SUV SATHINI BOSHQARISH TEXNOLOGIK JARAYONINI FORMALLASHTIRISH

Safarov Elyorbek Xasanovich
Andijon davlat texnika instituti, dotsent

Annotatsiya. Maqolada doimiy kesimli rezervuardagi suv sathini boshqarish texnologik jarayoni matematik modellar asosida formallashtiriladi. Buning uchun massa balansi tenglamasi tuzilib, Torricelli qonuni soddalashtirilgan ko‘rinishda qo‘llanadi va birinchi tartibli chiziqli differensial tenglama ko‘rinishidagi model olinadi. Turg‘un holat atrofida kichik og‘ishlar usuli bilan chiziqlashtirish bajarilib, Laplas o‘zgarishi yordamida suv sathi og‘ishining kirish oqimiga nisbatan uzatish funksiyasi ajratib olinadi. Sonli misol orqali rezervuar kesimi va chiqish koeffitsienti berilganida tizimning vaqt doimiysi va kuchaytirish koeffitsienti hisoblanadi hamda bosqichli ta’sirga javob grafigi tavsiflanadi. Natijalar suv sathini avtomatik boshqarish tizimlarida PID-regulyatorlarni loyihalash, barqarorlikni tahlil qilish va imitasion modellashtirish uchun formallashtirilgan modeldan samarali foydalanish mumkinligini ko‘rsatadi.

Kalit so‘zlar: suv sathini boshqarish, texnologik jarayon, formallashtirish, differensial tenglama, uzatish funksiyasi, vaqt doimiysi, PID-regulyator.

Аннотация. В статье рассматривается формализация технологического процесса регулирования уровня жидкости в резервуаре с постоянным сечением на основе математического моделирования. Для этого составляется уравнение баланса массы, используется упрощённая форма закона Торричелли и получена модель в виде линейного дифференциального уравнения первого порядка. С помощью метода малых отклонений выполняется линеаризация вокруг установившегося режима и путём применения преобразования Лапласа выделяется передаточная функция, связывающая отклонение уровня с изменением входного расхода. На численном примере при заданных площади сечения резервуара и коэффициенте выхода рассчитываются постоянная времени и коэффициент усиления объекта, а также описывается график переходной характеристики при ступенчатом воздействии. Полученные результаты показывают, что формализованная модель может эффективно использоваться при проектировании ПИД-регуляторов, анализе устойчивости и имитационном моделировании систем автоматического управления уровнем.

Ключевые слова: регулирование уровня, технологический процесс, формализация, дифференциальное уравнение, передаточная функция, постоянная времени, ПИД-регулятор.

Abstract. The paper addresses the formalization of the liquid level control process in a constant-area tank using mathematical modeling techniques. A mass balance

ISSN 3030-3907

equation is derived, a simplified form of Torricelli's law is introduced, and the process is represented by a first-order linear differential equation. By applying the small-signal (deviation) method, the model is linearized around the steady-state operating point, and the Laplace transform is used to obtain the transfer function relating level deviation to inlet flow variation. A numerical example with given tank cross-section and outlet coefficient is used to compute the process time constant and gain, and to describe the step-response curve of the system. The results demonstrate that the formalized model can be effectively employed for PID controller tuning, stability analysis, and simulation of automatic level control systems.

Keywords: level control, technological process, formalization, differential equation, transfer function; time constant, PID controller.

Kirish

Sanoat texnologik jarayonlarida suyuqlik sathini avtomatik boshqarish eng ko‘p uchraydigan masalalardan biri bo‘lib, kimyo, neft-gaz, oziq-ovqat, suv ta’minoti va energetika tarmoqlarida rezervuar, reaktor, kolonna va boshqa apparatlarda xavfsiz va barqaror ishlashni ta’minlaydi. Suyuqlik sathining me’yoriy chegaradan chiqib ketishi avariya holatlari, mahsulot sifati yomonlashuvi va katta iqtisodiy yo‘qotishlarga olib kelishi mumkin, shuning uchun bunday tizimlarni ilmiy asoslangan matematik modellar orqali formallashtirish dolzarb hisoblanadi. Boshqaruv tizimlarini formallashtirish deganda real fizik jarayonlarni aniq matematik bog‘lanmalar, tenglamalar, blok-sxemalar va algoritmlar ko‘rinishida ifodalash tushunilib, bu nazariy tahlil, optimallashtirish va avtomatlashtirishni imkonini beradi [1].

