

DOI 10.54596/2309-6977-2021-4-141-152

ӘОЖ 681.5

ҒТАМА 77.01.85

КЕРНЕУДІҢ ЫҚТИМАЛДЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН САНДЫҚ ЕСЕПТЕУДІ АВТОМАТТАНДЫРУ

Танирбергенова А.А.¹, Берикбаева М.А.²

¹*Satbayev university, Алматы, Қазақстан Республикасы*

²*КЕАҚ «М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті», Петропавл,
Қазақстан Республикасы*

**E-mail: 1975.anar_tanir@mail.ru*

Аңдатпа

Жұмыста кездейсоқ әсерлері бар кездейсоқ параметрлері бар техникалық объектілердегі кернеулердің ықтималды сипаттамаларын анықтау мәселесін шешу кезеңдері келтірілген. Алынған нәтижелердің әрқайсысы қарастырылып отырған кездейсоқ параметрді (шығыс мәні) іске асыру ретінде қарастырылады. Әрі қарай, математикалық статистика әдістері зерттелетін параметрдің ықтималды сипаттамасын алады. Ең толық сипаттама таралу заңын анықтау болып табылады. Шешімнің әр кезеңінің есептерін автоматтандыру мүмкіндіктері қарастырылады. Осы мақсатта Matlab, ANSYS стандартты бағдарламалық кешендерін, сондай-ақ ANETR арнайы регрессиялық талдау бағдарламасын пайдалану ұсынылады. Кіші бағдарламалардың, алгоритмдердің сипаттамасы келтірілген, ANSYS компьютерін интерактивті режимде қолдана отырып, ықтималдылықты есептеуге арналған командалар көрсетілген.

Кілт сөздер: кездейсоқ шама, модельдеу, кешенді бағдарламалық қамтамасыз ету, шеткі элементтер әдістері, ықтималдық сипаттамасы, таралу заңдары, сенімділік, статикалық үлгілеу, шеткі кернеу, сандық әдістер, калыпты заң, дисперсияны таңдау.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРЯЖЕНИЯ

Танирбергенова А.А.¹, Берикбаева М.А.²

¹*Satbayev university, Алматы, Республика Казахстан*

²*НАО «Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева», Петропавловск,
Республика Казахстан*

**E-mail: 1975.anar_tanir@mail.ru*

Аннотация

В работе приведены этапы решения задач определения вероятностных характеристик напряжений в технических объектах со случайными параметрами, имеющими случайные эффекты. Каждый из полученных результатов рассматривают как реализацию рассматриваемого случайного параметра (выходной величины). Далее методами математической статистики получают вероятностное описание исследуемого параметра. Наиболее полное описание заключается в определении закона распределения. Рассматриваются возможности автоматизации задач каждого этапа решения. С этой целью рекомендуется использовать стандартные программные комплексы Matlab, ANSYS, а также специальную программу регрессионного анализа ANETR. Приведено описание подпрограмм, алгоритмов, показаны команды для расчета вероятностей с использованием компьютера ANSYS в интерактивном режиме.

Ключевые слова: случайная величина, моделирование, комплексное программное обеспечение, методы конечных элементов, вероятностная характеристика, закон распределения, надежность, статическое моделирование, предельное напряжение, численные методы, нормальный закон, выбор дисперсии.

AUTOMATION OF NUMERICAL CALCULATION
OF PROBABILISTIC VOLTAGE CHARACTERISTICSTanirbergenova A.A.¹, Berikbaeva M.A.²¹*Satbayev university, Almaty, Republic of Kazakhstan*²*Non-profit limited company "M. Kozybayev North Kazakhstan University", Petropavlovsk,
Republic of Kazakhstan***E-mail: 1975.anar_tanir@mail.ru***Abstract**

The paper presents the stages of solving the problems of determining the probabilistic characteristics of stresses in technical objects with random parameters having random effects. Each of the obtained results is considered as an implementation of the random parameter under consideration (output value). Further, by methods of mathematical statistics, a probabilistic description of the parameter under study is obtained. The most complete description is the definition of the distribution law. The possibilities of automating the tasks of each stage of the solution are considered. For this purpose, it is recommended to use standard software packages Matlab, ANSYS, as well as a special regression analysis program ANETR. The description of routines, algorithms is given, commands for calculating probabilities using the ANSYS computer in interactive mode are shown.

Key words: random variate, modeling, bundled software, sfrees, finite elements, probabilistic characteristic, distribution law, reliability, static modeling, limit voltage, numerical methods, normal law, choice of variance.

Кіріспе

Қазіргі уақытта ықтималдық әдістері мен тәсілдері инженерлік құрылымды есептеу теориясында, құрылыс механикасында кеңінен қолданылады және мүмкіндік кернеулер мен шекті күйлердің «жартылай ықтималдылық» әдісі бойынша есептеулерді біртіндеп ауыстыруда. Көптеген елдердің құрылыс құрылымдарын жобалау нормалары осы әдістерге негізделген. Бұл әдіспен жүйенің істен шығуы кездейсоқ жағдай немесе оқиға ретінде, ал сенімділік қызмет жасау уақыты ішінде жұмыс істемеу ықтималдығы ретінде түсіндіріледі. Жалпы жағдай кезінде жүйенің сенімділігі уақыт аралығына байланысты болады, яғни жүйенің жүктемелері мен қасиеттері уақыт өте айтарлықтай өзгермесе, сенімділікті талдауды статикалық үлгілеулермен жүргізуге тура келеді.

Маңызды мәселе ретінде жүйенің параметрлеріндегі кездейсоқ өзгерістермен және кездейсоқ жүктемелермен құрылымдардың сенімділігін бағалау. Ол шекті мәннің кездейсоқ шамасы болып табылатын есептелген кернеуге қол жеткізу ықтималдығын табудан басталады. Бұл ықтималдылықты есептеу үшін есептелген және шекті кернеудің ықтималдық сипаттамаларын білу қажет.

