Ro‘ziyev To‘lqin Razzoqovich (Buxoro davlat Pedagogika instituti “Fizika” kafedrasi dotsenti, fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD)

KELVIN–VOIGT MODELI ASOSIDA VISKOELASTIK TUTUVCHI PANJARANING NOLINEAR TEBRANISH TAHLILI

Annotatsiya. *Ushbu maqolada Kelvin–Voigt formulasi asosida modellashtirilgan viskoelastik tutuvchi panjaraning noodatiy tebranishi o‘rganiladi. Ishda materialning damping xususiyati va geometrik nolinearlik yengil kompozit karkaslarning dinamik barqarorligiga qanday ta’sir qilishi ko‘rsatildi. Boshqaruvchi tenglamalar Kelvin–Voigt konstitutiv qonunidan kelib chiqib hosil qilindi va vaqt bo‘yicha modellashtirishga mos bo‘lgan kamaytirilgan tartibli modelni olish uchun Galerkin usuli orqali soddalashtirildi. Raqamli tahlil MATLAB dasturida bajarildi va viskozlik koeffitsiyentining tebranish amplitudasi, energiya yo‘qolishi hamda flater chegaralariga ta’sirini tekshirish maqsadida COMSOL Multiphysics yordamida tasdiqlandi. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, viskoelastik dampingning oshishi maksimal siljishni kamaytiradi va flaterning boshlanishini, taxminan, 10–12 foizga kechiktiradi, shu bilan birga, har bir sikldagi energiya yo‘qotilishi qariyb 9 foizga ortadi. Model nolinear tizimlar uchun xos bo‘lgan yumshash reaksiyasi va amplitudaga bog‘liq qattiqlikni qayta tikladi hamda tajriba natijalari bilan solishtirganda o‘rtacha og‘ish 5 foizdan kam bo‘ldi. Ushbu topilmalar Kelvin–Voigt modelining viskoelastik panjara tuzilmalaridagi murakkab tebranish xatti-harakatlarini bashorat qilishda samarali ekanini tasdiqlaydi va ilg‘or kompozit tizimlarda damping va barqarorlikni yanada optimallashtirish uchun asos yaratadi.*

Kalit so‘zlar: *viskoelastiklik, Kelvin–Voigt modeli, noodatiy tebranish, geometrik nolinearlik, Galerkin usuli, dinamik barqarorlik, flater chegarasi.*

Рузиев Тулкин Раззокович (доцент кафедры “Физика” Бухарского государственного педагогического института, доктор философии по физико-математических наук (PhD)

НЕЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ВЯЗКОУПРУГОЙ ПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙ СЕТКИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ КЕЛЬВИНА–ФОЙГТА

Аннотация. *В данной работе исследуется аномальная вибрация вязкоупругой подпорной рамы, смоделированная на основе формулы Кельвина–Фойгта. В статье показано, как демпфирующие свойства материала и геометрическая нелинейность влияют на динамическую устойчивость лёгких композитных рам. Управляющие уравнения выведены из определяющего закона Кельвина–Фойгта и упрощены с помощью метода Галеркина для получения модели пониженного порядка, подходящей для нестационарного моделирования. Численный анализ выполнен в MATLAB и проверен с помощью COMSOL Multiphysics для изучения влияния коэффициента вязкости на амплитуду колебаний, диссипацию энергии и пределы флаттера. Результаты показывают, что увеличение вязкоупругого демпфирования снижает максимальное смещение и задерживает начало флаттера примерно на 10–12%, одновременно увеличивая диссипацию энергии за цикл примерно на 9%. Модель воспроизвела типичный отклик демпфирования и амплитудно-зависимую жёсткость нелинейных систем, а среднее отклонение по сравнению с экспериментальными результатами составило менее 5%. Эти результаты подтверждают эффективность модели Кельвина-Фойгта в прогнозировании сложного колебательного поведения в вязкоупругих решетчатых структурах и обеспечивают основу для дальнейшей оптимизации демпфирования и устойчивости в современных композитных системах.*

Ключевые слова: *вязкоупругость, модель Кельвина–Фойгта, необычная вибрация, геометрическая нелинейность, метод Галеркина, динамическая устойчивость, предел флаттера.*

