

UDC 551.509

**Anatolii P. Sirenko**, PhD, Docent, Docent of Department of dynamics and strength machines and strength of materials of the Institute of Mechanical Engineering  
ORCID ID: 0000-0002-4951-1165 **e-mail:** *sirenkoap@gmail.com*

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

## **FORMATION BY OPTIMAL ON PARETO RESOLVE OF THE PROBLEMS OF GROUND-BASED FAILURE IN CONDITIONS OF SEISMIC DANGER**

**Abstract.** *From 2000 to 2009, natural disasters damaged and destroyed about one million objects, which directly affected nearly 2.5 billion people worldwide. Increasing seismic activity in the Vrancea and Black Sea regions, as well as on the planet as a whole, has led to an increase in seismic hazard throughout Ukraine. Ukraine (and not only the Carpathian and Crimean regions, as it was previously thought) is a zone where potentially possible earthquakes, and quite strong. In areas with weakened soils, 7-8-ball effects can be observed. For a long time, during the course of the twentieth century and until now, seismic security of construction in the territory of Ukraine is mainly associated with regional estimates of seismicity, which, according to the results of researches of specialists of the Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine and others, correlated with so-called seismically active zones, mountain structures of Crimea and the Carpathians and the foothills. According to the estimates of the departments of the State Geological Survey of the Ministry of Environmental Protection, Ministry of Regional Development and Building and other 70% of the territory of Ukraine, forest and loamy formations of I and II categories of draft are developed, 25% of developed open and semi-open karst, the processes of man-made flooding cover up to 10-15% of the industrial urban agglomerations. The most complex impact on the technogenic deterioration of engineering-seismological conditions is associated with flooding, as a result of which occur the following processes in the upper zone of the geological environment, where the stress-strain state of the base of objects is formed: deformation of the front of seismic waves in the substructure of buildings at contact level groundwater with foundations and maintenance of increased pore pressure; decrease of stability of shift-dangerous areas; the formation of zones for the formation of plumes and thixotropic transformations of water of saturated clay rocks; man-made generation of land-summers during floods, mining operations in areas of influence of large water reservoirs. In general, a significant complex of changes in the stress-strain state of the geological environment due to natural and man-made factors increases the probability of occurrence of resonance phenomena in the system of "soil rock foundation – building construction" due to a wide spectrum of seismic shock shocks and man-made microseismic influences. In the article the algorithm of system harmonization of various requirements and indicators of soil ground reliability is considered with the help of compromise of opposite goals by means of formation of Pareto set. The practical possibility of obtaining the Pareto set is illustrated numerically.*

**Key words:** *seismic activity; soil foundation; set; Pareto*

А.П. Сіренко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

## ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПО ПАРЕТО РІШЕНЬ ВІДМОВ ҐРУНТОВОЇ ОСНОВИ В УМОВАХ СЕЙСМІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

***Анотація.** Посилення сейсмічної активності в зоні Вранча та Чорноморському регіоні, а також в цілому на планеті призвело до підвищення рівня сейсмічної небезпеки на всій території України. Україна (а не тільки Карпатський і Кримський регіони, як раніше вважалося) є зоною, де потенційно можливі землетруси, причому доволі сильні. У районах з послабленими ґрунтами можуть спостерігатися і 7-8-бальні ефекти. Упродовж ХХ століття і дотепер сейсмічна безпека будівництва на території України переважно пов'язується з регіональними оцінками сейсмічності, які за результатами досліджень фахівців Інституту геофізики Національної академії наук України та інших корелювали з так званими сейсмоактивними зонами, гірськими спорудами Криму та Карпат та передгірськими прогинами. За наявними оцінками підрозділів Держгеолслужби Мінприроди, Мінрегіонбуду та інших, на 70% території України розвинуті лесові та лесово-суглинисті формації I та II категорій просадковості, на 25% розвинутий відкритий та напіввідкритий карст, процеси техногенного підтоплення охоплюють до 10-15% площі промислово-міських агломерацій. Найбільш комплексний вплив на техногенне погіршення інженерно-сейсмогеологічних умов пов'язаний з підтопленням, внаслідок якого відбуваються наступні процеси у верхній зоні геологічного середовища, де формується напружено-деформований стан підґрунтя об'єктів: деформація фронту сейсмічних хвиль в підґрунті будівель при контакті рівня ґрунтових вод з фундаментами та утримання підвищеного порового тиску; зниження стійкості зсувонебезпечних територій; формування зон утворення пливунів і тиксотропних перетворень водонасичених глинистих порід; техногенне генерування землетрусів при повенях, проведенні гірничих робіт в зонах впливу великих водосховищ. В цілому значний комплекс змін напружено-деформованого стану геологічного середовища під впливом природних і техногенних чинників підвищує ймовірність виникнення резонансних явищ у системі "породи підґрунтя – будівельна споруда" внаслідок широкого спектру хвиль сейсмічних поштовхів та техногенних мікросейсмічних впливів. У статті розглянуто алгоритм системного узгодження різних вимог та показників надійності ґрунтової основи за допомогою пошуку компромісу протилежних цілей шляхом формування множини Парето. Практична можливість отримання множини Парето проілюстрована чисельно.*

