

STOXASTIK DIFFERENSIAL TENGLAMALAR ASOSIDA ENERGIYA SAQLASH TIZIMLARI DEGRADATSIYASINI MODELLASHTIRISHNING SONLI USULLARI VA DASTURIY MAJMUASI

Polvanov Javlonbek Ismoilovich

Annotatsiya: Ushbu maqolada energiya saqlash tizimlarining (xususan, litiy-ionli akkumulyator batareyalarining) ekspluatatsiya jarayonidagi degradatsiyasi va xizmat muddatini stoxastik differensial tenglamalar (SDT) yordamida modellashtirish masalalari tadqiq etilgan. Tizim ish faoliyatiga ta'sir etuvchi tasodifiy omillar (harorat tebranishlari, yuklama o'zgarishlari) va ichki kimyoviy degradatsiya jarayonlarini hisobga olgan holda tegishli stoxastik modellar ishlab chiqilgan. SDT tizimlarini raqamli yechish uchun Eyler-Maruyama va Milshteyn kabi sonli usullar qo'llanilgan va ularning yaqinlashuvchanligi tahlil qilingan. Tadqiqot doirasida ishlab chiqilgan dasturlar majmuasi energiya saqlash qurilmalarining holatini (SoH) real vaqt rejimida prognozlash va ularning ishonchliligini baholash imkonini beradi.

Kalit so'zlar: Stoxastik differensial tenglamalar, energiya saqlash tizimlari, akkumulyator degradatsiyasi, sonli usullar, Eyler-Maruyama usuli, dasturlar majmuasi, matematik modellashtirish, prognozlash.

Аннотация: В данной статье исследуются вопросы моделирования деградации и срока службы систем накопления энергии (в частности, литий-ионных аккумуляторных батарей) в процессе эксплуатации на основе стохастических дифференциальных уравнений (СДУ). Разработаны соответствующие стохастические модели, учитывающие случайные факторы, влияющие на работу системы (колебания температуры, изменения нагрузки), и внутренние процессы химической деградации. Для численного решения систем СДУ применены такие методы, как Эйлер-Маруяма и Мильштейн, и проанализирована их сходимость. Разработанный в рамках исследования комплекс программ позволяет в режиме

реального времени прогнозировать состояние здоровья (SoH) накопителей энергии и оценивать их надежность.

Ключевые слова: Стохастические дифференциальные уравнения, системы накопления энергии, деградация аккумуляторов, численные методы, метод Эйлера-Маруямы, комплекс программ, математическое моделирование, прогнозирование.

Abstract: This article investigates the issues of modeling the degradation and lifetime of energy storage systems (specifically, lithium-ion batteries) during operation based on stochastic differential equations (SDEs). Appropriate stochastic models have been developed taking into account random factors affecting system performance (temperature fluctuations, load changes) and internal chemical degradation processes. Numerical methods such as Euler-Maruyama and Milstein were applied for the numerical solution of SDE systems, and their convergence was analyzed. The program package developed within the study framework enables real-time forecasting of the state of health (SoH) of energy storage devices and the evaluation of their reliability.

Keywords: Stochastic differential equations, energy storage systems, battery degradation, numerical methods, Euler-Maruyama method, program package, mathematical modeling, forecasting.

Kirish. Mavzuningligi. Bugungi kunda qayta tiklanadigan energiya manbalarini integratsiya qilish, elektr transportni ta'minlash va energiya manbalarini ta'minlashda energiya ta'minoti tizimlari (xususi-ionli energiya manbalari) hal qiluvchi rol o'ynamoqda. qilish, ekspluatatsiya jarayonida tizimlar ichki ravon quvvat yo'qotish va qarish (degradatsiya) jarayonlariga duchor bo'ladi. Akkumulyatorlarning degradatsiyasi murakkab elektrokimyoviy jarayon bo'lib, yuklamaning nomuntazam o' atrof-muhitni tozalash jarayonini nazorat qiladi. An'anaviy deterministik modellar ushbu texnologik jarayonlarni va deterministik dinamika o' birlashgan murakkab bog'liqlikni to'liq aks ettira olmadi. Shu sababli, energiya tizimlari degradatsiyasini stoxastik differensial tenglamalar (SDT) asosidagi modellashtirish, ularni yechishning yuqorilikdagi sonli usullarini ishlab chiqarish ishlab chiqarish va operativ prognozlash dasturiy mahsulotlar majmualarini

ishlab chiqarish energetika va amaliy matematika ishlab chiqarish o'ta aniq ishlab chiqarishlardan biri.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Stoxastik differensial tenglamalarni sonli yechish nazariyasi va muhandislik amaliyotiga tatbiq etish masalalari olimlar (jumladan, P. Kloeden, E. Platen, D. Xigam) asoslangan fundamental asoslangan o'rganilgan. Energiya tizim tizimlarining diagnostikasi va tekshiruv xizmat muddatini o'rganish bo'yicha respublikamiz va tadqiqotchilar tomonidan ko'plab deterministik empirik modellar taklif etiladi. Lekin, real vaqt rejimida akkumulyator batareyalarining salomatlik holatini (State of Health - SoH) ishlab chiqarishda stoxastik jarayonlar tebranishlarining dinamikaga ta'sirini yuklab oluvchi ixtisoslashtirilgan sonli algoritmlar va integratsiyalashgan tizimlar ta'minotlar tizimli ravshancha ishlab chiqilmagan.