Алғаш рет Н.Ф. Хоциалов пен М.М. Майердің еңбектерінде беріктік сенімділігі мәселелері қойылды. Мұнда алғаш рет қор коэффициенті және мүмкіндік кернеу тұжырымдамасы сынға алынды. Соғыстан кейінгі жылдары бұл жұмыстар КСРО-да және шетелде жалғасты. Бұл кезеңге А.Р. Ржаницын, А. Фрейденталь, А. Джонсон, Н.С. Стрелецкий, С.В. Серенсен, В.В. Болотиннің жұмыстары кіреді. Қазіргі уақытта осы бағыттағы зерттеулер жинақталған бірқатар монографиялар шығарылды [1÷4].

Шектік кернеудің ықтималды сипаттамалары материалдарды сынақ жүргізу арқылы, ал жұмыс жасап тұрған кернеудің ықтималды сипаттамалары аналитикалық тәсілдер немесе сандық есептеулермен анықталады. Бірақ, аналитикалық есептеуге мүмкіншілік беретін есептеу аумағы кернеудің жүйедегі шамаларына (параметрлеріне) аналитикалық тәуелділігін алу күрделене түседі, сонымен ықтималдық тығыздығын ықшамдаудан болатын қиындықтардан шектеулі жағдайда болады, яғни осы жұмыстың

мақсаты кернеулердің ықтималды сипаттамаларын есептеудің сандық әдістерін дамыту және жете зерттеу болып табылады.

Сандық тәсілдер мен әдістерді кернеулердің ықтималды сипаттамаларын сандық анықтау үшін статистикалық модельдеу әдісі қолданылады (Монте – Карло). Бұл кездейсоқ сандар қатарынан тәуелсіз айнымалылардың мәнін таңдаудан тұрады, содан кейін олар бар функционалды тәуелділікке сәйкес түрлендіріледі. Алынған нәтижелердің әрқайсысы қарастырылып отырған кездейсоқ параметрді (шығыс шамасы) тарату ретінде қарастырылады. Әрі қарай, математикалық статистика әдістерімен зерттелетін параметрдің ықтималды сипатты алынады. Ең толық сипаттама таралу заңын анықтау болып табылады.

Зерттеу әдістемесі. Кездейсоқ шаманы және кездейсоқ үлгіні модельдеу

Сенімділік есептерін сандық шешкенде берілген таралу функциялары бар кездейсоқ шамаларды модельдеу, сондай-ақ кездейсоқ үлгінің таралу заңына негізделгенін анықтау қажет болады. Соңғы есеп кездейсоқ шамаларды өлшеу нәтижелерін өңдеуде де өзекті.

Кездейсоқ шамаларды енгізу үшін қазіргі заманауи компьютерлерде кездейсоқ сан генераторы бар. Оған жүгінген кезде ол кездейсоқ r санды береді, ол $[0;1]$ аралықта біркелкі таралады. Датчиктерде кездейсоқ сандар бар i оның таралу функциялары $F(x)$ бар кездейсоқ шамасын жүзеге асыруға түрлендіріледі, яғни кері функция тәселдері пайдаланылады: $x_r = F^{-1}(r)$.

Кездейсоқ сандар қалыпты заңмен таралған, олар қалыпты таралуда кері функцияны таба алмауына байланысты бұл тәсілмен алу мүмкін емес. Бұл жағдайда кездейсоқ шамалардың көп санының қосындысы қалыпты заңға жақсы жақындататыны белгілі. 12 кездейсоқ шаманы алып, аламыз

$$x = m + \sigma \left(\sum_{i=1}^{12} r_i - 6 \right)$$

мұнда m, σ - математикалық күту және тарату стандарты. $m=0$ және $\sigma=1$ болғанда мөлшерленген қалыпты үлестіруді аламыз. Ол арқылы логарифмдік қалыпты үлестіруді және бірқатар күрделі үлестірулерді модельдеуге болады.

Қазіргі уақытта көптеген әйгілі бағдарламалық комплекстерде барлық белгілі үлестірулерді генерациялайтын блоктары бар. Сонымен, *Matlab* бағдарламалық комплексінде қалыпты үлестірімді модельдеу үшін *randn(m, sigma)* командасы бар; логарифмдік қалыпты үлестіру үшін – *lognrnd*; гамма – таралу үшін *gamrnd*; «хи-квадрат» таралудың үшін - *chi2rnd* және т.б.

Кездейсоқ нәтижелері бар кез-келген эксперименттің маңызды кезеңдерінің бірі шығыс шамасының таралу заңын анықтау. Эксперимент нәтижелері көлемді n кездейсоқ таңдау түрінде ұсынылып алынады, сонымен бірге таңдау бойынша дисперсиялар мен орташа шама мәндері анықталады. Таралу заңдарын ұлғайту бойынша орналастырғаннан кейін вариация қатарын аламыз, таңдауда үлкен көлемімен оның элементтері санаттарға біріктіріледі және гистограмма жасалады. Гистограмманы таралу тығыздығын бағалау ретінде қолданылады.

Таралу тығыздығына жуық аналитикалық өрнектерді алу үшін гистограмма тегістеліп эксперименттік қисыққа ауыстырылады. Бұл қисықтың түрі бойынша оның белгілі теориялық таралуға сәйкестігі туралы статистикалық гипотеза алға тартылды.

Тапсырма таңдалған таралу немесе үлестіру параметрлерін анықтауға қосылады, мұнда ең кіші квадраттар тәсілі кеңінен қолданылады. Сонымен оларды арнайы [4] формулаларымен анықтайды, яғни үлгінің орташа мәні мен таңдау дисперсиясын бағалау нәтижелері арқылы. Бұнда теория қисығына орта теңдікпен теория кезіндегі және эксперименттік қисықтың дисперсиясы түрінде екі қосымша байланыстар қосылады, әрі қарай таңдау қарастырылып отырған таралу заңына сәйкестігі туралы гипотеза Пирсон келісімі критерийі бойынша тексеріледі.

