

ӘОЖ 577.3

**УАҚЫТЫ КЕШІККЕН АНЫҚТАЛМАҒАН ЖОҒАРЫ ДӘРЕЖЕЛІ СЫЗЫҚТЫҚ
ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕР ҮШІН КҮШТІ ШЫҒЫСТЫ ІЗГЕ ТҮСІРУДІ БАСҚАРУ
МӘСЕЛЕСІНЕ ШОЛУ**

Ахметқалиева Альмира Сериккановна
almira_vko@mail.ru

Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ Механика математика факультеті. Математикалық және компьютерлік модельдеу мамандығының 1 курс докторанты, Нұр-Сұлтан, Қазақстан
Ғылыми жетекшісі – К.Алимхан

Басқару теориясында уақыт кешігу құбылысы бар жүйелер ерекше орын алады және көптеген зерттеушілердің назарын алған. Уақыты кешіккен құбылыс электрлік желілер, қысқа толқынды осцилляторлар және гидравликалық жүйелер сияқты көптеген практикалық жүйелерде кездеседі. Олар көптеген себептерден пайда болуы мүмкін.

Сызықтық емес уақыты кешіккен жүйелер деп $x(t)$ күйінің келесі өзгерісі олардың ағымдық шамасынан ғана емес, алдыңғы шамасынан да тәуелді болатын жүйелер.

Сонымен жалпы түрде мынадай сызықтық емес жүйені қарастырамыз:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t)^{p_1} + \varphi_1(t, x(t), x(t-d), u(t)), \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1}(t) &= x_n(t)^{p_{n-1}} + \varphi_{n-1}(t, x(t), x(t-d), u(t)), \\ \dot{x}_n(t) &= u + \varphi_n(t, x(t), x(t-d), u(t)), \\ y(t) &= x_1(t) \end{aligned}$$

мұндағы $u(t)$, $y(t)$ және $x(t)$ сәйкесінше жүйенің кірісі, шығысы және күйі. d - уақыт кешігу параметрі болып табылады.

Уақыттың кешігуі келесідей екі себептен пайда болуы мүмкін: кешіккен өлшеулер мен кешіккен басқару. Екі жағдайда да кешігу тиімсіз әсерге ие, себебі өз кезегінде кешігу жүйенің құрылымын бұзуға немесе орнықсыздандыруға алып келеді. Кешігу эффекті жоғары жылдамдықты ұшақтар мен ракеталарды автоматты басқару кезінде ерекше анық көрініс табады. Басқарушы жүйенің пайда болған үрдістің бұзылуына кешігу әсері, әдетте, тұйық жүйеде автотербелістің туындауына, кейбір жағдайларда орнықтандырудың бұзылуына әкеледі. Сол себепті уақыт кешігуі бар жүйені басқару инженерияда сөзсіз күрделі мәселе болып табылады (Balasubramaniam т.б., 2010, Ensari and Arik, 2010, Tang т.б., 2011, Tian and Zhou, 2010, Yu, 2009). Келесі әдебиеттерде уақыты кешіккен жүйелердің орнықтылығына анализді уақытқа тәуелділер (Balasubramaniam et al., 2011, Cao et al., 1998, Chen et al., 2003, Guo, 2002, Su et al., 2001) және уақытқа тәуелсіздер (Luo and Chung, 2002, Lu et al., 2003) категориясына жатқызуға болады. Уақытқа тәуелділік кешігудің нақты ұзақтылығы туралы

ақпараттың болуын талап етеді. Ал уақытқа тәуелсіздік кешігу туралы ақпараттың болуын қажет етпейді, ол практикалық қолдану үшін қолайлы екендігін көрсетеді.

Уақыты кешіккен жүйелерді қолдану арқылы биологиялық, химиялық және басқа да құбылыстарды сипаттай аламыз. Уақыты кешігу құбылысы ерте кезден бері қызығушылық тудырғанымен, 21 ғасырдың басында зерттеле бастады. Өз кезегінде көптеген нәтижелер берді. Осы нәтижелер негізінде түрлі салалардағы мәселелер шешімін тауып жатты.

Сызықты емес жүйені басқару мәселесінде Такаги – Сугено (T – S) (Lian et al., 2001, Takagi және Sugeno, 1985, Ying, 1998) айқын емес моделінің сипатын пайдалану арқылы белгілі сызықты басқару теориясын тікелей қолдануға болады. Бұл кейінгі бөліктің бірнеше локальды сызықты жүйелерден тұратындығына байланысты. Содан кейін параллель бөлінген компенсация (PDC) арқылы контроллерді құру мен орнықтылыққа анализ тікелей Ляпунов әдісін қолдану арқылы жүзеге асырылады, ол басқару мақсатын сызықты матрица теңсіздігі мәселесін (LMIP) (Boyd т.б., 1994, Chen т.б., 1999, Lien т.б., 2011, Teixeira and Zak, 1999, Wu and Juang, 2008, Yang and Cai, 2010) шешуге әкеледі. Сонымен қатар, егер өлшеусіз күйлер бар болса, (Chung және Wu, 2009, Nguang және Shi, 2003, Soliman т.б., 2009, Tanaka т.б., 1998) зерттеулерінде LMIP-та қалыптасқан шарттары бар T – S айқын емес бақылаушылар негізіндегі орнықтандыру схемасын көрсетеді. Сонымен, ізге түсіруді басқару орнықтандыруды басқарудан күрделі болып табылады. Тек бірнеше жұмыстарда ғана (Сао т.б., 1999, Korba т.б., 2003, Lee т.б., 2003, Tseng т.б., 2001) T – S айқын емес әдісін пайдалану арқылы ізге түсіру және реттеуді басқару талданған.