***Ключові слова:** сейсмічна активність; ґрунтова основа; множина Парето*

### Вступ

Протягом десятиліття (з 2000 по 2009 рр.) стихійні лиха пошкодили та зруйнували близько одного мільйона об'єктів, що безпосередньо торкнулося майже 2,5 млрд людей в усьому світі [1]. Посилення сейсмічної активності в зоні Вранча та Чорноморському регіоні, а також в цілому на планеті призвело до підвищення рівня сейсмічної небезпеки на всій території України.

Наукові дослідження із сейсмостійкості ґрунтових основ, будівель та споруд розглянуті в роботах вітчизняних і зарубіжних дослідників: Alonso-Rodriguez A. et al. 2018, Anastasopoulos I. et al. 2018, Antolini F. et al. 2014, Balducci M. et al. 2011, Bardi F. et al. 2018, Barla M. et al. 2014, Basile G. et al. 2018, Borja R. et al. 2011, Burghignoli A. et al. 2016, Burton H. et al. 2018, Buttiglia S. et al. 2011, Callisto L. et al. 2016, Casagli N. et al. 2010, 2011, 2018, Catani F. et al. 2010, Ciampalini A. et al. 2018, Dao S. et al. 2014, Del Ventisette C. et al. 2010, Di Traglia F. et al. 2018, Frodella W. et al. 2018, Gigli G. et al. 2011, Kaliukh I. et al. 2013, 2015, 2015, Kampas G. et al. 2018, Knappett J. et al. 2018, Lacasse S. 2013, Liu X.Y. et al. 2011, Lollino G. & Chiara A. 2006, Luzi G. et al. 2010, Martinelli M. et al. 2016, Nikitas N. et al. 2018, Piccioni R. et al. 2011, Regni R. et al. 2011, Salvatici T. et al. 2018, Shokrabadi M. et al. 2018, Sirenko A. 2013, 2014, Stewart J. et al. 2018, Trofymchuk O. et al. 2015, Venanti L. et al. 2011, Wang Y. & Rathje E. 2018, White J. et al. 2011, Wu W. et al. 2011 та інші [2–18].

## Основна частина

Приблизно до 2000 р. РФ, Україна, Білорусь та ін. використовували карти загального сейсморайонування, на яких регламентувалося єдине значення розрахункової сейсмічності, яке переважно враховувало вертикальне навантаження на будівельні (залізобетонні) несучі конструкції, в тому числі з урахуванням ґрунтово-геологічних (місцевих інженерно-геологічних) умов. Основним методом диференціації останніх було і залишається сейсмічне мікрорайонування. Треба відмітити, що сейсмічне мікрорайонування значною мірою відображає напружено-деформований стан верхньої зони геологічного середовища (ГС) складних техногенно-геологічних систем "техногенний об'єкт – зона впливу на ГС" безпосередньо на момент його виконання. Водночас верхня зона ГС має значні зміни водонасичення (техногенні інфільтрація, підтоплення), вплив механічної і хімічної суфозії, змін кліматичних параметрів, фізико-хімічні перетворення порід підґрунтя (утворення колоїдів та зон тиксотропності, порушення водно-сольового і теплового балансу та ін.). За наявними оцінками підрозділів Держгеолслужби Мінприроди, Мінрегіонбуду, ІГН НАНУ та ін., на 70% території України розвинуті лесові та лесово-суглинисті формації I та II категорій просадковості, на 25% розвинутий відкритий та напіввідкритий карст, процеси техногенного підтоплення охоплюють до 10-15% площі промислово-міських агломерацій. Найбільш комплексний вплив на техногенне погіршення інженерно-сейсмогеологічних умов території України пов'язаний з підтопленням, внаслідок якого відбуваються наступні процеси у верхній зоні ГС, де формується напружено-деформований стан підґрунтя промислових та цивільних об'єктів [19]:

- деформація фронту сейсмохвиль в підґрунті будівель при контакті рівня ґрунтових вод з фундаментами та утримання підвищеного порового тиску;
- зниження стійкості схилів територій;
- формування зон пливунотворення і тиксотропних перетворень водонасичених глинистих порід;
- техногенне генерування землетрусів при повенях, проведенні гірничих робіт в зонах впливу великих водосховищ.

Вищенаведені висновки щодо суттєвого ускладнення інженерно-сейсмогеологічних умов будівництва на ділянках підтоплення, на наш погляд, можна проілюструвати наступними приблизними розрахунками [19]:

1) При розмірі монолітного фундаменту блоку АЕС  $l_{\phi} \approx 100 \times 100$  м в умовах підтоплення слабопроникних суглинків підгрунтя час проходження сейсмічної хвилі  $t_{сейсм}$  із середньою швидкістю  $V_{сейсм} \approx 10^3$  м/сек складе  $t_{сейсм} \approx l/V_{сейсм} \approx 10^2:10^3 \approx 0,1$  сек, а час зниження додаткового порового тиску  $t_{пор}$ , при середній проникності суглинків  $K_0 \approx 0,1 \div 1,0$  м/добу та рівнепровідності  $a_y = 10^1 \div 10^2$  м<sup>2</sup>/добу, складе:

$$t_{пор(min)} \approx \frac{0,5 \cdot (l_{\phi}/2)^2}{a_y} \approx \frac{0,5 \cdot (100/2)^2}{(10^2)} \approx 12,5 \text{ діб (} 10^6 \text{ сек).}$$

Таким чином, можна бачити, що більш довгий час зниження порового тиску в породах підгрунтя при його підтопленні суттєво підвищує ризик додаткових деформацій та впливу афтершоків ( $t_{пор}/t_{сейсм} \approx 10^6:0,1 = 10^7$  разів) [19].

2) На прикладі викиду водногрунтової маси на схилівій ділянці житломасиву "Тополь" у м. Дніпропетровську (1997 р.) можна проілюструвати підвищену чутливість підтопленого масиву лесово-суглинистих порід, які перетворилися на тиксотропне утворення, геодинамічно-активної зони (яружно-балкова система в межах промислово-міської агломерації) при статичному напруженні зрушення водно-колоїдного утворення  $\delta \approx 100$  мг/см<sup>2</sup>, густиною  $\rho = 1,4$  г/см<sup>3</sup>. Кут рівноваги при переході породно-колоїдного утворення у рідинний стан буде сягати  $\alpha = \arctg \frac{\delta}{\rho} \approx \frac{0,1}{1,4} \approx 4^\circ$  [19].

В цілому значний комплекс змін напружено-деформованого стану ГС під впливом природних і техногенних чинників підвищує ймовірність виникнення резонансних явищ у формуванні "породи підгрунтя – будівельна споруда" внаслідок широкого спектру хвиль сейсмічних поштовхів та техногенних мікросейсмічних впливів. Таким чином, для того щоб спроектувати єдину систему управління надійністю ґрунтових основ, необхідно перш за все розробити систему взаємопов'язаних критеріїв (деякі з яких описані вище). Необхідно визначити залежність між критеріями і їх системну підпорядкованість цільовій функції, що визначає надійність ґрунтових основ в цілому.