Көптеген заманауи бағдарламалық жасақтама кешендерінде гистограммаларды құруға, таңдау бойынша теориялық таралу қисығының параметрлерін анықтауға және статистикалық гипотезаларды тексеруге мүмкіндік беретін құралдары бар. Бұл сілтемеге *Matlab* жүйесінде көрсетеміз.

Деректерді талдаудың қарапайым процедураларын орындауды қамтамасыз ететін функциялар *Matlab* ядросының құрамына кіреді (*data fun* бөлімі). Бұл *M* – функциялары *statistics toolbox* қосымшасына кіреді.

Таңдаудың дисперсиясы мен орташасын анықтауда *M* – функцияларын қолдануға болады:

$$M = \text{sum}(x) / n \text{ немесе } M = \text{mean}(x)$$

Гистограмма құруда екі команда қолданылады

$$m = \text{hist}(x, k) \text{ және } \text{bar}(m ./ \text{length}(x))$$

Алдыңғысы таңдаудың мәндерінің барлық диапазонын *k* интервалдарға бөледі (көбінесе 10) және матрицаға әр *m* интервалға түскен элементтер санын жазады. Екінші команданы қолдана отырып, әр интервалға түсетін салыстырмалы жиілігі есептеледі және алынған гистограмманың графикалық көрінісі көрсетіледі. Үлгінің статистикалық сипаттамаларын графикалық түсіндіруді *barplot(x)* функциясы арқылы алуға болады.

Салынған гистограммаға ең жақын стандартты үлестірімдердің бірін таңдау үшін *disttool* командасын қолданған жөн.

Оны орындау кезінде стандартты таралу параметрлерін таңдауды қамтамасыз ететін диалогтық терезе ашылады (1-сурет).

Терезеде келесі элементтер бар:

- таңдалған таралу функциясының (*cdf*) графигінің шығыс өрісі немесе ықтималдылықты бөлудің тиісті тығыздығы (*pdf*); өрісте координаттар мәндерін дәл анықтауды қамтамасыз ететін нысан көрсетіледі;

- тарату функциясын таңдау үшін ашылмалы мәзір;

- функция түрін таңдауға арналған ашылмалы мәзір (*cdf* ↔ *pdf*);

- тарату параметрлерінің мәндерін өзгертуге арналған жүгірткі реттегіштері (реттегіштер саны және олардың белгіленуі тарату түріне байланысты өзгереді);

- көрсету терезесі/графикалық нүктелер мен тарату параметрлерінің координаталық мәндерін енгізу.

Таралудың қолайлы түрін табу үшін *pdf* графигінің түрін белгілеу керек және әртүрлі таралулардың ерекшеліктері туралы өз біліміңізді қолдана отырып, олардың ішінен, сіздің ойыңызша, эксперименттік мәліметтерге сәйкес құрылған салыстырмалы жиіліктердің гистограммасына ұқсас біреуін таңдау керек, жүгірткі реттегіштерін қолдана отырып, тарату параметрлерін сақтау керек.

Таңдалған таралу заңының графигі көрсетіледі, ол тәжірибелік қисық нүктелер түрінде көрсетілген гистограмма түрімен салыстырылады, егер бұл кестелер өте өзгеше болса, онда олар басқа заңды таңдап, процедураларды қайталайды. Салыстырудың қанағаттанарлық нәтижесімен тиісті статистикалық гипотезаны тексеруге көшуге болады.

Қолайлы таралуды таңдауды жеңілдету үшін теориялық қисыққа тәжірибелік нүктелер қоюға мүмкіндік беретін *cftool* пәрменін қолдана аласыз. Қалыпты заңды тексеру үшін *normplot(x)* M – функциясын қолдануға болады.

Эксперименттік мәліметтер осындай теориялық тарату заңына бағынады деген гипотезаны *Hypothesis Tests M* – функциясын қолдана отырып тексеруге болады, сонымен *stest* функциясы эксперименттік деректерді таратуда қалыпты заң туралы гипотезаны тексеруді қамтамасыз ете алады.

Гипотезаны пакеттік режимде тексеруде (2) формуласы бойынша критерийді χ^2 есептеуде кездейсоқ шаманың i – інші интервалға енуінің теориялық ықтималдығын анықтау қажет, ол *Probability Distributions M* – функциясын қолдану арқылы есептеледі.

Сонымен, логорифімді қалыпты таралу үшін

$$P(i) = \log ncdf(x_{(i+1)}, m, s) - \log ncdf(x_{(i)}, m, s)$$

мұнда m, s – тарлу параметрлері.

Шекті мәнді χ^2_α пәрмен арқылы *chi2inv(1 - α , r)* есептеледі, мұнда r - еркіндік дәрежесі; α - маңыздылық деңгейі (дұрыс гипотезаны қабылдамау ықтималдығы).

Зерттеу нәтижесі. Шеткі элементтер арқылы кернеуді анықтау

Егер есептеу кернеуінің кездейсоқ аргументтерге аналитикалық тәуелділігі белгілі болса, онда кернеудің ықтималдық сипаттамалары аргументтердің ықтималдық тығыздығының түрлендірілуімен анықталады. Бірнеше кездейсоқ шамаларда бұл түрлендірілу ықтималдық тығыздығының көбейтіндісін бірнеше айнымалыға біріктіруді қамтиды, бұл есеп кездейсоқ шамалар арасында статистикалық байланыс болған кезде күрделене түседі. Бұл тәсілді кернеу кездейсоқ аргументтерден тұратын күрделі функция болған кезде жүзеге асырылуы қиын, кейде кері функцияны табу мүмкін еместігіне байланысты мүмкін емес. Мұндай жағдайларда сандық есептеуді нысанның математикалық моделі ретінде кернеу үшін аналитикалық өрнекті қабылдай отырып, есепті имитациялық модельдеу арқылы жасайды.