Ізге түсіруді әлсіз қалдық қателігі бар тұйық жүйе үшін бұзылулар ретінде командалық сигналды пайдалануды ұсынған робасты ізге түсіру схемасы Tseng т.б. (2001) жұмысында берілген. Сызықты басқару теориясында реттелген басқаруды құру үшін (Сао т.б., 1999, Korba т.б., 2003) нәтижелерінде жетектеуші (feed-forward) компенсаторы қолданылады. Сызықтық реттеу теориясы (Francis, 1977) мен PDC схемасын біріктіре отырып, (Begovich т.б., 1999, Castillo-Toledo және Meda-Campana, 2002, Ma and Sun, 2000) жұмысында өзгермелі немесе статистикалық шығысты мақсатын жетеді. Дегенмен, (Lee et al., 2003) зерттеулері мұндай жоғары байланыс сәтсіздікке әкелетінін көрсетті. Осы мәселені шешу үшін тұрақты тоқты түрлендірушінің шығысын реттеу үшін күшейтуді айқын емес жоспарлау (Carbonell, Garcera, & Hilario, 1999) мен басқарудың интегралды схемасы (Lam, Lee, Leung, & Tam, 2001) енгізіледі. Дегенменде, жоғарыда келтірілген жұмыстарда практикалық жүйе ескеруге тиісті жалпы мәселені қамтымайды, яғни олар күйлерде сызықсыздық, уақытпен өзгермелі кешігу, белгісіз жүйенің тепе – теңдігі, өлшеусіз күйлер, шығысты ізге түсіру, бұзылулар.

Қолданылған әдебиеттер тізімі

1. M. Krstic, I. Kanellakopoulos, and P. Kokotovic, *Nonlinear and Adaptive Control Design*, John Wiley and Sons, New York, 1995.
2. C. Byrnes, F. Piscoli, and A. Isidori, *Nonlinear and Adaptive Control Design*, Birkhäuser, Boston, 1997.
3. H. Khalil, *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, New Jersey, 2002.
4. I. Karafyllis and Z. Jiang, *Stability and Stabilization of Nonlinear Systems*, Springer, London, 2011.
5. C. Qian and W. Lin, “Practical output tracking of nonlinear systems with uncontrollable unstable linearization,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 47, no. 1, pp. 21–36, 2002.
6. W. Lin and R. Pongvuthithum, “Adaptive output tracking of inherently nonlinear systems with nonlinear parameterization,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 48, no. 10, pp. 1737–1749, 2003.
7. X. Yan and Y. Liu, “Global practical tracking by outputfeedback for nonlinear systems with unknown growth rate,” *Science China Information Sciences*, vol. 54, no. 10, pp. 2079–2090, 2011.

8. Y. Liu and J. Zhang, "Practical output-feedback risksensitive control for stochastic nonlinear systems with stable zero dynamics," *SIAM Journal on Control and Optimization*, vol. 45, no. 3, pp. 885–926, 2006.
 9. W. Li and J. Zhang, "Distributed practical output tracking of high-order stochastic multi-agent systems with inherent nonlinear drift and diffusion terms," *Automatica*, vol. 50, no. 12, pp. 3231–3238, 2014.
 10. A. BenAbdallah, T. Khalifa, and M. Mabrouk, "Adaptive practical output tracking control for a class of uncertain nonlinear systems," *International Journal of Systems Science*, vol. 46, no. 8, pp. 1421–1431, 2015.
 11. Z. Sun and Y. Liu, "Adaptive state-feedback stabilization for a class of high-order nonlinear uncertain systems," *Automatica*, vol. 43, no. 10, pp. 1772–1783, 2007.
 12. X. Zhang, X. Huang, and H. Lu, "Forwarding-based trajectory tracking control for nonlinear systems with bounded unknown disturbances," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 14, no. 5, pp. 1231–1243, 2016.
 13. N. Wang, C. Qian, and Z. Sun, "Global asymptotic output tracking of nonlinear second-order systems with power integrators," *Automatica*, vol. 80, no. 6, pp. 156–161, 2017.
 14. T. Li, Z. Sun, and S. Yang, "Output tracking control for generalized high-order nonlinear system with serious uncertainties," *International Journal of Control*, vol. 90, no. 2, pp. 323–333, 2017.
- Z. Sun, Z. Song, and T. Li, "Output feedback stabilization for high-order uncertain feedforward time-delay nonlinear systems," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 352, no. 11, pp. 5308–5326, 2015.