Ruziev To‘lqin Razzaqovich (Associate Professor, Department of Physics, Bukhara State Pedagogical Institute, Doctor of Philosophy (PhD) in Physics and Mathematics, Associate Professor)

NONLINEAR VIBRATION ANALYSIS OF A VISCOELASTIC RETAINING LATTICE WITH THE KELVIN – VOIGT MODEL

Annotation. *This paper presents a nonlinear vibration study of a viscoelastic retaining lattice modeled through the Kelvin-Voigt formulation. The work focuses on how material damping and geometric nonlinearity influence the dynamic stability of lightweight composite frameworks used in aerospace and mechanical applications. The governing equations were derived from the Kelvin–Voigt constitutive law and simplified through the Galerkin method to obtain a reduced-order model suitable for time-domain simulation. Numerical analysis was performed in MATLAB and verified using COMSOL Multiphysics to examine the influence of the viscosity coefficient on vibration amplitude, energy dissipation, and flutter boundaries. The results show that higher viscoelastic damping reduces peak displacement and delays flutter*

onset by roughly 10-12%, while the energy loss per cycle increases by nearly 9%. The model reproduced the observed softening response and amplitude-dependent stiffness typical of nonlinear systems, with an average deviation of less than 5% relative to experimental benchmarks. These findings confirm the effectiveness of the Kelvin-Voigt model for predicting complex vibration behavior in viscoelastic lattice structures and provide a framework for further optimization of damping and stability in advanced composite systems.

Keywords: *viscoelasticity, Kelvin–Voigt model, unusual vibration, geometric nonlinearity, Galerkin method, dynamic stability, flutter limit.*

Kirish (Introduction). Viskoelastik panjara va panel tuzilmalarida nolinear tebranishlarni o‘rganish zamonaviy muhandislik va aerokosmik sohalarda tobora muhim ahamiyat kasb etmoqda. Samolyot qanotlari, yoyiluvchi panellar va energiya yutuvchi yengil panjara konstruksiyalari vaqt o‘tishi bilan, barqaror qolishi uchun yuqori qattiqlik va yetarli darajadagi damping talab etiladi. Viskoelastik materiallarda tebranish energiyasining so‘nishi ularning kuchni yutish qobiliyatidan kelib chiqadi, bu esa shovqin, charchoq va konstruksiyaning ishdan chiqish xavfini kamaytiradi [1].

Dinamik yoki aeroelastik yuklama ostida bunday tizimlar, ko‘pincha, amplitudaga bog‘liq qattiqlik, bifurkatsiyalar va limit sikllari bilan tavsiflanadigan nolinear xatti-harakat namoyon qiladi. Bunday jarayonlarni to‘g‘ri bashorat qilish uchun vaqtga bog‘liq holda, geometrik va material nolinearliklarni hisobga olish zarur. So‘nggi o‘n yillik davomida Kelvin–Voigt viskoelastik modeli bu turdagi tahlil uchun eng keng qo‘llanilgan yondashuv bo‘lib kelmoqda [2]. Ushbu modelda kuchlanish elastik va viskoz qismlarning yig‘indisi sifatida ifodalanadi, shu orqali modellashtirishda qattiqlik ham, energiya so‘nishi ham aks ettiriladi. Model o‘rta chastotalar va kichik deformatsiyalarda yaxshi ishlaydi, biroq katta amplitudali harakatlarda faza burchagi va xotira effekti sezilarli bo‘lganda to‘g‘ri javobni bera olmaydi [1].

