтауға жағдай жасайды [2, 6, 9, 11, 12].

$$V(t) = x(t)^T P x(t) + \int_{t-\tau(t)}^t x(s)^T Q x(s) ds, \quad (4)$$

Мұнда $P > 0$ және $Q > 0$ – симметриялы оң анықталған матрицалар. Жүйенің орнықтылық қасиеттерін зерттеу үшін Ляпунов-Красовский функционалы қолданылады [2, 6, 9].

Теорема 1. Егер сызықтық емес мүшелер белгілі бір өсу шарттарын қанағаттандырса және уақыт кідірісі $0 \leq \tau(t) \leq \bar{\tau}$, $\mu(t) \leq \mu < 1$ шарттарын орындаса, онда күй-кері байланысқа негізделген $u(t) = k(x(t))$ басқару заңы бар болады. Бұл басқару заңының әсерінен тұйықталған жүйедегі барлық сигналдар шектелген болып қалады және қадағалау қатесі уақыт өте келе кез келген алдын ала берілген $\varepsilon > 0$ үшін $\limsup_{t \rightarrow \infty} |e(t)| \leq \varepsilon$.

Ғылыми нәтижелерді талқылау

Бұл бөлімде алынған теориялық нәтижелер талқыланады. Алынған нәтижелер коммутацияланатын сызықтық емес жүйелер үшін күй-кері байланысқа негізделген басқару тәсілінің тиімді екенін көрсетеді. Коммутация сигналдары мен уақыт бойынша өзгеретін кідірістер жүйе динамикасына елеулі әсер етсе де, ұсынылған әдіс бұл әсерлерді азайтуға мүмкіндік береді. Шығыс бойынша қадағалау мәселелерін күй-кері байланыс арқылы шешу тәсілдері бірқатар еңбектерде ұсынылған [13, 14], ал бұл жұмыста алынған нәтижелер осы бағыттағы зерттеулерді толықтырады.

Дәлелдеу.

(4) формулада анықталған $V(t)$ функциясын қарастырайық. Уақыт бойынша өзгеретін интеграл шектеріне арналған Лейбниц ережесін қолдану арқылы келесі өрнек алынады:

$$\dot{V}(t) = 2x^T P \dot{x}(t) + x^T(t) Q x(t) - (1 - \mu(t)) x^T(t - \tau(t)) Q x(t - \tau(t)).$$

Жүйе динамикасын $\dot{x}(t) = f_{\sigma(t)}(x(t), x(t - \tau(t))) + g_{\sigma(t)}(x(t))u(t)$ түрінде ескеріп, басқару заңын $u(t) = k(x(t))$ деп таңдаймыз. Басқару коэффициенттерін сызықтық емес мүшелердің әсерін басатындай етіп таңдау нәтижесінде келесі бағалау алынады:

$$\dot{V}(t) \leq -\alpha P x(t) P^T + \beta$$

Мұнда $\alpha > 0$ және $\beta \geq 0$.

Осыдан $V(t)$ функциясының шектелген екендігі, ал $\|x(t)\|$ нормасының уақыт бойынша шектелген күйде қалатыны шығады. Сонымен қатар, $e(t) = h(x(t)) - y_d(t)$ және $h(\cdot)$ функциясы локальды Липшиц шартына бағынатындықтан, қадағалау қатесі де шектелген болып қалады. Басқару коэффициенттерін тиісті түрде таңдау арқылы қадағалау қатесін нөлдің кез келген алдын ала берілген кіші маңайына жеткізуге болады. Бұл алынған орнықтылық және қадағалау қасиеттерін дәлелдейді.