Кейде кернеу үшін аналитикалық өрнек алу мүмкін емес және есеп сандық әдіспен шешіледі. Компьютерлік технологияның қарқынды дамуына байланысты жақында деформацияланатын қатты дененің механикасы есептерін шешудің сандық әдістерінің рөлі артып келеді. Олардың ішінде ең көп қолданылатыны шеткі элементтер әдісі (ШЭӘ).

Қазіргі уақытта шеткі элементтер әдістерін есептеуді автоматтандыру үшін шеткі элементтерді талдаудың көптеген бағдарламалары орындалған, олардың арасында сөзсіз бірінші орында *ANSYS* бағдарламалық комплексі, ұқсас пакеттерге қарағанда бірқатар артықшылықтарға ие.

Бағдарламалық кешенде графикалық қолданушы интерфейсі арқылы интерактивті режимде, командалық режимде де жұмыс жасай алады.

ANSYS-тегі кез-келген есепті шешуді келесі кезеңдерге бөлеміз:

- шеткі элементтер үлгілерін құру;

- жүктемелерді орнату және есептеуді орындау;
- нәтижелерді өңдеуден кейінгі постпроцессорлық өңдеу.

Әр кезенді орындау үшін өзінің процессоры қолданылады. *PREP7* негізгі процессоры ақырлы шеткі элементтердің түрлерін, олардың тұрақтыларын, материалдық қасиеттерін және модель геометриясын анықтауға арналған. *ANSYS* соңғы элементтер жиынтығында 100 – ден астам элементтер бар, сонымен бірге *ANSYS* материалдардың сызықты, сызықты емес және анизотропты қасиеттерін сандар мен мәндер, кестелер немесе матрицалар түрінде орнатады.

Нысанның геометриялық және тор үлгісін ажырату керек, *ANSYS* препроцессоры сізге геометриялық үлгілерді импорттауға және жасауға да мүмкіндік береді. Біріншіден, үлгі *AutoCAD* сияқты, кез – келген *CAD* жүйесінде жасалады, содан кейін ол *ANSYS*-ке ауыстырылады, пайдаланушы осы геометриялық үлгіні одан әрі реттейді және оған тор қолданады. Екіншіден, үлгі қатты денені модельдеу немесе модельдің тікелей генерациялауы жасалады.

Шеткі элементтердің торы соңғы элементтің түрі мен өлшемін көрсеткеннен кейін геометриялық үлгіде автоматты түрде қолданылады, оны тор түйіндерін тікелей құру арқылы алуға болады. *ANSYS* тордың жоғары кернеу градиентті жерлерінде қалыңдатып көрсетеді.

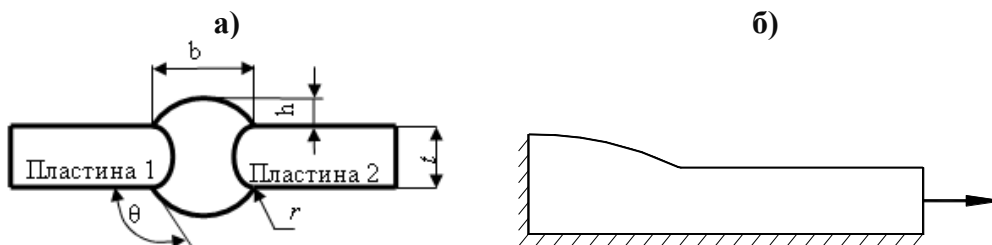
SOLUTION шешімді процессоры талдауды таңдап ауға, оның параметрлерін анықтауда, жүктемелерді қолдануға, жүктеменің қадамын таңдауға және шешімді бастауға арналған опцияларды анықтауға жұмыс жасайды, сонымен бірге кернеулі деформацияланған күйді анықтау кезінде *Static Analysis* талдау түрін міндетті түрде көрсету қажет. Оның нұсқалары: теңдеулердің шешуші жүйесін шешу әдісін таңдау; шешім параметрлерін анықтау (сызықты емес есептер үшін); нәтижелерді файлға жазу параметрлерін орнату және т.б. *ANSYS* – тегі жүктемелер бойынша шекаралық шарттардың барлық түрлерін түсіну керек.

Осыдан кейін есептеу іске қосылады. *SOLVE* командасы бойынша бағдарлама үлгі және жүктемелер туралы ақпарат алады және дерекқорға жүгінеді, сонымен бірге толық есептеулер жүргізеді, нәтижелер арнайы файлдарға және дерекқорға жазылап алынады. *ANSYS* – тегі есептеулер негізгі постпроцессорында *POST1* алынған нәтижелерді қараумен аяқталады. Нәтижелерді мәтіндік жазба мен графикалық түрде көруге болады және кернеулі деформацияланған жағдайды анықтау үшін негізгі командаларды анықтама [5] қарауға болады.