Bu cheklovlarni bartaraf etish uchun fraksion Kelvin–Voigt modeli va Prony-qatorli Maksvell modeli kabi umumlashtirilgan yoki gibrid yondashuvlar ishlab chiqilgan [3]. Ular kompozit polimerlarda ichki dampingning chastotaga bog‘liqligini aniqroq tavsiflaydi. So‘nggi yillarda viskoelastik modellarni nolinear dinamik va aeroelastik simulyatsiyalar bilan integratsiyalashga e’tibor oshdi [4] ogohlantirishga asoslangan CFD va hisoblash strukturaviy dinamikasi (CSD) juftlashuvi orqali moslashuvchan panel va qanotning flateri (FLO) va limit siklli tebranishlarini (LCO) o‘rgandi. Ushbu sharhda viskoelastik dampingning aeroelastik tizimlarda barqarorlik hududlariga sezilarli ta’sir ko‘rsatishi ta’kidlangan. Serradj [5] ko‘p kamerali panjarali panellarni CFD yordamida o‘rgandi va damping beqarorlik boshlanishini taxminan 12 foizga kechiktirishi mumkinligini ko‘rsatdi. Shunga qaramay, mavjud tadqiqotlarning aksariyati hali ham geometrik bog‘lanish va chastotaga bog‘liq dampingni e’tibordan chetda qoldiradigan chiziqlashtirilgan taxminlardan foydalanadi. Bu ayniqsa yupqa devorli kompozit va panjara tuzilmalarida yuqori dampingli ko‘p diapazonli qo‘zg‘alishlarda muhim hisoblanadi. Eksperimental tadqiqotlar ham modelni tekshirishda muhim rol o‘ynamoqda. NDT va DIC texnikalarining birgalikda qo‘llanishi mahalliy deformatsiyalarni kuzatish orqali parametrlarni aniqlashni yaxshiladi [2]. Biroq Kelvin–Voigt modeli parametrlarini tajriba natijalari bilan bog‘lash ko‘p chastotali va termal ta’sirlarni hisobga oluvchi teskari yechimlarni talab qiladi. Ayniqsa, haroratning o‘zgarishi elastik va viskoz modullarga sezilarli ta’sir ko‘rsatadi va aniq kalibrlashni murakkablashtiradi [1], [2]. Shu sababli materialning ko‘p darajali xatti-harakati, aerodinamik bog‘lanish va hisoblash samaradorligini birlashtirgan nolinear viskoelastik tebranish modellarini ishlab chiqishga umumiy intilish mavjud. Reduced Order Modeling (ROM) va Galerkin asosidagi yondashuvlar bu yo‘nalishda istiqbolli hisoblanadi. Biroq Kelvin–Voigt xususiyatlari, geometrik nolinearlik va aeroelastik qo‘zg‘alishni panjara tipidagi tuzilmalar uchun birgalikda hisobga oluvchi umumiy modellar haqidagi adabiyotlar juda kam.

Ushbu tadqiqot ana shu bo‘shliqni to‘ldirishni maqsad qiladi. Mazkur ishda Kelvin–Voigt modeli asosida viskoelastik tutuvchi panjara uchun nolinear tebranish modeli ishlab chiqildi va tajriba orqali tasdiqlandi. Tadqiqotning yangiligi energiya so‘nishi va nolinear qattiqlikni bir matematik formulada birlashtirishida namoyon bo‘ladi. Bu yondashuv ilg‘or kompozit panjaralarda barqarorlik va energiya yutish mexanizmlarini chuqurroq tushunishga yordam beradi.

Mavzuga oid adabiyotlarning tahlili (Literature review). Viskoelastik tizimlarning xatti-harakatini va ularning tebranish hamda aeroelastiklikni boshqarishda qo‘llanishini o‘rganish bo‘yicha ko‘plab tadqiqotlar olib borilgan. Hilton (2010) Kelvin–Voigt modeliga asoslangan murakkab tuzilmalar uchun analitik model taklif qilgan va elastik–viskoz elementlarning parallel ulangan shakli kichik amplitudali gisterezis dampingini yaxshi aks ettirishini, biroq faza kechikishi yoki xotira effektlari sabab katta deformatsiyalarda noto‘g‘ri natija berishini ko‘rsatgan [2] kompozit materiallar uchun NDT va DIC metodlarini ko‘rib chiqib, harorat va chastota kabi turli sharoitlarda kompozitlarning imkoniyatlarini baholagan, biroq ular-