Сандық мысал. Ұсынылған күй бойынша кері байланысқа негізделген басқару тәсілінің тиімділігін көрсету мақсатында айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын екінші ретті сызықтық емес жүйе қарастырылады. Сандық модельдеу әдістері мен параметрлерді таңдау әдебиеттерде ұсынылған тәсілдерге сәйкес жүзеге асырылды [6, 10]. Жүйе екі күй айнымалысынан тұрады ($n = 2$) және екі ішкіжүйені қамтиды ($m = 2$). Қарастырылып отырған жүйе осы жұмыста зерттелген коммутацияланатын сызықтық емес айнымалы кідірісі бар жүйенің жеке бір жағдайы болып табылады, мұнда сызықтық емес функциялар нақты түрде таңдалып алынған. Жүйе келесі теңдеулермен сипатталады:

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t), \quad (5)$$

$$\dot{x}_2(t) = -a_{\sigma(t)}x_1(t) - b_{\sigma(t)}x_2(t) + 0.2x_1(t - \tau(t)) + 0.1\sin(x_1(t)) + u(t), \quad (6)$$

$$y(t) = x_1(t). \quad (7)$$

Мұнда $x(t) = [x_1(t) x_2(t)]^T$ – жүйенің күй векторы, $u(t)$ – басқару сигналы, $y(t)$ – жүйе шығысы, $\sigma(t) \in \{1, 2\}$ – коммутация сигналы, $\tau(t)$ – шектелген айнымалы уақыт кідірісі.

Коммутация сигналы $\sigma(t)$ периоды 2 секундқа тең периодты функция ретінде таңдалады:

$$\sigma(t) = \begin{cases} 1, & t \in [2k, 2k+1), \\ 2, & t \in [2k+1, 2k+2), \end{cases} \quad k \in \mathbb{Z} \geq 0. \quad (8)$$

Екі ішкіжүйенің параметрлері келесідей алынады:

$$(a_1, b_1) = (2.0, 1.2), (a_2, b_2) = (1.5, 1.0).$$

Айнымалы уақыт кідірісі: $\tau(t) = 0.2 + 0.1 \sin(t)$ түрінде таңдалып,

$$0.1 \leq \tau(t) \leq 0.3. \quad (9)$$

шартын қанағаттандырады. Берілген қадағалау траекториясы келесі түрде анықталады:

$$y_d(t) = 0.45(1 - e^{-t}), \quad \dot{y}_d(t) = 0.45e^{-t}. \quad (10)$$

Қадағалау қатесі:

$$e(t) = y(t) - y_d(t) = x_1(t) - y_d(t). \quad (11)$$

Қадағалауды қамтамасыз ету үшін күй бойынша кері байланысқа негізделген басқару заңы келесі түрде таңдалады:

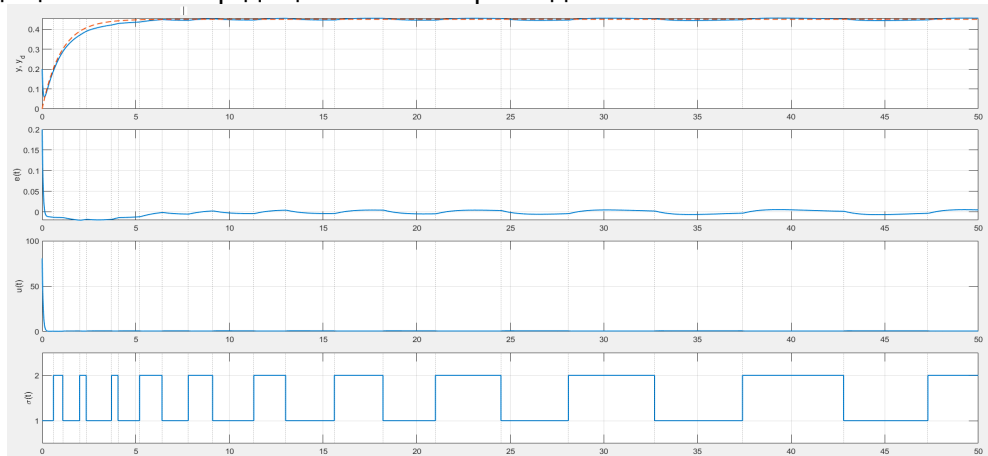
$$u(t) = -k_1x_1(t) - k_2x_2(t) + k_1y_d(t) + k_2\dot{y}_d(t). \quad (12)$$

мұнда $k_1 > 0$ және $k_2 > 0$ – басқару коэффициенттері.