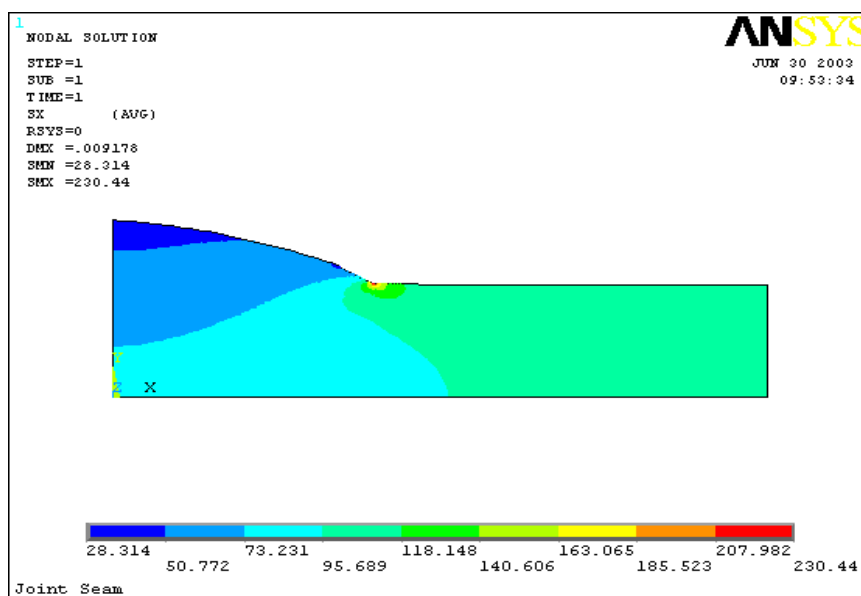
Түйістіріліп дәнекерленген жіктегі кернеулі деформацияланған күйді *ANSYS* бағдарламалық комплексін қолданып анықтау мысалын қарастырамыз (1-сурет, а)). Азлегіріленген болаттан жасалған түйістірілген жік өлшемдері [6] жұмыста келтірілген: $b = 16\text{ мм}$, $h = 2,3\text{ мм}$, $r = 0,5\text{ мм}$, $\theta = 137^\circ$. Шеткі жағындағы жиектері бойымен созылу кернеуі $s = 100\text{ МПа}$ пластинаға орнатылған. Құрылғының екі симметриялы остері болғандықтан нысанның төрттен бір бөлігін ғана қарастырамыз (1-сурет, б)), үлгінің төменгі сол жақ бұрышына координата басын орналастыру арқылы. Олар нөлге тең болады, егер координата осьтерінде орналастырғанан кейін, нүктелердің орын ауыстыруының симметриясына қарай орнатылса.

ANSYS – те есептеу интерактивті режимдерде жүргізілді және шеткі элементтер үлгісін алу үшін торларды тікелей генерациялау тәсілі қолданылды. Шеткі элементтер ретінде *Plane82* екінші реттегі, сипатталатын өлшемі $0,2\text{ мм}$ жалпақ төртбұрышты сегіз бұрышты элемент алынады, ол бұралатын R радиусы бар пластинамен түйістіріліп

дәнекерлеген жіктің орны кернеу шоғырланған жері болып алынады. Бұл аймақт $0,05$ және $0,1$ мм өлшемді кіші элементтерге бөлінеді.



Сурет 1. Түйістіріліп дәнекерленген қосылыс схемасы (а) және нысанның (объектінің) есептік моделі (б).



Сурет 2. Түйістіріліп дәнекерленген қосылыстың кернеуінің таралу түрі

Есептеулерде (10806 нүкте) 230 МПа тең ең үлкен кернеулер шоғырланған кернеу аймағында туындайды, ал $2,3$ – кернеудің шоғырлану концентрациясының коэффициенті. Бұл талдау файлына *Probabilis* атауы берілген және осы атпен олықтималдықты есептеу үшін одан әрі қолданылады.

Регрессиялық тәуелділіктерді шығару. Сандық есептеу әдістерінің жалпы кемшілігі есептелген шаманы басқару тұрғысынан түпкілікті нәтижелерді талдаудың қиындығы. Жоспар шешімінде тиімділендіру есеперін және құрылым элементтерінің беріктігі мен сенімділігін қамтамасыз ету үшін инженерлік шешімдер қабылдау тұрғысынан кіріс параметрлерінің шығыс шамасына аналитикалық тәуелділікке ие болғаны дұрыс.

Әрі қарай, әртүрлі параметрлердің әртүрлі комбинацияларында көп факторлы машиналық эксперимент жүргізу керек. Сонымен кездейсоқ факторларда тең деңгейлердің бірдей мәні таңдалады, осы тәжірибені сынауда экспериментті тиімді жоспарлауды қолдану керек.

($k > 4$) жағдайындағы көптеген факторлармен сандық матрицаларды қолдану эксперимент жоспарын алу үшін тиімді болады. Матрицадағы жолдар саны

эксперименттер санына тең, ал бағандар саны әсер етуші факторлар санына тең болуы керек. Әр жолдағы сандардың тіркесімі – бұл тиісті тәжірибедегі факторлар деңгейінің тіркесімі. Тиімділік жоспарлар ортогональды латын квадраттарының негізінде алынады. Мұндай жоспарларды құру әдістемесі егжей-тегжейлі сипатталған. Бұл жағдайда тәжірибелер саны факторлардың өзгеру деңгейлері санының квадратына тең.

Машина экспериментінің нәтижелері негізінде шығыс параметрінің әртүрлі факторларға регрессиондық тәуелділіктері құрылады. Тәуелділікті белгілі дәрежеде полиномы түрінде алу үшін дәстүрлі регрессиондық талдау ұсынады және коэффициенттері сызықты теңдеулер жүйесінің шешімі болады, ал жұмыс нәтижесінде он бес теңдеудің ішінен жеке (жұптасқан) тәуелділіктерді таңдаудан тұратын регрессиондық талдаудың дәстүрлі емес тәсілін қолдану ұсынылады. Функциялардың бірқалыпты өзгеруінде көбінесе физикалық құбылыстардың біразын жеткілікті дәлдікпен сипаттайды. Дәстүрлі емес әдіс ANETR бағдарламасында іске асырылған [5].

