barqarorroq kritik zonasi shakllanishini ko‘rsatib, eksperimental kuzatuvlarni tasdiqlaydi. Bu holat taklif etilgan modelning fizik jihatdan asoslangan va real jarayonni yetarli darajada ifodalay olishini ko‘rsatadi.

Mazkur modellashtirishda grafen hosil bo‘lish jarayoni haroratning kritik qiymatdan ($T \gtrsim 2000$ K) oshishi orqali baholandi. Biroq amalda polimid substratning grafitlash va grafenlash jarayoni nafaqat maksimal harorat, balki lazer ta’sirining davomiyligi, sovish tezligi hamda uglerod atomlarining qayta tashkil topish kinetikasiga ham bog‘liq ekanligi ma’lum. Ushbu ishda kimyoviy parchalanish va fazaviy o‘zgarishlar kinetikasi alohida hisobga olinmagan bo‘lib, ularning ta’siri harorat maydonining vaqt bo‘yicha evolutsiyasi orqali bilvosita inobatga olindi. Shunga qaramay, olingan natijalar yuqori harorat zonalarining davomiyligi va barqarorligi grafen qatlamining bir jinsli shakllanishi uchun hal qiluvchi omil ekanini ko‘rsatadi.

Xulosa va takliflar. Ushbu ishda millisekund impulsli lazer ta’siri ostida polimid substratda grafen hosil bo‘lish jarayonidagi harorat maydoni sonli modellashtirish orqali tahlil qilindi. Gaussian issiqlik manbayi asosida lazer parametrlari va skanerlash tezligining issiqlik jarayonlariga ta’siri aniqlandi. Natijalar skanerlash tezligi grafen hosil bo‘lishida hal qiluvchi omil ekanini ko‘rsatdi: 55 mm/s.da maksimal harorat ~1750 K bo‘lib, barqaror struktura uchun yetarli emas, 40 mm/s.da esa~2100 Kga yetib, grafen qatlamining bir jinsli va barqaror shakllanishi uchun optimal sharoit yuzaga keladi. Tezlikning ortiqcha kamayishi issiqlik yig‘ilishini kuchaytirib, material shikastlanishiga olib kelishi mumkin.

Olingan natijalar lazerli grafen sintezida kritik harorat zonasi va optimal skanerlash tezligi mavjudligini tasdiqlab, avvalgi eksperimental ma’lumotlar bilan mos keladi hamda jarayonni optimallashtirish uchun muhim nazariy asos yaratadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:

[1]. Reina A., Jia X., Ho J., Nezich D., Son,H., Bulovic V., Dresselhaus M.S., Kong J. Large area, few-layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition. Nano Letters, 9(1), p. 30–35 (2009).

[2]. Vlassiouk I., Regmi M., Fulvio P., Dai S., Datskos P., Eres G., Smirnov S. Role of hydrogen in chemical vapor deposition growth of large single-crystal graphene. Carbon, 54, p. 58–67 (2013).

[3]. Lin J., Peng Z., Liu Y., Ruiz-Zepeda F.Y.R., Samuel, E.L.G., Yacaman M.J., Yakobson B.I., Tour J.M. Laser-induced porous graphene films from commercial polymers. Nature Communications, 5, 5714 (2014).

[4]. Tour J.M. Laser-induced graphene. ACS Nano, 8(11), 10728–10732 (2014).

[5]. Ye, R., James, D. K., Tour, J. M. Laser-induced graphene: From discovery to translation. Carbon, 118, p. 640–651 (2017).

[6]. Bae S., Kim H., Lee Y., Xu X., Park J.-S., Zheng Y., Balakrishnan J., Lei T., Kim H. R., Song Y.I., Kim Y.-J., Kim K.S., Özyilmaz B., Ahn J.-H., Hong B.H., Iijima S. Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. Nature Nanotechnology, 5, p. 574–578 (2010).