Бұл басқару заңы тұйықталған жүйеде $y(t)$ шығысының $y_d(t)$ траекториясын қадағалауына бағытталған. Мұнда сызықтық емес $0.1\sin(x_1(t))$ мүшесі және кешіктірілген $0.2x_1(t - \tau(t))$ мүшесі шектелген әсерлер ретінде қарастырылады, ал басқару коэффициенттері олардың әсерін әлсірететіндей етіп таңдалады.

Сандық модельдеу нәтижелері 1-суретте келтірілген. Бірінші графикте $y(t)$ және $y_d(t)$ салыстырылып, жүйе шығысының берілген траекторияға жақындайтыны көрінеді. Екінші

график $e(t)$ қадағалау қатесінің уақыт бойынша өзгерісін көрсетеді; коммутация, сызықтық емес динамика және айнымалы уақыт кідірісі әсерінен қате нөлге дәл емес, оның кіші маңайында шектелген күйде қалады. Үшінші графикте басқару сигналы $u(t)$ беріліп, оның шектелген екені байқалады. Төртінші график коммутация сигналы $\sigma(t)$ -тің өзгерісін көрсетеді. Алынған нәтижелер ұсынылған басқару тәсілінің айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын сызықтық емес жүйе үшін тиімді екенін және жүйедегі барлық шамалардың шектелген күйде қалатынын көрсетеді.



Сурет 1 – Айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын сызықтық емес жүйенің уақыттық жауаптары: (а) жүйе шығысы $y(t)$ және берілген траектория $y_d(t)$; (b) қадағалау қатесі $e(t)$; (c) басқару сигналы $u(t)$; (d) коммутация сигналы $\sigma(t)$

Қорытынды

Бұл жұмыста айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын сызықтық емес жүйелер үшін күй бойынша кері байланысқа негізделген қадағалау басқару тәсілі қарастырылды. Ляпунов-Красовский функционалдарына сүйенген талдау арқылы тұйықталған жүйенің орнықтылық қасиеттерін қамтамасыз ететін жеткілікті шарттар алынған. Ұсынылған тәсіл коммутация әсерлері мен уақыт кідірісінің ықпалын тікелей ескеруге мүмкіндік береді және жүйедегі барлық сигналдардың шектелген күйде қалуын қамтамасыз етеді. Сандық мысал арқылы алынған теориялық нәтижелердің тиімділігі көрсетіліп, ұсынылған басқару заңының айнымалы уақыт кідірісі бар коммутацияланатын сызықтық емес жүйелер үшін қолдануға жарамдылығы дәлелденді.

Әдебиеттер тізімі

1. Khalil H.K. Nonlinear systems. 3rd ed / H.K. Khalil. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. – 750 p.
2. Fridman E. Introduction to time-delay systems: analysis and control / E. Fridman. – Basel: Birkhäuser, 2014. – 352 p.
3. Sun Z. Switched linear systems: control and design / Z. Sun, S.S. Ge. – London: Springer, 2011. – 312 p.
4. Liberzon D. Switching in systems and control / D. Liberzon. Boston: Birkhäuser, 2003. – 256 p.
5. Zhang W. Output tracking control for switched nonlinear systems with time-varying delay / W. Zhang, M. Chen, Y. Li // Nonlinear Analysis: Hybrid Systems. – 2018. – Vol. 29. – P. 257-270.
6. Li X. Stability and control of nonlinear systems with time-varying delays / X. Li, R. Rakkiyappan // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2016. – Vol. 61, № 6. – P. 1488-1493.
7. He Y. Delay-dependent stability criteria for nonlinear systems with time-varying delays / Y. He, M. Wu, J.-H. She // Automatica. – 2015. – Vol. 52. – P. 132-137.
8. Wang Y. Switched nonlinear systems with time-varying delay: stability and control / Y. Wang, X. Liu // ISA Transactions. – 2019. – Vol. 85. – P. 1-10.
9. Park P. Lyapunov-Krasovskii functionals for time-delay systems: a new approach / P. Park, J. Ko, C. Jeong // Systems & Control Letters. – 2016. – Vol. 97. – P. 1-8.
10. Chen W. State-feedback control for switched nonlinear systems with delays / W. Chen, Z. Li // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 112345-112356.