*На даний час, на жаль, достовірну ймовірність ґрунтової відмови в будь-який момент експлуатації, строго кажучи, визначити неможливо через величезну кількість чинників, що впливають на надійність, і велику різноманітність можливих поєднань різних факторів. Тому можна реально говорити лише про наближену оцінку ймовірності ґрунтової відмови.*

На різних етапах оцінка ймовірності ґрунтової відмови проводиться в абсолютно різних умовах і на основі інформації, яка щоразу є лише частиною інформації, необхідної для вироблення управлінських рішень. Послідовність управлінських рішень повинна регулюватися системою критеріїв, які представляють собою взаємопов'язану систему оцінок ймовірності ґрунтової відмови. Для вироблення таких критеріїв необхідно на основі моніторингової інформації вміти вирішувати зворотну задачу теорії надійності – для заданої ґрунтової основи і при відомих зовнішніх впливах необхідно визначити межі змін вхідних параметрів, що забезпечують задану ймовірність відмови або

заданий коефіцієнт запасу, тобто мінімум (максимум) цільової функції. При вирішенні завдань системного узгодження різних вимог і показників надійності необхідно враховувати не тільки обмеження матеріальних, фінансових та інших ресурсів, а й вплив на них техногенних непередбачуваних факторів ризику.

Вирішення таких завдань зводиться до пошуку компромісів суперечливих цілей на основі формування множини Парето. При цьому в методах формування оптимальних по Парето рішень багатокритеріальних задач (БЗ) апріорно вважається, що множина Парето існує [20]. Разом з тим, в реальних системних задачах формування множини компромісів суперечливих цілей апріорно можна виключити ситуації, коли вихідні умови і задані вимоги до надійності ґрунту є принципово несумісними в рамках даного підходу.

При використанні принципу Парето в процедурах рішення БЗ потрібно, перш за все, встановити необхідність і довести можливість формування непорожньої множини компромісів цілей при заданих вимогах, обмеженнях та умовах. Слід звернути увагу, що ці завдання принципово відрізняються від типових задач системної оптимізації тим, що цільові функції, області визначення і множини значень апріорно не задаються. Вони повинні бути визначені на основі неповної, найчастіше різномірної вхідної інформації про фізико-механічні характеристики ґрунту, сейсмічність майданчика та ін.

Суть методу знаходження раціонального компромісу і можливість його застосування для вирішення БЗ, системного узгодження суперечливих цілей в умовах невизначеності розглянемо на прикладі задачі погодження вимог до зовнішніх і внутрішніх показників досліджуваного будівельного об'єкта при апріорно відомих обмеженнях на показники зовнішнього впливу.

### Математична постановка задачі

Задані вимоги до зовнішніх показників у вигляді

$$y \in B^\pm, B^\pm = \{B_i^\pm, i = \overline{1, m}\}, B_i^\pm = \{y_i | b_i^- \leq y_i \leq b_i^+, i \in [1, m]\}; \quad (1)$$

вимоги до внутрішніх показників  $x_1$

$$x_1 \in D_1^\pm, D_1^\pm = \{x_1 | x_1 = \langle x_{1j_1}, j_1 = \overline{1, n_1} \rangle, d_{1j_1}^- \leq x_{1j_1} \leq d_{1j_1}^+\}; \quad (2)$$

і визначені обмеження на показники  $x_2, x_3$  зовнішнього впливу

$$x_2 \in D_2^*, D_2^* = \{x_2 | x_2 = \langle x_{2j_2}, j_2 = \overline{1, n_2} \rangle, d_{2j_2}^- \leq x_{2j_2} \leq d_{2j_2}^+\}, \quad (3)$$

$$x_3 \in D_3^*, D_3^* = \{x_3 | x_3 = \langle x_{3j_3}, j_3 = \overline{1, n_3} \rangle, d_{3j_3}^- \leq x_{3j_3} \leq d_{3j_3}^+\}. \quad (4)$$