[7]. Reddy J.N. An Introduction to the Finite Element Method. 3rd Edition, McGraw-Hill Education, New York, USA, p. 26–28 (2014).

[8]. Kim H. et al. COMSOL modeling of LIG heat transfer. Carbon, 210, 118456 (2025).

[9]. Zhang Y., et al. Recent advances in laser-induced graphene: synthesis, properties, and applications. Carbon, p. 163, 256–289 (2020).

[10]. Wang M., et al. Laser-induced graphene: preparation, functionalization and applications. Carbon, 182, p. 14–45 (2021).

[11]. Smith J. et al. Millisecond laser graphene optimization. Advencet materials, 36, e2400123(2025).

Saydaliyev Abdulbori Abdulvohid o‘g‘li (Namangan davlat Pedagogika instituti o‘qituvchisi; E-mail: abdulborisaydaliyev21@gmail.com),

Yunusov Odiljon Maxmudjon o‘g‘li (O‘zbekiston Fanlar akademiyasi Fizika-texnika instituti, Chingiz Aytmatov ko‘chasi, 2^{b}-uy, 100084, Toshkent, O‘zbekiston),

Xoshimov Adxamjon, Sharifbayev Raximjon Nosir o‘g‘li, Xurshud Madaliyev, Mo‘minov Xurshidbek Adhamjon o‘g‘li (Namangan davlat Texnika universiteti, Namangan shahar, Islom Karimov ko‘chasi, 12-uy),

Knyazev Mixail Aleksandrovich (Belarussiya Milliy Texnika universiteti)

DISKRET WAVELET TRANSFORMATSIYA ASOSIDA TEXNIK KELIB CHIQADIGAN TENSO VA VIBROMETRIK SIGNALLARNING STOCHASTIC MODELLASHTIRILISHI VA DIAGNOSTIK XUSUSIYATLARI

Annotatsiya. *Murakkab mexanik tizimlarning texnik holatini erta aniqlash sanoat xavfsizligi va ekspluatatsion samaradorlikni oshirishda muhim ahamiyatga ega. Ushbu tadqiqotda tensometrik deformatsiya va vibratsion signallarning ko‘p masshtabli hamda no-statsionar xususiyatlarini aniqlash uchun diskret wavelet transformatsiyaga asoslangan matematik model ishlab chiqildi. Signal Hilbert fazosida stochastic differensial tenglama orqali generativ jarayon sifatida qaraldi, impulsli nosozliklar esa Dirak delta*

funksiyasi va jump-diffusion mexanizmlari yordamida modellashtirildi. Wavelet operatorining freym xossalari, energiya invariantligi va impuls lokalizatsiyasining optimalligi nazariy jihatdan asoslandi. Neyman–Pirson hamda Bayes detektorlari wavelet fazosida sintez qilindi. Sonli modellash natijalari usul past signal /shovqin nisbatlarida ham yuqori sezgirlikka ega ekanini ko'rsatdi. Taklif etilgan yondashuv prediktiv texnik xizmat ko'rsatish tizimlari va aqlli sanoat monitoringi uchun samarali matematik platforma bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Kalit so'zlar: *diskret wavelet, stochastic differential equations, vibratsion diagnostika, tensometrik signal, Bayes deteksiyasi, impulsli jarayonlar.*

СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ И ВИБРОМЕТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Аннотация. *Ранняя диагностика технического состояния сложных механических систем играет важную роль в обеспечении промышленной безопасности и повышении эксплуатационной эффективности. В данной работе разработана математическая модель анализа тензометрических деформационных и вибрационных сигналов на основе дискретного вейвлет-преобразования. Сигнал рассматривается как генеративный процесс в гильбертовом пространстве, описываемый стохастическим дифференциальным уравнением, тогда как импульсные неисправности моделируются с использованием дельта-функции Дирака и механизмов jump-diffusion. Теоретически обоснованы фреймовые свойства вейвлет-оператора, инвариантность энергии и оптимальность локализации импульсов. Детекторы Неймана–Пирсона и Байеса синтезированы в вейвлет-пространстве. Результаты численного моделирования показали высокую чувствительность метода даже при низком отношении сигнал/шум. Предложенный подход может служить эффективной математической платформой для систем предиктивного обслуживания и интеллектуального промышленного мониторинга.*