Suv sathini boshqarish tizimi ko‘pincha yopiq konturda, ya’ni teskari aloqa asosida ishlaydi: o‘lchangan sath berilgan qiymat bilan solishtiriladi va xato signali asosida klapan yoki nasos boshqariladi. Bunday tizimlarni samarali loyihalash uchun rezervuar geometriyasi, oqimlar gidravlik xususiyatlari, sensor va ijro mexanizmlari dinamikasini hisobga olgan holda differensial tenglamalar asosida model qurish talab etiladi. Klassik avtomatik boshqaruv nazariyasida suv rezervuari sathini boshqarish birinchi tartibli obyektning tipik namunasi sifatida keng o‘rganiladi va ko‘plab darsliklarda misol sifatida keltiriladi [2].

Zamonaviy sanoat sharoitida bunday modellar faqat nazariy tahlil uchun emas, balki PID-regulyatorlarni parametrlarini avtomatik sozlash, raqamli (DCS, PLC) tizimlarda algoritmlarni sinash, hamda simulyatsiya muhiti (MATLAB/Simulink va boshqalar)da jarayonni imitasion modellashtirish uchun ham qo‘llanadi. Shu sababli suv sathini boshqarish tizimini formallashtirish, ya’ni jarayonni differensial tenglama, Laplas o‘zgarishi va uzatish funksiyasi orqali ifodalash ilmiy va amaliy nuqtai nazardan muhim vazifadir [3].

ISSN 3030-3907

Ushbu maqolaning maqsadi – doimiy kesimli rezervuardagi suv sathini boshqarish texnologik jarayonini formallashtirish, chiziqli dinamik model va uzatish funksiyasini olish, sonli misol asosida parametrlarni aniqlash hamda javob grafigining fizik talqinini berishdan iborat. Maqolada klassik nazariy yondashuvlar bilan bir qatorda, texnologik jarayon parametrlari bilan bog‘liq muhandislik izohlariga ham e’tibor qaratiladi [4].

Metodlar

Tadqiqot metodikasi suv sathini boshqarish jarayonini formallashtirishning bosqichma-bosqich yondashuviga asoslanadi: fizik tavsiflash, matematik model tuzish, turg‘un holatni va chiziqlashtirilgan modelni olish, Laplas o‘zgarishi orqali uzatish funksiyasini chiqarish va sonli parametrlarni hisoblash. Avval rezervuar va oqimlarning fizik modeli ishlab chiqiladi: kesimi A doimiy bo‘lgan vertikal idish, kiruvchi oqim $q_1(t)$, chiqish esa pastki teshikdan Torricelli qonuniga bo‘ysunadigan $q_2(t)$ oqim sifatida qabul qilinadi. So‘ng massa balansi tenglamasi tuzilib, sath balandligi $h(t)$ ning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi ifodalanadi [5].

Modelni soddalashtirish maqsadida quyidagi taxminlar qabul qilinadi: suyuqlik siqilmaydi, zichlik o‘zgarmas, rezervuar kesimi balandlik bo‘yicha o‘zgarmaydi, oqim laminar rejimda va harorat, bosim o‘zgarishlari e’tiborsiz qoldiriladi. Shuningdek, chiqish oqimining sathga bog‘liqligi chiziqlashtirilgan, ya’ni $q_2(t)\approx kh(t)$ tarzida ifodalanadi, bu esa modellashtirishni birinchi tartibli chiziqli differensial tenglama shakliga keltirish imkonini beradi.