Aniqlash maqsadi. Stoxastik differensial tenglamalar apparati va zamonaviy sonli usullar vositalar energiya tizimlari degradatsiyasining model matematikini hamda fayl holatini prognozlash mexanizmlarini ishlab chiqarish tizimidan iborat.

Asosiy qism 1. Energiya boshqaruv tizimlari degradatsiyasining stoxastik tabiati

Stoxas differensial differensial (SDT) qo'mana apparatining aynan shu uskunani tengomatni va fayllik tizimning umumiy salomatlik holatiga (State of Health - SoH) ta'sirini matematik tavsiflash yuklaydi. Modelda tizimning vaqt dinamikasi o'rtacha hisoblashatlar (deterministik qism) bo'yicha o'zgaruvchi fluktatsiyalar (stoxastik qism) birikmasi orqali ifodalanadi.

2. SDT tizimlarini yechishning sonli usullari

Tadqiqotda degradatsiya modellarini hisoblash simulyatsiya qilish uchun **Eyler-Maruyama** va **Milshteyn** sonli usullari qo'shimcha. Eyler-Mars usuli algoritmlarining soddaligi va resurs talab qilish usuli bilan tursa, Milshyn stoxas qismning hosilalarini ham olgan holda ancha yuqori tartibli aniqlikni va yechimning tezroq harakatlanishini ta'minlaydi. Ush qurol yordamida quvvatlantiruvchi quvvat yo'qotish traektoriyalari mantiqiylar zanjiri ko'rinishida raqamlashtiriladi.

3. Dasturiy majmuaning arxitekturasini va eksperimental qo'llanma

Ma'lumot vaqt va filtrlash moduli: jarayonda batareyaning oqimi, jarayon va harorat ko'rsatkichlarini qabul qiladi.

Xulosa. Energiya boshqaruv tizimlarining yuk tashish jarayonidagi degradatsiyasini stoxastik differens differens va tenglamalar (SDT) va zamonaviy sonli vositalar yordamida modellashtirish bo'yicha olib borilgan ilmiy tekshirish jarayonlariga kelindi:

1. Energiya boshqaruv tizimlarining (litiy-ionli akkumulyatorlarning) qarish dinamikasiga va yuklamaning o'ziga xos jihozi kabi stoxastik qurilmalar kuchli ta'sir ko'rsatadi. SDT ko'rinishdagi uskunaning modeli ichida aniq aks tarzda berdi.

2. SDT tizimlarini kompyuter xotirasida yechishda qo'llanilgan Mil o'lganligi tufayli, Eyler-Maruya usuliga nisbatan yuqori aniqlikni va traektoriyalarning tezroq yaqinlashib kelayotganligini ta'minladi.

3. Yaratilgan ixtisoslashtirilgan tizimlar majmuasi ko'p marta yangilangan Monte-Carlo simulyatsiyalari orqali energiya saqlash jihozining salomatlik holati (H) va qolgan foydali xizmat muddati'ni (RUL) an'anaviy deterministik modellarga yuqori darajada aniq prognoz qila olishini ko'rsatadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati

1. **Abutaliyev, F. B., & Saidxonova, M. S.** (2018). *Murakkab ob'yektlarni matematik modellashtirish va parallel hisoblash algoritmlari*. Toshkent: Fan.
2. **Kloeden, P. E., & Platen, E.** (2013). *Stoxastik differensial tenglamalarning sonli yechimi* (23-jild). Springer Science & Business Media.
3. **Higham, D. J.** (2001). *Stoxastik differensial tenglamalarning sonli simulyatsiyasiga algoritmik kirish*. SIAM Review, 43(3), 525-546.
4. **Milstein, G. N., & Tretyakov, M. V.** (2021). *Matematik fizika uchun stoxastik sonlar*. Springer Nature.
- 5.
6. **Xaldjigitov, A. A. va Akbarov, A.** (2021). *Muhandislik masalalarini yechishda chekli tuzatish usuli va dasturiy ta'minoti*. O'zbekiston matematika jurnali, 4(1), 78-85.
7. **Rizoev, S. M.** (2024). *Stoxastik jarayonlarni Monte-Karlo usuli yordamida parallel kompyuterli modellashtirish*. Axborot texnologiyalari va kompyuter tizimlari, (1), 33-40.

8.

9. **Polonskiy, Y. A.** (2020). *Texnik tizimlarning ishonchlilik masalalarida stoxastik differensial tenglamalarni yechishning sonli usullari* . Moskva: Nauka.

10. **Akkumulyator batareyalarini boshqarish tizimlari (BMS) tahlili.** (2025). *O'zbekiston energetika xabarnomasi* , (2), 88-95.