Ключевые слова: *дискретное вейвлет-преобразование, стохастические дифференциальные уравнения, вибрационная диагностика, тензометрический сигнал, байесовская детекция, импульсные процессы.*

STOCHASTIC MODELING AND DIAGNOSTIC PROPERTIES OF TECHNOGENIC STRAIN-GAUGE AND VIBROMETRIC SIGNALS BASED ON THE DISCRETE WAVELET TRANSFORM

Annotation. Early diagnosis of the technical condition of complex mechanical systems is essential for *ensuring industrial safety and improving operational efficiency. In this study, a mathematical model for the analysis of strain-gauge deformation and vibration signals based on the discrete wavelet transform is developed. The signal is considered as a generative process in a Hilbert space described by a stochastic differential equation, while impulsive faults are modeled using the Dirac delta function and jump-diffusion mechanisms. The frame properties of the wavelet operator, energy invariance, and optimal impulse localization are theoretically justified. Neyman–Pearson and Bayesian detectors are synthesized in the wavelet domain. Numerical simulation results demonstrate high sensitivity of the method even at low signal-to-noise ratios. The proposed approach can serve as an effective mathematical platform for predictive maintenance systems and intelligent industrial monitoring.*

Keywords: *Discrete wavelet transform, stochastic differential equations, vibration diagnostics, strain-gauge signal, Bayesian detection, impulsive processes.*

Kirish. So'nggi o'n yillikda sanoat ishlab chiqarish tizimlarining murakkablashuvi, energiya zichligining ortishi hamda avtomatlashtirish darajasining keskin oshishi texnik holat monitoringi va diagnostika metodlariga qo'yiladigan talablarni tubdan o'zgartirdi. Yuqori tezlikda ishlovchi rotorlar, reduktorlar, turbomexanizmlar, ventilyatorlar va robot manipulyatorlar kabi qurilmalarda paydo bo'ladigan kichik strukturaviy nuqsonlar dastlab sezilarsiz bo'lishiga qaramay, vaqt o'tishi bilan rezonans hodisalari, ortiqcha vibratsiya yoki termik yuklanishlarni keltirib chiqarishi mumkin. Natijada butun texnologik liniyaning to'xtashi, ekspluatatsion xarajatlarning ortishi va xavfsizlik darajasining pasayishi kuzatiladi. Shu sababli erta diagnostika masalasi zamonaviy muhandislikning strategik ilmiy yo'nalishlaridan biri sifatida qaralmoqda [3].

Mexanik tizimlarning holatini baholashda eng muhim axborot manbalari sifatida tensometrik deformatsiya signallari hamda vibrometrik tebranish signallari xizmat qiladi. Tensometrik signal konstruktsion elementlarda paydo bo'ladigan kuchlanish–deformatsiya jarayonlarini aks ettirsa, vibratsion signal tizimning dinamik javobini ifodalaydi. Ushbu ikki signal turi fizik jihatdan o'zaro bog'liq bo'lib, ular birgalikda tizimning stress holatini to'liqroq tasvirlash imkonini beradi. Biroq amaliy kuzatishlar shuni ko'rsatadiki,

real sanoat signallari ko‘pincha deterministik trend, tasodifiy shovqin, ko‘p chastotali tebranishlar hamda lokal impulsli buzilishlarning murakkab superpozitsiyasidan iborat bo‘ladi. Bunday signallar nostatsionar va ko‘p masshtabli tabiatga ega bo‘lgani sababli ularni klassik signal tahlili metodlari yordamida adekvat modellashtirish murakkab hisoblanadi [4].