11. Zhao X. Stability and stabilization of switched nonlinear systems with time-varying delays / X. Zhao, L. Zhang, P. Shi // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2017. – Vol. 62, № 7. – P. 3623-3629.
12. Yang X. Robust stability of switched nonlinear systems with time-varying delay / X. Yang, X. Li, J. Cao // Nonlinear Dynamics. – 2018. – Vol. 93. – P. 1875-1887.
13. Zhang H. Output feedback control for switched nonlinear systems with time-varying delays / H. Zhang, Z. Wang, Y. Liu // International Journal of Control. – 2019. – Vol. 92, № 9. – P. 2074-2085.
14. Zhou B. Output regulation of switched nonlinear systems with time delays / B. Zhou, Z. Lin // Automatica. – 2021. – Vol. 129. – Art. № 109615.

Ә.Ж. Жамбулатова*, Қ. Әлімхан

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева,
010000, Республика Казахстан, г.Астана., ул.Сәтпаева, 2

*e-mail: aigerimzhambulat@gmail.com

УПРАВЛЕНИЕ КОММУТАЦИОННЫМИ НЕЛИНЕЙНЫМИ СИСТЕМАМИ С ПЕРЕМЕННЫМ ВРЕМЕННЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ НА ОСНОВЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО СОСТОЯНИЮ

В статье исследуется задача выходного слежения для класса коммутационных нелинейных систем с переменным временным запаздыванием. Подобные системы характеризуются наличием коммутации между несколькими подсистемами, а также временных задержек, изменяющихся во времени, что существенно усложняет их динамику. Совместное влияние коммутации и запаздывания может приводить к ухудшению качества управления, возникновению колебательных режимов и даже нарушению устойчивости, что делает задачу синтеза эффективных законов управления особенно актуальной. В работе предлагается закон управления, основанный на обратной связи по состоянию, который ориентирован на обеспечение требуемых характеристик выходного слежения. Предложенный подход гарантирует ограниченность всех сигналов в замкнутой системе при наличии нелинейностей, коммутации и переменного временного запаздывания. Анализ устойчивостных свойств системы и динамики ошибки слежения проводится с использованием функционалов Ляпунова-Красовского, позволяющих учитывать влияние запаздывания на поведение системы. Показано, что корректный выбор коэффициентов управления способствует снижению дестабилизирующего воздействия коммутации и временных задержек. Для подтверждения полученных теоретических результатов приведены результаты численного моделирования, которые демонстрируют эффективность предложенного метода управления и подтверждают его применимость к широкому классу коммутационных нелинейных систем с переменным временным запаздыванием.

Ключевые слова: коммутационные нелинейные системы, обратная связь по состоянию, системы с запаздыванием, функционалы Ляпунова-Красовского, выходное слежение.