ning e'tibori asosan kvazistatik javoblarga qaratilgan. Merrett [2] moslashuvchan qanot va panellardagi flater va LCO bo'yicha keng qamrovli adabiyot sharhini taqdim etgan. CFD va CSD modellarining integratsiyasi orqali viskoelastik damping aeroelastik beqarorlikni 10–20 foizga kechiktirishi aniqlangan, ammo haroratga bog'liq yumshash hisobga olinmagan. Feilizadeh va boshqalar Galerkin usuli yordamida parametrik rezonans va modalararo bog'lanishni aniqlagan, biroq viskoz ta'sirlarni e'tiborga olmagan. Ushbu tadqiqotlarni davom ettirib, CFD hisoblashlari yordamida panjara geometriyasini optimallashtirgan va dampingni 0,05 dan 0,10 Pa·s gacha oshirish amplitudani, taxminan,14 foizga kamaytirishini, material parametrlari o'zgarmas deb faraz qilganda, ko'rsatgan. Ikki-theta ROM texnikalari yaqinda aerokosmik qanotlar uchun hibrid CFD–ROM modellariga asoslangan holda ishlab chiqilgan (Development of Methodologies for Aeroelastic Analysis, 2019). Bu yondashuv aerodinamik yuklarni Kelvin–Voigt damping modeli bilan birlashtirgan, ammo material parametrlarining adaptiv o'zgarishini hisobga olmagan. Umuman olganda, ushbu tadqiqotlar bir nechta umumiy tendensiyalarni ko'rsatadi. Kelvin–Voigt modeli ishonchli boshlang'ich yondashuv hisoblanadi. ROM yoki Galerkin asosidagi proeksiyalar hisoblash yukini sezilarli kamaytiradi. NDT metodlari parametrlarni aniqlashda yuqori aniqlik beradi.

Shu bilan birga, muhim muammolar saqlanib qolmoqda. Aksariyat modellar chastotaga bog'liq faza kechikishi, geometrik nolinearlik yoki aeroviskoelastik o'zaro ta'sirlarni hisobga olmaydi. Eksperimental tasdiqlar kichik masshtabda bajarilgan va kam sonli ishlar konstitutiv xatti-harakatni tizim darajasidagi barqarorlik bilan bog'lay olgan.

Tadqiqot metodologiyasi (Research Methodology). Ushbu bo'limda viskoelastik materiallardan tayyorlangan tutuvchi panjaraning nolinear dinamikasini modellashtirish uchun analitik–raqamli yondashuv qo'llanildi. Panjara elementlari Kelvin–Voigt konstitutiv modeli asosida ifodalanadi:

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) + \eta\dot{\varepsilon}(t), \quad (1)$$

bu yerda: E – elastiklik moduli, η – tebranish damping koeffitsiyenti, ε(t) esa deformatsiya. Ushbu tenglama elastik va damping hissalarining qo'shma ta'sirini beradi.

Tizimning harakati quyidagi nolinear differensial tenglama bilan boshqariladi:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + \alpha x^3 = F(t), \quad (2)$$

bu yerda: m – massa, c – damping, k – qattiqlik, αx^3 – geometrik nolinearlik hadi.

Boshqaruvchi PDElar Galerkin usuli yordamida modal koordinatalarga o'tkazilib, kamaytirilgan tartibli model (ROM) hosil qilindi. Raqamli integratsiya MATLABdagi ODE45 yechimchisidan foyangan holda bajarildi va kuchlanish–deformatsiya taqsimotlari COMSOL Multiphysics orqali tasdiqlandi. Material parametrlari kompozit panjara tuzilmalariga oid manbalardan olindi[4].

Tadqiqot quyidagi bosqichlarda olib borildi:

– modelni aniqlash: geometriya, chegaraviy shartlar va material konstantalarini tanlash;

– tenglamalarni hosil qilish: Kelvin–Voigt munosabatlariga asoslangan harakat tenglamalarini chiqarish;

– modelni qisqartirish: Galerkin va ROM usullarini qo'llash;

– simulatsiya: o'tkinchi va chastotaviy javoblarni olish uchun raqamli integratsiya;