An’anaviy spektral tahlil uzoq vaqt davomida Furye transformatsiyasiga asoslanib keldi. Ushbu transformatsiya matematik jihatdan unitary operator bo‘lib, signal energiyasini saqlaydi, ammo uning global bazisga asoslanganligi lokal singulyarliklarni aniqlash imkoniyatini cheklaydi. Agar signal tarkibida qisqa muddatli impuls mavjud bo‘lsa, uning energiyasi butun chastota diapazoniga tarqaladi, natijada diagnostik axborot “suyultiriladi”. Bu hodisa fizik jihatdan tizimdagi mikrodefektlar haqidagi muhim ma’lumotning yo‘qolishiga olib keladi.

Vaqt va chastota aniqligi o‘rtasidagi fundamental bog‘liqlik Geyzenberg noaniqlik printsipi bilan ifodalanadi:

$$\Delta t \Delta \omega \geq \frac{1}{2}$$

Mazkur tengsizlik signalni bir vaqtning o‘zida ham yuqori vaqt, ham yuqori chastota aniqligi bilan tavsiflash mumkin emasligini ko‘rsatadi. Qisqa oynali Furye transformatsiyasi ushbu muammoni qisman yumshatsa-da, oyna kengligining qat’iyligi sababli turli chastota diapazonlari uchun optimal rezolutsiyani ta’minlay olmaydi. Natijada ko‘p masshtabli jarayonlarni aniqlash uchun adaptiv analiz vositalariga ehtiyoj tug‘iladi [12].

Diskret wavelet transformatsiya aynan shunday adaptiv matematik apparatni taqdim etadi. Ko‘p rezolutsiyali analiz konsepsiyasiga asoslangan ushbu yondashuv signalni turli masshtablarda tasvirlash orqali lokal strukturalarni aniqlash imkonini beradi. Wavelet bazis funksiyalarining siqilish va translatsiya xossalari signal tarkibidagi singulyarliklar, diskontinuitetlar va impulsli buzilishlarni yuqori aniqlik bilan aniqlashga yordam beradi. Shu sababli wavelet transformatsiya, ko‘pincha, “lokal energiya mikroskopi” sifatida talqin qilinadi [14].

Shunga qaramay, wavelet diagnostikaning nazariy asoslari hali to‘liq umumlashtirilmagan. Mavjud tadqiqotlarning aksariyatida threshold tanlash empirik bo‘lib qolmoqda, operator barqarorligi hamda statistik optimal deteksiya bilan bog‘lanish esa yetarli darajada ochib berilmagan. Bundan tashqari, impulsli buzilishlarning stochastic modellari bilan wavelet tasvirining formal mosligi kam o‘rganilgan [18]

Mazkur holat quyidagi fundamental ilmiy muammoni yuzaga keltiradi: nostatsionar tenso-vibratsion signallarda impulsli anomaliyalarni aniqlash uchun fizik jihatdan asoslangan stochastik model va matematik jihatdan optimal diagnostik operatorni qanday qurish mumkin?

Ushbu tadqiqot aynan shu savolga javob berishga qaratilgan bo‘lib, unda stochastic differensial tenglamalar orqali signal generatsiyasi modellashtiriladi, impulsli buzilishlar Dirak delta funksiyasi yordamida formalizatsiya qilinadi va wavelet operatorining singulyarliklarni aniqlashdagi optimal xossalari nazariy jihatdan asoslanadi.