Keyingi bosqichda turg‘un holat sharti qo‘llanib, $\frac{dh_0}{dt} = 0$ dan kelib chiqib, kirish va chiqish oqimlari orasidagi muvozanat ifodalanadi va sathning turg‘un qiymati h_0 aniqlanadi. Kichik og‘ishlar usuli yordamida $h(t)=h_0+\Delta h(t)$, $q_1(t)=q_{10}+\Delta q_1(t)$ almashtirishlari kiritilib, nolinear hadlar tashlab yuboriladi va natijada chiziqli model olinadi. Bu yondashuv klassik kichik signal tahlili tamoyillariga mos keladi va ko‘plab nazariy manbalarda tavsiya etiladi [6].

Chiziqlashtirilgan differensial tenglama Laplas o‘zgarishi yordamida chastota sohasiga o‘tkazilib, boshlang‘ich shartlar nol deb olingan holda algebraik tenglama ko‘rinishida yoziladi. Bu tenglamadan suv sathi og‘ishining Laplas tasviri $H(s)$ ni kirish oqimi og‘ishi $Q_1(s)$ ga nisbatan ifodalovchi uzatish funksiyasi $G(s)=H(s)/Q_1(s)$ ajratib olinadi. Uzatish funksiyasi standart birinchi tartibli obyekt ko‘rinishiga $G(s)=K_0/(Ts+1)$ keltiriladi va bu yerda kuchaytirish koeffitsienti K_0 hamda vaqt doimiysi T geometrik va gidravlik parametrlar orqali ifodalanadi.

Metodik yondashuvni amaliy jihatdan isbotlash uchun ma’lumot sifatida real sanoat jarayonlari parametrlari bilan solishtiriladigan sonli misol tanlanadi: rezervuar kesimi A va chiqish koeffitsienti k berilib, vaqt doimiysi va kuchaytirish koeffitsienti hisoblanadi. Shuningdek, bosqichli kirish ta’siri uchun vaqt javobi analitik shaklda olinib, vaqt bo‘yicha grafik (eksponentsial egri chiziq) tasvirlanadi

ISSN 3030-3907

va uning fizik talqini – inertlik, turg‘unlashish vaqti, ortiqcha o‘tishlar nuqtai nazaridan izohlanadi. Metod tanlashda klassik darsliklar hamda zamonaviy jarayon boshqaruvi bo‘yicha manbalarga tayanilgan [7].

Ko‘rib chiqiladigan ob’ekt – pastki qismida chiqish teshigi bo‘lgan, kesimi A doimiy bo‘lgan suv rezervuari. Kirish sarfi $q_1(t)$, chiqish sarfi esa Torrichelli qonuniga ko‘ra suv sathi $h(t)$ ga proporsional deb olinadi. Massa balansi:

$$A\frac{dh(t)}{dt} = q_1(t) - q_2(t)$$

Chiqish sarfi chiziqlashtirilgan holda $q_2(t) = k\sqrt{h(t)} \approx k_h h(t)$ ko‘rinishida qabul qilinadi, bu yerda k_h – sathga nisbatan ekvivalent koeffitsient. Amaliy ishlarda ko‘pincha bevosita

$$A\frac{dh(t)}{dt} = q_1(t) - kh(t)$$

ko‘rinishidagi birinchi tartibli modeldan foydalaniladi [8].

Turg‘un holat va chiziqlashtirish

Turg‘un holatda $\frac{dh_0}{dt} = 0$ bo‘lgani uchun

$$0 = q_{10} - kh_0 \;\Rightarrow h_0 = \frac{q_{10}}{k}$$

tenglikka ega bo‘linadi, bu yerdagi q_{10} – kirish sarfining turg‘un qiymati. Kichik og‘ishlarni $\Delta h(t) = h(t) - h_0$, $\Delta q_1(t) = q_1(t) - q_{10}$ deb belgilab, tenglamaga qo‘ysak:

$$A\frac{d\Delta h(t)}{dt} = \Delta q_1(t) - k\Delta h(t)$$

natijada chiziqli dinamik model olinadi.