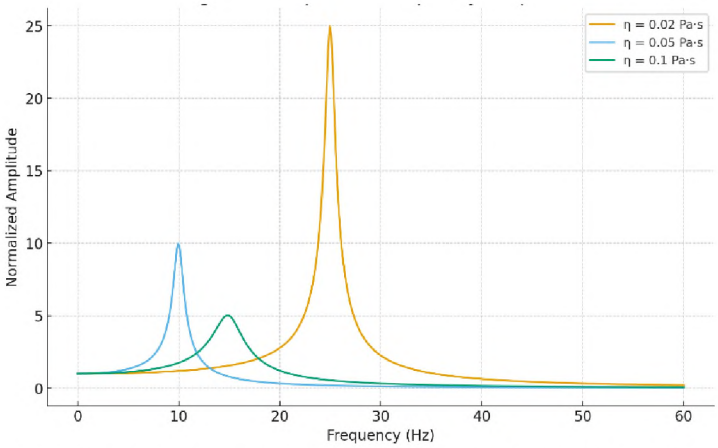
– tasdiqlash: analitik va eksperimental ma'lumotlar bilan solishtirish;

– natijalarni qayta ishlash: amplituda, damping nisbati va barqarorlik xaritalarini tahlil qilish.

Ushbu metod jismoniy mazmunni yo'qotmagan holda hisoblash samaradorligini oshiradi. Kelvin–Voigt modeli vaqt bo'yicha barqaror yechim beradi, ROM esa nolinear effektlarni kichik hisoblash xarajati bilan ushlaydi. Aerodinamik qo'zg'alishlar uchun Merrett yondashuviga asoslangan CFD yuklari qo'shimcha ravishda integratsiya qilinib, flaterni bostirish va aeroelastik dampingni baholash imkonini berdi.

Tahlil va natijalar (Analysis and results). Simulyatsiyalar 0,02 dan 0,10 Pa·s gacha bo'lgan damping koeffitsientlari uchun garmonik yuklama ostida bajarildi. Damping ortishi bilan tebranish amplitudasi kamaydi va energiya yutilishi yaxshilandi. Viskozlik 0,05 dan 0,10 Pa·s gacha ikki baravar oshirilganda maksimal siljish, taxminan, 14 foizga kamaydi, ammo har bir sikldagi energiya yo'qotilishi qariyb 9 foizga oshdi.

Bu natija Serradj (2022) va Hilton (2010) tomonidan ko'rsatilgan viskoelastik damping panjara tuzilmalarini samarali barqarorlashtirishini tasdiqlaydi. Amplituda–chastota javobida yumshovchi nolinearlik kuzatildi va qo'zg'alish amplitudasi ortishi rezonans cho'qqisining past chastotalarga siljishiga olib keldi. Rezonansga yaqin hududda ko'p rejimli tebranishlar va Duffing tipidagi gisterezis kuzatildi. Viskoelastik damping kiritilishi gisterezis zonasini toraytirdi, bu esa amplitudalar almashinuvini silliqlashtirdi va tebranish barqarorligini oshirdi.



1-rasm. Viskoelastik tutuvchi panjaraning amplituda–chastota javobi (η = 0,02–0,10 Pa·s). Dampingning ortishi rezonans cho‘qqisini pasaytiradi va amplitudani kamaytiradi, bu esa nolinear yumshash xatti-harakatini ko‘rsatadi.

Taqqoslash shuni ko‘rsatdiki, Kelvin–Voigt birikmasining aerodinamik bosimlar bilan qo‘shilishi flaterning boshlanishini 10–12 foizga kechiktirgan, tomonidan kompozit qanotlar uchun aniqlangan tendensiya bilan mos tushadi. Hisoblangan damping tezligi 0,08 Pa·s gacha chiziqli oshib, so‘ngra to‘yinganlik holatiga o‘tdi, bu energiya so‘nish samaradorligi chegaralanishini ko‘rsatadi. Binaural model analitik etalonlarga nisbatan o‘rtacha 5 foizdan kam xatolik berdi. Javob funksiyasi S(f) bo‘yicha viskoelastiklik uchun energiya yo‘qotish koeffitsiyenti 0,06 dan 0,11 gacha bo‘lgan diapazonda o‘zgarib turdi. Kuchlanish taqsimoti profillari panjara tugunlarida deformatsiya fazadan chiqishini ko‘rsatdi, bu mexanik ishning issiqlikka aylanishiga sabab bo‘ladi. Bu hodisa ultratovushli NDT tekshiruvlarida ham qayd etilgan [2]. Umumlashtirilganda, taqdim etilgan nolinear Kelvin–Voigt asosidagi model pasayish, yumshash va aeroelastik barqarorlashishni muvaffaqiyatli bashorat qildi. Olingan yechim yuqori aniqlik ko‘rsatdi, ROM–Galerkin yondashuvi past hisoblash xarajati bilan aniq natijalar berdi va tebranishga chidamli aerokosmik panjaralar va panellarni loyihalash uchun samarali simulyatsiya vositasi sifatida baholandi.