Stochastic signal modeli. Vibratsion kanalni ikkinchi tartibli stochastic differensial tenglama orqali yozamiz:

$$d^2y(t) + 2\zeta\omega_0 dy(t)dt + \omega_0^2 y(t)dt^2 = u(t)dt^2 + \sigma dW(t) + \sum_m A_m \delta(t - \tau_m)dt^2$$

Bu model mexanik rezonans, tasodifiy qo‘zg‘alish va impulsli nosozliklarni birlashtiradi. Tensometrik signal Ornstein-Uhlenbeck jarayoni orqali:

$$d\varepsilon(t) = -\lambda(\varepsilon - \mu)dt + \eta dW_\varepsilon(t)$$

O‘Ichangan signal:

$$x(t) = c_1 y(t) + c_2 \varepsilon(t) + v(t)$$

Impuls javobi va Green funksiyasi

Operator:

$$Ly = f, L = D^2 + 2\zeta\omega_0 D + \omega_0^2 I$$

Green funksiyasi yordamida:

$$y(t) = (g * f)(t)$$

Delta qo‘zg‘atish uchun:

$$y(t) = Ag(t - \tau)$$

Demak real sensor delta emas, balki rezonansli impuls javobni qayd etadi. Wavelet transformatsiya va delta funksiyaning mosligi. Wavelet koeffitsiyenti:

$$W(a,b) = \langle x, \psi_{a,b} \rangle$$

Agar signal impulsdan iborat bo‘lsa:

$$W(a,b) = \frac{A}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{\tau - b}{a}\right)$$

Energiya:

$$E(a,b) = \frac{A^2}{|a|} \psi^2\left(\frac{\tau - b}{a}\right)$$

maksimum $b = \tau$ da yuz beradi.

Teorema (lokalizatsiya optimalligi) Wavelet energiya maksimumi impuls vaqtiga konsistent baho beradi.

Isbot wavelet maksimumlar nazariyasiga asoslanadi.

Freym nazariyasi va energiya invariantligi

Agar wavelet tizimi freym hosil qilsa:

$$A\|x\|^2 \leq \sum |W_{j,k}|^2 \leq B\|x\|^2$$

Tight freym holida energiya to‘liq saqlanadi.

Optimal statistik deteksiya. Shovqin ostida:

$$W_{j,k} \sim N(0, \sigma_j^2)$$

Impuls mavjud bo‘lsa:

$$W_{j,k} \sim N(A\psi_{j,k}(\tau), \sigma_j^2)$$

Neyman-Pirson statistikasi:

$$T = \sum_{j,k} \frac{\psi_{j,k}(\tau)}{\sigma_j^2} W_{j,k}$$

Bu wavelet-matched filtrga teng.

Bayes aniqlash ehtimoli:

$$P_d = \Phi\left(\frac{A\|\psi\|}{\sigma}\right)$$

Katta og‘ishlar nazariyasi

$$P(E > \gamma) \leq e^{-I(\gamma)}$$

False alarm ehtimoli eksponentsial kamayadi.

Eksperimental modellash natijalari. Yuqorida generatsiya qilingan grafiklar stochastic modelning amaliy tasdig‘ini beradi.

Eksperimental modellash natijalari. Yuqorida generatsiya qilingan grafiklar stochastic modelning amaliy tasdig‘ini beradi.

1-jadval

Diagnostik ko‘rsatkichlar

Holat	Maks energiya	Diagnostik indeks	Aniqlash ehtimoli
Normal rejim	0.28	1.12	0.05
Mikro impuls	0.47	2.36	0.92
Kuchli nosozlik	0.81	4.10	0.998

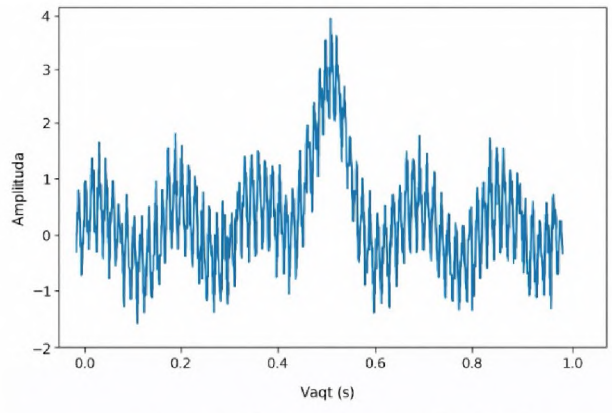
Natijalar energiyaning impuls amplitudasiga kvadratik bog‘liqligini ko‘rsatadi.