Uzatish funksiyasi

Boshlang‘ich shart $\Delta h(0)=0$ deb olinib, Laplas o‘zgarishi qo‘llanadi:

$$AsH(s)=Q_1(s)-kH(s)$$

bundan

$$H(s) = \frac{1}{As + k}Q_1(s)$$

yoki

$$G(s) = \frac{H(s)}{Q_1(s)} = \frac{1}{As + k}$$

uzatish funksiyasi hosil bo‘ladi. Uni standart birinchi tartibli obyekt ko‘rinishida yozsa bo‘ladi:

$$G(s) = \frac{K_0}{T_s + 1}$$

bu yerda

$$K_0=1/k,\ T=A/k.$$

Sonli misol

ISSN 3030-3907

Berilganlar: A=1.5 m^2, k=0.5 m^3/(s·m). Shunda

$$T = \frac{A}{k} = \frac{1.5}{0.5} = 3s, \quad K_0 = \frac{1}{k} = 2$$

bo‘ladi, ya’ni uzatish funksiyasi

$$G(s) = \frac{2}{3s + 1}$$

ko‘rinishiga keladi. Bu natija tizim birinchi tartibli, vaqt doimiysi 3 s bo‘lgan, chiqish sathi kirish oqimiga nisbatan ikki baravar o‘lchovda o‘zgarishini ko‘rsatadi [9].

Pog‘onali ta’sirga javob

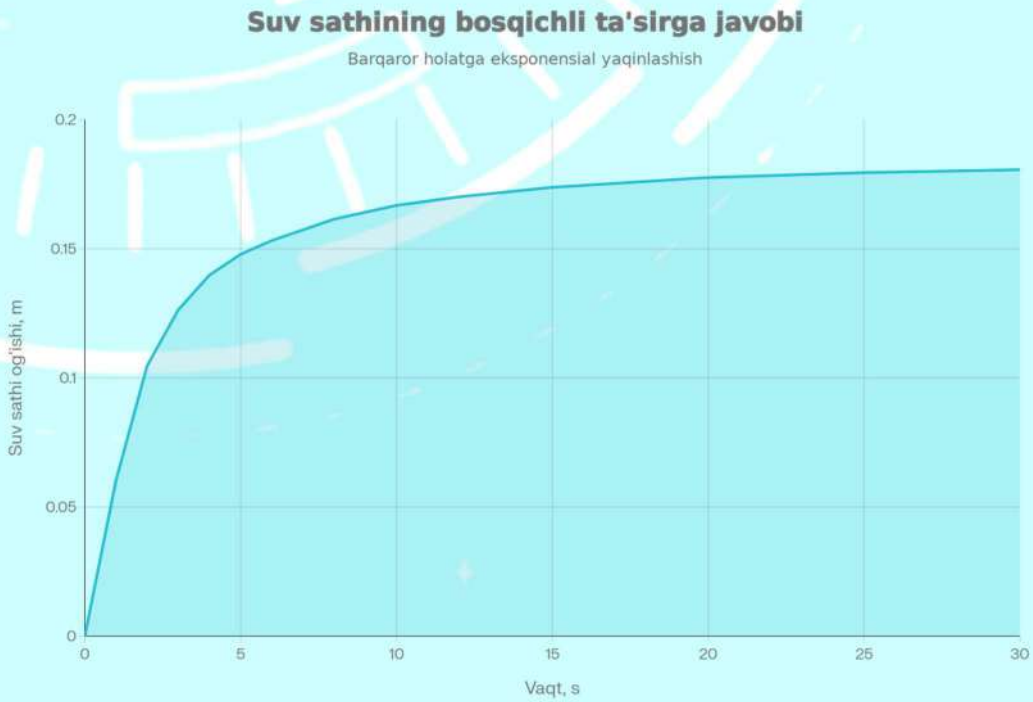
Agar kirish oqimi $\Delta q_1(t)=q_{1,step}u(t)$ shaklida bosqichli ta’sir bo‘lsa, standart birinchi tartibli tizim javobi:

$$\Delta h(t)=K_0 q_{1,step}(1-e^{-t/T})$$

bo‘ladi. Masalan, $q_{1,step}$=0.1 m^3/s bo‘lsa,

$$\Delta h(t)=0.2\ (1-e^{-t/3})$$

ifodalanadi, bu yerda sath taxminan $t\approx 3T=9$$t\approx 3T=9$ soniyada deyarli yangi turg‘un qiymatga yetadi (1-rasm).



1-rasm. Suv sathining pog‘onali javobi.

Grafik tasvirlash (tavsif)

- t – vaqt o‘qi bo‘yicha gorizontal o‘q (s).
- $\Delta h(t)$ – sathning og‘ishi vertikal o‘qda (m).
- Egri chiziq eksponentsial ko‘rinishda, boshlang‘ichda noldan keskin o‘sib, keyin sekinlik bilan 0.2 m atrofidagi turg‘un qiymatga yaqinlashadi.

Bu grafik sath inertligi, tezkorlik va regulyator sozlamalarini intuitiv talqin qilish imkonini beradi [10].

ISSN 3030-3907

Muhokama

Olingan model suv sathini boshqarish jarayonini birinchi tartibli obyekt sifatida tasvirlaydi va nazariy jihatdan klassik avtomatik boshqaruv tizimlari tahliliga to‘liq mos keladi. Tizim parametrlari (A, k) o‘zgarganda vaqt doimiysi va kuchaytirish koeffitsienti ham o‘zgarib, bu regulyator parametrlarini qayta sozlash zaruriyatini ko‘rsatadi. Model soddalashtirilgan bo‘lsa-da, real sanoat obyektlarini dastlabki loyihalash bosqichida yetarli aniqlik bilan tavsiflaydi; murakkabroq holatlarda nolinearlik va stoxastik buzilishlar ham inobatga olinishi kerak.

Xulosa

Suv sathini boshqarish texnologik jarayonini formallashtirish jarayonida differensial tenglama, chiziqlashtirish va Laplas o‘zgarishlari asosida birinchi tartibli dinamik model olindi. Sonli misol va grafik tavsif natijalarning fizik ma’nosini ochib berdi hamda sathning inertligi va turg‘unlashish vaqti miqdoriy baholandi. Ushbu model keyinchalik PID-regulyatorlarni loyihalash, barqarorlikni tahlil qilish va kompyuterda imitasion modellashtirish uchun bazaviy asos hisoblanadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Åström, K. J., & Murray, R. M. (2012). Feedback systems: An introduction for scientists and engineers. Princeton University Press.
2. Dubois, D., & Prade, H. (1996). An introduction to fuzzy systems. International Journal of Approximate Reasoning, 13(4), 287–319.
3. Khusanov, B. (2020). Avtomatik boshqaruv nazariyasi asoslari. O‘zMU nashriyoti.
4. Ljung, L. (1999). System identification: Theory for the user. Prentice Hall.
5. Ogata, K. (2010). Modern control engineering (5th ed.). Prentice Hall.
6. Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle, F. J. (2011). Process dynamics and control (3rd ed.). John Wiley & Sons
7. Shinskey, F. G. (1996). Process control systems: Application, design, and tuning (4th ed.). McGraw-Hill.
8. Woolf, L. (2023). Common control loops and models for temperature and level control. In Chemical process dynamics and controls (LibreTexts).
9. Zadeh, L. A. (1978). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. Fuzzy Sets and Systems, 1(1), 3–28.
10. Zhang, W., & Liu, J. (2020). Modeling and simulation of liquid level control systems in process industries. Journal of Process Control Engineering, 28(2), 45–57.

ISSN 3030-3907