Аргументтердің аздығымен ($k \leq 4$) жеке тәуелділіктер айқын көрінеді, сондықтан шығу функциясының жеке байланыстарын анықтағаннан кейін, әр аргументпен олардың көбейтіндісі немесе қосындысы түрінде көп өлшемді модель жасалады

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) = \frac{f_1(x_1) \cdot f_2(x_2) \cdot \dots \cdot f_m(x_m)}{\bar{y} \cdot (m-1)} \text{ немесе } y = \sum_{i=1}^m f(x_i) - \bar{y} \cdot (m-1),$$

мұнда \bar{y} – функцияның орташа мәні.

Факторлардың едәуір мөлшерімен жеке байланыстарды анықтау күшті әсердегі факторлардың пайда болу функциясына – олардың әсерін бейтараптандыруға әсер етуді алдын-ала және дәйекті түрде алып тастауды қажет етеді. Күшті факторды бейтараптандырғаннан кейін әсер ету дәрежесі бойынша келесі фактордың жаңа функциясымен байланысы айқын көрінеді. Сонымен осылай барлық факторлар таусылғанға дейін. Алғашқы мәндерді жеке байланысатын теңдеуге бөлу немесе аталмыш теңдеуді алу арқылы бейтараптандыру жүзеге асырылады, бұл жағдайда шеткі үлгі сәйкесінше дербес теңдеулер көбейтіндісімен немесе қосындысымен өрнектеледі

$$y = f_1(x_1) \cdot f_2(x_2) \cdot \dots \cdot f_m(x_m) \text{ немесе } y = \sum_{i=1}^m f_i(x_i)$$

Аралас тәсіл бейтараптандыруға жатады, ол осы тәуелділіктерді біріктіреді.

Жалпы модельдің жеткіліктілігі шығыс шамасының есептік және эксперименттік мәндерінің стандартымен, сондай-ақ модельдің бірнеше корреляциялы коэффициентімен бағаланады.

Бұл әдіс түйістіріліп дәнекерленген қосылыстардағы кернеу концентрациясының коэффициентінің дәнекерлеу параметрлері мен пластинаның қалыңдығына тәуелділігін алу үшін қолданылады. Бұл есеп жоғарыда ANSYS БК қолдана отырып, шеткі элементтер әдісімен шешілді.

Енді өзгермелі параметрлерді келесі шектерде бес теңтұрған теңдеулерінде өзгертеміз:

$$r = (0,2 \div 5) \text{ мм}; \quad \theta_1 = 108 - \theta = (20 \div 60)^0; \quad B = 2b = (8 \div 40) \text{ мм} \\ n = (2 \div 10) \text{ мм}; \quad T = 2t = (4 \div 40) \text{ мм}.$$

Алынған нәтижелерді ANETR бойынша өңдегеннен кейін келесі регрессиялық тәуелділік алынды:

$$K_{\sigma} = f_1(r) + f_2(\theta_1) + f_3(B) + f_4(T) + f_5(h)$$

онда $f_1(r) = 3,00R^{-0.1719} - 0,806$; $f_2(\theta_1) = 1,23\theta^{0.39} - 0,983$,

θ – радиан бойынша;

$$f_3(B) = 6,24 \cdot 10^{-4} B^2 - 4,12 \cdot 10^{-2} B + 0,569; \quad f_4(T) = 0,2418 - 3,62T$$

$$f_5(h) = 0,14H^{0.367} - 0,318$$

Есептеу осы формула бойынша $K_{\sigma} = 2,39$ алдыңғы мысалмен ($K_{\sigma} = 2,3$) алынған нәтижеден 3,9% - ға ерекшеленетінін байқаймыз, яғни үлгінің жақсы дәлдігін айқындап көрсетеді. Алынған тәуелділік нәтижесін зерттелетін құбылыстың математикалық үлгісін статистикалық үлгілеу ретінде қолданылады

Бағдарлама кешені ansys негізінде ықтималды есептеу

Matlab стандартты бағдарламалық кешендер көмегімен кернеулер мен кіру кездейсоқ шамалары арасында аналитикалық байланыс болған жағдайда ықтималдылықты есептеу жүргізілуі мүмкін. Кернеу шеткі элементтер тәсілімен анықталса, ықтималдылықты есептеу *ANSYS* бағдарламалық кешені көмегімен жақсы орындалады, бұл жағдайда кернеулерді іріктеп жинау кездейсоқ кіру арқылы ұқсас элементтік талдау нәтижесінде қалыптасады.

ANSYS – та *PDS* атты процессорын қолдану арқылы ықтималдылықты есептеу ұсынылады және есептеу процедурасы төмендегі келесі кезеңдерден тұрады:

1. Талдау файлдарын циклдарда қолдану үшін құру керек және файлда келесілер болуы керек: параметрлі (*PREP7*) модель құру; (*SOLUTION*) шешім қабылдау жүйесі; нәтижелерді шығару жолы мен оларды кездейсоқ шығу параметрлері (*POST1*) ретінде тағайындау қажет.

2. Деректер жазу базасында *ANSYS* талдау файлына қолданылатын параметрлерге сәйкес параметрлерді анықтау.

3. *PDS*-ге кіру және талдау файлын көрсету (*PDS*).

4. Кездейсоқ кіріс айнымалыларын жариялау және қажет болған жағдайда оларды визуализациялау (*PDS*).

5. Кіріс айнымалылары (*PDS*) арасындағы қатынасты көрсету.

6. Кездейсоқ шығу параметрлерін көрсету (*PDS*).

7. Ықтималдылықты есептеу түрін таңдау (*PDS*).

8. Циклдер орындалады, оларда ықтималдылық есептеледі (*PDS*).

9. (*PDS*) жауап бетін таңдау түрі.

10. (*PDS*) ықтималдылықты талдау нәтижелерін қарау.

Талдау тізбегін толығымен қамтитын талдау файлы бұл *ANSYS* –тің кіру файлы. Онда параметрлік анықталған модель, барлық кірістер мен шығулар болуы керек. Талдау файлынан автоматты түрде ықтималдық есептеулерінің циклдік файлы жасалады.