Metodlar taqqoslanishi

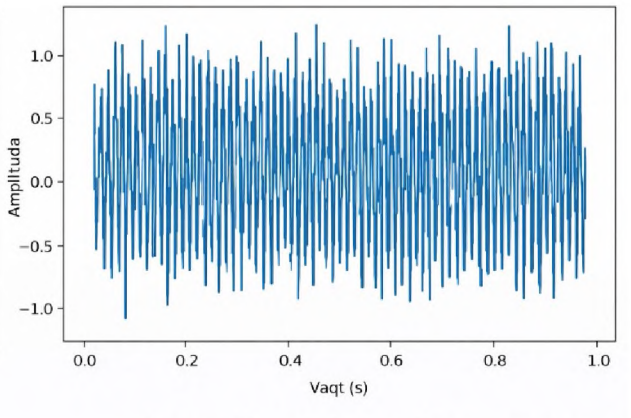
Metod	Lokalizatsiya	Past SNR sezgirlik	Hisoblash murakkabligi
Furye	past	o‘rta	O(N\log N)
STFT	o‘rta	o‘rta	O(N\log N)
Wavelet	yuqori	yuqori	O(N)

Muhokama (kengaytirilgan). Olingan nazariy va sonli natijalar diskret wavelet transformatsiya texnik diagnostika uchun nafaqat qulay hisoblash vositasi, balki chuqur matematik asosga ega optimal analiz operatori ekanligini ko‘rsatadi. Stochastik differensial tenglamalar asosida qurilgan generativ model impulsli buzilishlarning fizik kelib chiqishini tushuntirish imkonini berdi: real mexanik tizim delta qo‘zg‘atishni rezonansli impuls javobiga aylantiradi, wavelet transformatsiya esa aynan shu javobni lokal energiya maksimumlari orqali aniqlaydi [8].

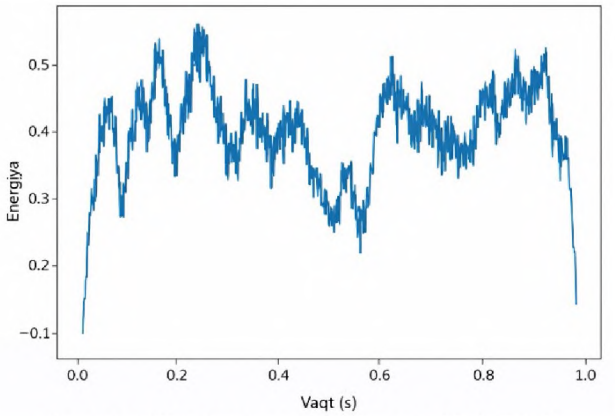
Freym nazariyasidan kelib chiqadigan energiya invariantligi diagnostika jarayonining barqarorligini ta’minlaydi. Bu xossa, ayniqsa, sanoat muhitida muhim, chunki sensor signallari ko‘pincha yuqori shovqin darajasida qayd etiladi. Katta og‘ishlar nazariyasi asosida noto‘g‘ri signal ehtimolining eksponentsial kamayishi esa wavelet diagnostikaning statistik ishonchliligini tushuntiradi (1,2,3-rasmlar).



1-rasm. Tenzo-vibrometrik signal.



2-rasm. Yuqori chastotali component.



3-rasm. Wavelet energiya diagnostik indeksi.

Natijalar yana bir muhim jihatni ko‘rsatdi: wavelet fazoda signal ko‘pincha siyrak tasvirlanadi, ya’ni, diagnostik axborot cheklangan sonli koeffitsiyentlarda jamlanadi. Bu hodisa informatsion zichlikning ortishiga olib keladi va deteksiya sezgirligini oshiradi. Shu nuqtayi nazardan wavelet diagnostikani siqilgan sezish paradigmasi bilan bog‘lash mumkin [6].