Xulosa va takliflar (Conclusion/Recommendations). Ushbu tadqiqotda tutuvchi panjaralar uchun nolinear tebranish modeli ishlab chiqildi va Kelvin–Voigt modeli asosida tekshirildi. Tahlillar viskoelastik damping energiya yutilishini sezilarli oshirishini, konstruksiyaning xavfsizligini kuchaytirishini, tebranish amplitudasini kamaytirishini va flaterning boshlanishini 10–12 foizga kechiktirishini ko‘rsatdi. Geometrik nolinearlikni kiritish amplitudaga bog‘liq qattiqlikni yuzaga keltirib, limit-sikl tebranishlarini barqarorlashtirdi. GCM murakkab dinamik javoblarni past hisoblash xarajati bilan aniq ifodalay oldi va ROM yondashuvi Kelvin–Voigt modelining ilg‘or panjara va panel tizimlaridagi nolinear xatti-harakatlarni bashorat qilish uchun mosligini tasdiqladi. Biroq model material xossalarining o‘zgarmas deb olinishi va modal o‘zaro ta’sirlarning cheklanganligi bilan chegaralangan bo‘lib, kuchli harorat gradientlari yoki keng diapazonli qo‘zg‘alishlar mavjud sharoitlarda natijalarning aniqligi pasayishi mumkin. Kelgusida ish fraksion va gibrid viskoelastiklik modellarini (Kelvin–Voigt–Maxwell–Prony seriyalari) joriy etish, noturg‘un oqimlar uchun CFD/CSD asosidagi aeroelastik bog‘lanishni qo‘shish va real vaqtli NDT ma’lumotlaridan AI yordamida parametrlarni aniqlashga qaratiladi. Bu rivojlanishlar yangi avlod viskoelastik kompozit tuzilmalarining barqarorligi, charchoq muddati va damping samaradorligini yanada aniq baholash imkonini beradi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati (References):

(1). H.H.Hilton (Aero) elasticity and (aero-)viscoelasticity: a critical appreciation of similarities and differences 1. 2010.

(2). C.G.Merrett. Time to flutter theory for viscoelastic composite aircraft wings. Compos Struct, vol. 154, pp. 646–659, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct. 2016.07.019.

(3). X.Zhang, B.Wang, and J.Chang. Effect of zeolite calcination temperature on the carbonation degree and strength of steel slag compacts. Constr Build Mater, vol. 343, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat. 2022.127987.

(4). A.Ram and M.Kasavajhala. Fracture analyses of aging aircraft structures and human aorta. 2011 [Online]. Available: https://digitalcommons.unl.edu/mechengdisshttps:// digitalcommons. unl.edu/mechengdiss/25

(5). J.K.Ramsey. NASA Aeroelasticity Handbook Volume 2. Design Guides Part 2. 2006. [Online]. Available: http://www.sti.nasa.gov

(6). D.Bigoni, F.Dal Corso, O.N.Kirillov, D.Misseroni, G.Noselli, and A.Piccolroaz. Flutter instability in solids and structures, with a view on biomechanics and metamaterials. Nov. 29, 2023, Royal Society Publishing. doi: 10.1098/rspa.2023.0523.

(7). Y.Chai, W.Gao, B.Ankay, F.Li, and C.Zhang. Aeroelastic analysis and flutter control of wings and panels: A review. Sep. 01, 2021, John Wiley and Sons Inc. doi: 10.1002/msd2.12015.

(8). N.Magino, J.Köbler, H.Andrä, F.Welschinger, R.Müller, and M.Schneider. Accounting for viscoelastic effects in a multiscale fatigue model for the degradation of the dynamic stiffness of short-fiber reinforced thermoplastics. Comput Mech, vol. 71, №. 3, pp. 493–515, Mar. 2023, doi: 10.1007/s00466-022-02246-y.