Кездейсоқ кіріс айнымалыларын құру үшін *ANSYS* кітапханасында кездейсоқ шамалардың таралуының ең көп таралған заңдары бар.

Мысал ретінде түйістіріліп дәнекерленген қосылыстардағы кернеудің шоғырлану коэффициентінің ықтималды сипаттамаларын анықтаймыз (сурет. 1). Кездейсоқ кіріс айнымалыларының ықтималды сипаттамаларын қабылдаймыз: жіктің өлшемдері $m = 0,5\text{мм}$, $\sigma = 0,15\text{мм}$, $r_{\min} = 0,1\text{мм}$, $r_{\max} = 1\text{мм}$.

Алдында жасалған *Probabilistis* шеткі элементтік талдау файлын ендігі талдау файлы ретінде қолданамыз және үлгінің өлшемдері кездейсоқ шамалар болғандықтан негізгі нүктелердің координаталары кездейсоқ шамаларды енгізу арқылы көрсетілуі керек. Әр жүгіріс кезінде жаңа шеткі элемент моделі жасалады. Торды тікелей құру кезінде негізгі нүктелердің нөмірлері өзгермейді.

Интерактивті ықтималдылықты есептеу үшін командалар тізбегін көрсетеміз.

1. Талдау файлын жұмыс каталогына орналастырамыз:

Main Menu → *Prob Design* → *Analysis* → *Assign; Browse* арқылы *Probabilistic* талдау файлын көрсететін терезе ашылады. *txt* → ОК.

2. ANSYS дерекқорында талдау файлы жұмыс істейтін параметрлерді орнатамыз.

2.1 Кіріс айнымалыларын енгізу:

Utility Menu → *Parameters* → *Scalar Parameters*; содан кейін барлық айнымалылардың орташа мәндерін енгіземіз.

2.2 Шығыс айнымалысын енгізу:

Menju ju Utiliti → *Parameters* → *Cet Scalar Datd*; әрі қарай кернеу компоненті, түйіннің нөмірі және шығу айнымалысының атауы көрсетіледі.

3. Кіру кездейсоқ параметрлерін орнату:

Menju Main → *Prob Design* → *Prob Definitns* → *Randan Input*; кейін мәзірден тарату түрі таңдалынады, сонымен бірге параметрлері көрсетіледі.

4. Көрсетеміз шығу параметрін:

Menju Main → *Prob Design* → *Prob Definitns* → *Randan Output*;

5. Монте – Карло әдісінің *Hypercube* нұсқасы ықтималдылықты есептеу тәсілін таңдауды үлгілеу әдісі ретінде таңдалынады:

Menju Main → *Prob Design* → *Prob Method* → *Monte Carlo Sims*; жүгіріс сандары ($n = 250$) опциялар ретінде көрсетіледі.

6. Ықтималдық есептеулері:

Menju Main → *Prob Design* → *Pum* → *Exec Serial* → *Rum Seria*;

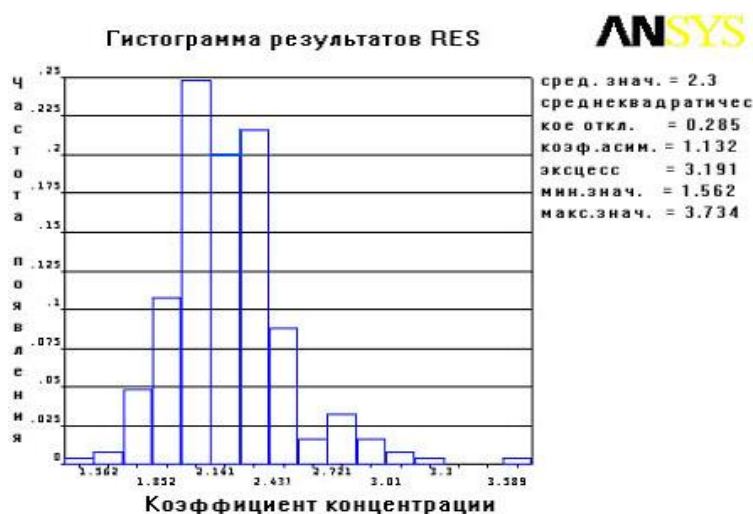
Нәтижелер статистикалық кесте, гистограмма, таралу функциясының графигі және кіру және шығу шамалары арасындағы корреляция коэффициенттерінің кестесі түрінде Монте – Карло тәсілімен есептеу аяқталғаннан кейін автоматты түрде қалыптастырылады. Соңында есептеу нәтижелері 1 және 2 кестелерде және 3 және 4 суреттерде көрсетіледі.

Кесте 1. Кездейсоқ шығу параметрлерінің статистикасы

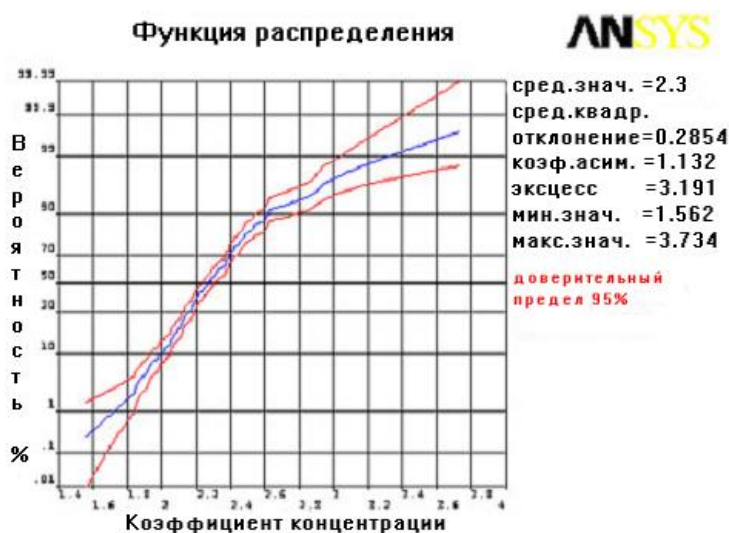
Атауы	Орташа мәні	СКО	Асимметриялық коэффициент	Экссесс	Ең аз шама	Ең үлкен шама
Шоғырлану коэффициенті	2,3021	0,28542	1,1321	3,1911	1,5621	3,7342