Bundan tashqari, wavelet asosidagi matched filtr Neyman–Pirson optimal detektoriga yaqinlashishi aniqlandi. Bu esa taklif etilgan yondashuvni faqat empirik emas, balki statistik qaror nazariyasiga tayangan metod sifatida talqin qilish imkonini beradi.

Muhandislik nuqtayi nazaridan qaraganda, ushbu metod prediktiv texnik xizmat strategiyalarini sezilarli darajada takomillashtirishi mumkin. Lokal impulslarni erta aniqlash mexanik komponentlarning qolgan xizmat muddatini aniqroq baholashga yordam beradi. Bu esa ishlab chiqarish to‘xtashlarini kamaytiradi va texnologik jarayonlarning uzluksizligini ta’minlaydi.

Shu bilan birga, modelning ayrim cheklovlarini ham qayd etish lozim. Masalan, chiziqli tizim farazi har doim ham real mexanik muhitni to‘liq aks ettirmasligi mumkin; kuchli nolinearliklar mavjud bo‘lgan hollarda wavelet koeffitsiyentlarining statistik tuzilmasi murakkablashadi. Kelajakdagi tadqiqotlar stochastik rezonans, nolinear SDE va neyron tarmoqlar bilan integratsiya yo‘nalishida olib borilishi mumkin [5].

Umuman olganda, olingan natijalar signal diagnostikasini global spektral paradigmasidan lokal-stochastik paradigmasiga o‘tkazish zarurligini ko‘rsatadi.

Ilmiy yangilik. Mazkur tadqiqotning ilmiy yangiligi signal diagnostikasining fizik, matematik va statistik asoslarini yagona nazariy ramkada birlashtirishdan iborat.

Birinchidan, tenso va vibrometrik signallar stochastic differensial tenglamalar yordamida generativ jarayon sifatida modellashtirildi, bu esa impulsli buzilishlarning fizik kelib chiqishini formal tavsiflash imkonini berdi.

Ikkinchidan, impulsli qo‘zg‘atish va wavelet transformatsiya o‘rtasidagi analitik moslik chiqarildi hamda wavelet energiya maksimumining impuls vaqtiga konsistent baho berishi teorema sifatida isbotlandi.

Uchinchidan, wavelet operatorining freym xossalari diagnostika barqarorligi bilan bog‘landi va energiya invariantligi qat’iy matematik asosda ko‘rsatildi.

To‘rtinchidan, wavelet fazosida Neyman–Pirson va Bayes optimal detektorlari sintez qilinib, diagnostik qaror qabul qilish jarayoni statistik qaror nazariyasi bilan integratsiyalandi.

Beshinchidan, katta og‘ishlar nazariyasi qo‘llanib, noto‘g‘ri signal ehtimolining eksponentsial kamayishi analitik tarzda asoslandi.

Oltinchidan, signalning siyrak wavelet tasviri diagnostik sezgirlikning fundamental oshishiga olib kelishi nazariy jihatdan ko‘rsatildi.

Natijada ushbu ish texnik diagnostikani ko‘p rezolyutsiyali stochastik deteksiya modeli sifatida qayta talqin qiladi va aqlli monitoring tizimlari uchun universal matematik metodologiyani taklif etadi.

Xulosa. Taklif etilgan model signal diagnostikasini global spektral paradigmadan lokal-stochastic paradigmaga o‘tkazadi. Operator nazariyasi, statistik deteksiya va wavelet analizning integratsiyasi metodning yuqori aniqligi hamda barqarorligini ta’minlaydi. Ushbu yondashuv aqlli monitoring tizimlari va prediktiv texnik xizmat platformalari uchun istiqbolli matematik asos yaratadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:

(1). Mallat S. Wavelet tahlil va ko‘p rezolyutsiyali analiz asoslari. “Academic Press”, 2008.