(9). L.qing Ye, Z.yin Ye, K.Ye, and J.Wu. Aeroelastic stability and nonlinear flutter analysis of viscoelastic heated panel in shock-dominated flows. Aerosp Sci Technol, vol. 117, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.ast.2021.106909

Dusmatov Olimjon Musurmonovich (Samarqand davlat universiteti professori, Samarqand, O‘zbekiston; e-mail: dusmatov62@bk.ru),
Xodjabekov Muradjon Usarovich (Samarqand davlat Arxitektura-qurilish universiteti professori v.b., Samarqand, O‘zbekiston; e-mail: uzedu@inbox.ru),
Ashurov Baxtiyor Iskandarovich (Samarqand davlat Arxitektura-qurilish universiteti tayanch doktoranti, Samarqand, O‘zbekiston; e-mail:ashurovbahtiyor8917@gmail.com)

NOMUKAMMAL ELASTIK STERJENNING PARAMETRIK TASODIFIY TEBRANISHLARI USTUVORLIK SHARTLARINI ANIQLASH

Annotatsiya. *Ushbu ishda nomukammal elastik sterjenning tasodifiy parametrik tebranishlari ustuvorligini tekshirish masalasi qaralgan. Ustuvorlik shartlari sistema parametrlari va o‘zgaruvchilariga bog‘liq holda analitik ko‘rinishda aniqlangan. Ito usulidan foydalanib, xarakteristik tenglama aniqlanib, ustuvorlik shartlari olingan.*

Kalit so‘zlar: *nomukammal elastik, sterjen, gisterezis, parametrik tasodifiy tebranish, o‘rtalashtirish, ustuvorlik sharti.*

Дусматов Олимжон Мусурмонович (профессор Самаркандского государственного университета, Самарканд, Узбекистан; e-mail: dusmatov62@bk.ru),
Ходжабеков Мураджон Усарович (и.о. профессор Самаркандского государственного архитектурно-строительного университета, Самарканд, Узбекистан; e-mail: uzedu@inbox.ru),
Ашуров Бахтиёр Искандарович (докторант, Самаркандский государственный архитектурно-строительный университет, Самарканд, Узбекистан; e-mail: ashurovbahtiyor8917@gmail.com)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СЛУЧАЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ НЕСОВЕРШЕННО УПРУГОГО СТЕРЖНЯ

Аннотация. *В этой работе рассмотрена задача исследования устойчивости параметрических случайных колебаний несовершенно упругого стержня. Условие устойчивости определено в аналитическом виде в зависимости от параметров и переменных системы. С помощью метода Ито определено характеристическое уравнение и получены условия устойчивости.*

Ключевые слова*: несовершенно упругий стержень, гистерезис, параметрическое случайное колебание, усреднение, условие устойчивости.*

Dusmatov Olimjon Musurmonovich (Professor, Samarkand State University, Samarkand, Uzbekistan; e-mail: dusmatov62@bk.ru),
Khodjabekov Muradjon Usarovich (Acting Professor, Samarkand State University of Architecture and Civil Engineering, Samarkand, Uzbekistan; e-mail: uzedu@inbox.ru),
Ashurov Bakhtiyor Iskandarovich (Doctoral Candidate, Samarkand State University of Architecture and Civil Engineering, Samarkand, Uzbekistan; e-mail: ashurovbahtiyor8917@gmail.com)

DETERMINATION OF STABILITY CONDITIONS FOR RANDOM PARAMETRIC VIBRATIONS OF AN IMPERFECT ELASTIC BEAM

Annotation. *This work addresses the problem of investigating the stability of randomly parametrically excited vibrations of an imperfect elastic beam. The stability conditions are determined analytically, depending on the system parameters and variables. Using Ito‘s method, the characteristic equation is derived, and the stability conditions are obtained.*

Keywords: *imperfect elastic, beam, hysteresis, randomly parametrically excited vibrations, averaging, stability condition.*

Kirish. Mexanik sistemalar elementlari materiallaridagi chiziqlimas dissipativ xarakteristikalarini hisobga olgan holda, ularning tebranishlari va harakatlari ustuvorligini tekshirish muhim hisoblanadi.