Кесте 2. Кіру және шығу арасындағы корреляция коэффициенттері

Кіру / Шығу	Ені	Биіктігі	Қалыңдығы	Ауысу бұрышы	Юнг Модулі	Кернеу радиусы
Шоғырлану коэффициенті	-0,1101	0,1291	0,4032	0,3582	- 0,0011	- 0,5991



Сурет 3. Гистограмма шығу параметріне байланысты



Сурет 4. Бөлу функциясы шығу параметріне байланысты

4-суретте сенімділік деңгейімен алынған кернеулердің шоғырлану коэффициенті мәндерінің таралуының жоғарғы және төменгі шегін сипаттайтын қисықтар көрсетілген, олар 95%.

Қортынды

Жоғарыда келтірілген нәтижелерде кездейсоқ әсерлері мен параметрлері бар техникалық нысандарда кернеулердің ықтималдық сипаттамаларын анықтау мәселелерін шешудің барлық кезеңдерін толығымен автоматтандыруға болады және осы мәселеде стандартты бағдарламалық кешендерді пайдалану ұсынылады. Егер кернеудің жүйе параметрлерінде аналитикалық тәуелділігі алдын-ала анықталса мәселені *Matlab* бағдарламалық кешенінде статистикалық үлгілеу арқылы шешуге болады. Жүйе параметрлерінен кернеу тәжірибелі немесе санды еептелсе функционалды тәуелділікті алу үшін *ANETR* арнайы регрессиялық талдау бағдарламасын пайдалану ұсынылады. Ал егер кернеу мен жүйе параметрлері арасындағы байланыс белгісіз болса *ANSYS* бағдарламалық комплексін қолдану керек, ол шеткі элементтер әдісімен кернеуді табуға және арнайы (*PDS*) процессордың көмегімен циклде статистикалық үлгілеу әдісімен

ықтималды есептеуді жүргізеді. Керек болған жағдайда бұл кешенге есептеудің әрбір сатыларында авторлық бағдарламалар қосуға болады.

Есептеудің тиімділігін арттыруда осы бағдарламалық кешендерді біріктіру қарастырылады және нысандардағы есептелген кернеуді *ANSYS* бағдарламалық кешенін қолдана отырып анықтаймыз. Бірнеше сынау немесе машиналық тәжірибе жүргіземіз және оны *ANETR* бағдарламасының көмегімен өңдейміз, ал алынған регрессиялық тәуелділікті *Matlab* бағдарламалық комплексінде үлгілеу кезінде объектінің математикалық моделі ретінде қолданамыз.

Жұмыста кернеулердің ықтималды сипаттамаларын анықтау кезеңдері, командалар көрсетілген және жеке кезеңдерді іске асырудың бағдарламалары сипатталған, яғни *ANSYS* бағдарламалық комплексі арқылы ықтималды есептеуді жүргізуге арналған дәйектілік пен командалар интерактивті режимде көрсетілген. Түйістіріліп дәнекерленген кернеулердің шоғырлану коэффициентін *ANSYS* бағдарламалық комплексін қолданып ықтималдық сипаттамаларын есептеу нәтижелері алынды.

Әдебиет:

1. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. - М.: Стройиздат, 2016. - 381с.
2. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. - М.: Мир, 2010. – 604 с.
3. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин. - М.: Высшая школа, 2002. – 279 с.
4. Бакиров Ж.Б. Вероятностные методы расчета элементов конструкций. - Караганда: КарГТУ, 2007. - 180 с.
5. Тәңірбергенова А.Ә. Материалдар кедергісіндегі ықтималдық әдістер. - Қарағанды: ҚарMTU, 2013. – 55 б.
6. Басов К.А. ANSYS: Справочник пользователя. - М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
7. Нургузин М.Р., Даненова Г.Т. Инженерные расчеты в ANSYS: Сборник примеров. – Караганда: КарГТУ, 2006. – 319 с.

References:

1. Bolotin V.V. Metody teorii veroyatnostej i teorii nadezhnosti v raschetah sooruzhenij [Methods of probability theory and reliability theory in calculations of structures]. - M.: Strojizdat, 2016. – 381 p.
2. Kapur K., Lamberson L. Nadezhnost' i proektirovanie sistem [Reliability and system design]. - M.: Mir, 2010. – 604 p.
3. Reshetov D.N., Ivanov A.S., Fadeev V.Z. Nadezhnost' mashin [Reliability of machines]. - M.: Vysshaya shkola, 2002. – 279 p.
4. Bakirov Zh.B. Veroyatnostnye metody rascheta elementov konstrukcij [Probabilistic methods for calculating structural elements]. - Karaganda: KarGTU, 2007. - 180 p.
5. Tanirbergenova A.Ә. Materialdar kedergisindegi yqtimaldyk әdister [Probabilistic methods in the resistance of materials]. - Karagandy: KarMTU, 2013. – 55 p.
6. Basov K.A. ANSYS: Spravochnik pol'zovatelya [User Reference]. - M.: DMK Press, 2005. – 640 p.
7. Nurguzhin M.R., Danenova G.T. Inzhenernye raschety v ANSYS: Sbornik primerov [Engineering calculations in ANSYS: Collection of examples]. – Karaganda: KarGTU, 2006. – 319 p.