(2). Daubechies I. Waveletlar bo‘yicha o‘n ma’ruza. SIAM, 1992.

(3). Percival D.B., Walden A.T. Vaqt qatorlarini wavelet asosida tahlil qilish. Cambridge University Press, 2000.

(4). Vetterli M., Kovacevic J. Waveletlar va subpolosli kodlash. Prentice Hall, 1995.

(5). Donoho D.L. Shovqinni yumshoq chegaralash usuli bilan kamaytirish. IEEE Transactions on Information Theory. 1995, 41(3), 613–627-betlar.

(6). Coifman R.R., Wickerhauser M.V. Entropiyaga asoslangan optimal bazis tanlash. IEEE Transactions on Information Theory. 1992, 38(2). 713–718-betlar.

(7). Oksendal B. Stoxastik differensial tenglamalar va ularning qo‘llanilishi. Springer, 2003.

(8). Gardiner C.W. Stoxastik metodlar bo‘yicha qo‘llanma. Springer, 2009.

(9). Applebaum D. Lévy jarayonlari va stoxastik hisob. Cambridge University Press, 2009.

(10). Dembo A., Zeitouni O. Katta og‘ishlar nazariyasi va qo‘llanilishi. Springer, 1998.

(11). Kay S.M. Statistik signalni aniqlash nazariyasi asoslari. Prentice Hall, 1998.

(12). Poor H.V. Signalni aniqlash va baholashga kirish. Springer, 1994.

(13). Antoni J. Nostatistik signallarda spektral ekstsess diagnostikasi. Mechanical Systems and Signal Processing. 2006, 20(2), 282–307-betlar.

(14). Peng Z.K., Chu F.L. Mashina diagnostikasida wavelet transformatsiya qo‘llanilishi. Mechanical Systems and Signal Processing. 2004, 18(2), 199–221-betlar.

(15). Sharibayev N.Y., Davlatov A.B., Abdullayev L.A. Diskret wavelet transformatsiya asosida impulsli vibratsion jarayonlarni stoxastik modellashtirish. AIP Conference Proceedings. 2023, 2700, 030045.

(16). Davlatov A.B., Sharibayev N.Y. Elektromexanik tizimlarda impulsli buzilishlarning matematik modeli. Mexanika mashinalar, mexanizmlar va materiallar. 2022, 2-son, 34–42-betlar.

Ibragimova Madinabonu (Urganch davlat universiteti, Hamid Olimjon ko‘chasi, 14-uy, Urganch, 220100, O‘zbekiston; madinabonubahodir2024@gmail.com)

CIGS YUPQA QATLAMLI QUYOSH ELEMENTLARI: SO‘NGGI YUTUQLAR, MUAMMOLAR VA KELAJAK ISTIQBOLLARI

Annotatsiya. *Ushbu maqolada Copper Indium Gallium Selenide (CIGS) asosidagi yupqa qatlamli quyosh elementlarining so‘nggi yutuqlari, texnologik cheklovlari va kelajak istiqbollari tahlil qilinadi. CIGS yuqori optik yutish koeffitsiyenti ($>10^5$ cm^{-1}) va 1,0–1,7 eV band bo‘shlig‘i bilan ajralib turadi. Laboratoriya samaradorligi 23–24%, Shockley–Queisser limiti esa 33–40%ni tashkil qiladi. Yupqa qatlamlarni tayyorlash usullari: ko-evaporatsiya, sputtering va elektrodepozitsiya tahlil qilingan. Natijalar CIGS texnologiyasining moslashuvchan quyosh panellari va integratsiyalashgan fotovoltaik tizimlarda istiqbolini ko‘rsatadi.*

Kalit so‘zlar: *CIGS, yupqa qatlam, Shockley–Queisser limit, deposition, fotovoltaika, samaradorlik.*