A. Zhambulatova*, K. Alimhan

L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev Street, 2

*e-mail: aigerimzhambulat@gmail.com

STATE-FEEDBACK CONTROL OF SWITCHED NONLINEAR SYSTEMS WITH TIME-VARYING DELAY

His paper investigates the output tracking problem for a class of switched nonlinear systems with time-varying delays. Such systems are characterized by switching among multiple subsystems as well as the presence of delays that vary over time, which significantly complicates their dynamics. The combined effects of switching and time delays may result in degraded control performance, oscillatory behaviors, and, in some cases, loss of stability. Therefore, the synthesis of effective control laws for such systems constitutes an important and challenging problem in modern control theory. A state-feedback control law is proposed to achieve the desired output tracking performance. The proposed approach is designed to ensure the boundedness of all signals in the closed-loop system in the presence of nonlinearities, switching, and time-varying delays. The stability properties of the system and the dynamics of the tracking error are analyzed using Lyapunov-Krasovskii functionals, which allow the influence of time delays on system behavior to be explicitly taken into account. It is shown that an appropriate selection of the control gains can significantly reduce the destabilizing effects caused by switching and time-varying delays. To validate the theoretical results, numerical simulation results are presented, demonstrating the effectiveness of the proposed control strategy and confirming its applicability to a broad class of switched nonlinear systems with time-varying delays.

Key words: switched nonlinear systems, state-feedback control, time-delay systems, Lyapunov-Krasovskii functionals, output tracking.

Авторлар туралы мәліметтер

Әйгерім Жақыпқызы Жамбулатова* – магистр, «Математикалық және компьютерлік моделдеу» кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: aigerimzhambulat@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7749-086X>.

Қилан Әлімхан – PhD, «Математикалық және компьютерлік моделдеу» кафедрасының аға оқытушысы, Л.Н. Гумилев Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: keylan@live.jp. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0766-2229>.

Сведения об авторах

Әйгерім Жақыпқызы Жамбулатова* – магистр, старший преподаватель кафедры «Математическое и компьютерное моделирование», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, Казахстан; e-mail: aigerimzhambulat@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7749-086X>.

Қилан Әлімхан – PhD, профессор кафедры «Математическое и компьютерное моделирование» кафедрасының профессоры, Л.Н. Гумилев Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан; e-mail: keylan@live.jp. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0766-2229>.

Information about the authors

Aigerim Zhambulatova* – Master's degree, Senior Lecturer of the Department of Mathematical and Computer Modeling, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan; e-mail: aigerimzhambulat@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7749-086X>.

Keylan Aimhan – PhD, Professor of the Department of Mathematical and Computer Modeling, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan; e-mail: keylan@live.jp. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0766-2229>.

Редакцияға енуі 22.01.2026

Өңдеуден кейін түсуі 03.03.2026

Жариялауға қабылданды 10.03.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-22](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-22)



IRSTI: 14.35.07

Y.Sh. Zhursinbek¹, B.Sh. Zhursinbek¹, A.K. Maidanov*, Sh.Zh. Seilov¹, A.V. Ermakov²

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev St. 2,

²M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,
677000, Russian Federation, Yakutsk, 58 Belinskogo St.

*e-mail: makeadil@mail.ru

IMPLEMENTATION OF THE «IMAGE TO DATA» CONVERTER FOR IMPROVING INFORMATION SECURITY

Abstract: Enhancing information security can be achieved through a variety of methods, with one notable approach involving the use of specialized hardware and software tools known as the «Image-to-Data» converter. As described by the authors, this device is primarily designed for secure information exchange in scientific research, ensuring data confidentiality and integrity during transfer. Its core principles focus on protecting sensitive information by preventing unauthorized access, making it an essential tool in high-security environments. Although initially developed for scientific purposes, the converter's capabilities are highly adaptable and can be applied to other sectors such as finance, healthcare, and government agencies, where secure communication is vital. By adopting this innovative converter, organizations can significantly strengthen their data protection measures, minimizing risks associated with cyber threats and data breaches. The technology's versatility and robustness facilitate safer data exchange, helping institutions maintain compliance with strict security standards and regulations. Overall, integrating the «Image-to-Data» converter can substantially enhance an organization's security posture, enabling secure, efficient, and versatile information sharing across various fields and industries, thereby supporting the integrity and confidentiality of critical information in an increasingly digital world.

©Y.Sh. Zhursinbek, B.Sh. Zhursinbek, A.K. Maidanov, Sh.Zh. Seilov, A.V. Ermakov, 2026