Відомі функціональні залежності зовнішніх показників у від змінних  $x = (x_1, x_2, x_3)$  у вигляді багаторівневої ієрархічної системи моделей в класі мультиплікативних функцій. Система реалізована в наступній формі послідовності моделей:

$$y_i = \Phi_i(x); \quad i = \overline{1, m}; \quad (5)$$

$$[1 + \Phi_i(x)] = \prod_{k=1}^{K_0} [1 + \Phi_{ik}(x_k)]^{c_{ik}}; \quad (6)$$

$$[1 + \Phi_{ik}(x_k)] = \prod_{j_k=1}^{n_k} [1 + \Psi_{kj_k}(x_{kj_k})]^{a_{ikj_k}}, \quad (7)$$

$$[1 + \Psi_{kj_k}(x_{kj_k})] = \prod_{p_{j_k}=1}^{p_{kj_k}} [1 + \phi_{p_{j_k}}(x_{kj_k})]^{l_{kj_k}}. \quad (8)$$

Задані умови взаємного узгодження області  $D^*$  визначення кожної функції  $y_i = \Phi_i(x)$  множини  $\Phi = \{\Phi_i(x) \mid x \in D^*; i = \overline{1, m}\}$  та множини  $B_i^*$  значень  $y_i \in B_i^*, B_i^* \subset B^*$  кожної функції  $\Phi_i \in \Phi, i = \overline{1, m}$  у вигляді

$$(\forall x_1 \in D_1^*) \wedge (\forall x_2 \in D_2^*) \wedge (\forall x_3 \in D_3^*) \Rightarrow \exists y \in B^*, \quad (9)$$

$$\forall y \in B^* \Rightarrow (\exists x_1 \in D_1^*) \wedge (\exists x_2 \in D_2^*) \wedge (\exists x_3 \in D_3^*), \quad (10)$$

$$y \in B^* \Leftrightarrow (y_1 \in B_1^*) \wedge \dots \wedge (y_i \in B_i^*) \wedge \dots \wedge (y_m \in B_m^*). \quad (11)$$

### Потрібно:

- обґрунтувати необхідність і довести можливість формування непорожньої множини компромісів цілей БЗ при заданих вимогах, обмеженнях та умовах;

- сформулювати таку множину Парето  $P_{D,B}(\Phi)$ , в якій забезпечується виконання умов взаємного узгодження визначення області  $D^*$  і множини  $B_i^*$  визначення параметрів для кожної функції  $\Phi_i \in \Phi, i = \overline{1, m}$ ;

- визначити раціональні умови системного узгодження суперечливих цілей.

Рішення даної задачі зводиться до системного узгодження та спільного виконання умов (9) і (10) як основи формування непорожньої множини Парето [21].

Шукана множина Парето  $P_{D,B}(\Phi)$  характеризується тріадою  $\langle D^*, B^*, \Phi \rangle$ , забезпечує взаємне системне інтервальне узгодження області визначення  $D^*$  і множини значень  $B^*$  для кожної функції множини  $\Phi$  і описується співвідношенням:

$$P_{D,B}(\Phi) \stackrel{\Delta}{=} \{ \langle D^*, B^*, \Phi \rangle \mid [\Phi: D^* \rightarrow B^*] \wedge [\Phi^{-1}: B^* \rightarrow D^*] \}.$$

Дане співвідношення показує, що при будь-якому виборі значень зовнішніх і внутрішніх показників виконується умова  $\forall u \in B^* \Rightarrow \exists x_1 \in D_1^*$ , тобто для кожного  $u \in B^*$  існують відповідні значення  $x_1 \in D_1^*$  множини внутрішніх показників.

Представимо основні процедури алгоритму формування раціонального компромісу шуканої множини цілей.

1. Основною неформалізованою процедурою є вибір критеріїв і їх ранжування за ступенем важливості. Вважаємо, що особа, яка приймає рішення (ОПР), обрала наступні варіанти за ступенем важливості:

- всі критерії є рівнозначними за важливістю;
- всі критерії ранжовані за ступенем зменшення їх важливості.

2. Наступною за важливістю неформалізованою процедурою є ранжування за ступенем важливості заданих суперечливих цілей. Вважаємо, що ОПР обрала наступні варіанти ранжування цілей за ступенем важливості:

• варіант 1: пріоритетними є цілі, для яких оптимальним показником є показники надійності і безпеки. Такі цілі характеризуються співвідношеннями:

$$i_{01} = 2i_1 - 1; i_1 = \overline{1, m_1}; y_{i_{01}}^* = \max_{i_{01}} \Phi(x); \quad (12)$$

• варіант 2: пріоритетними є цілі, для яких оптимальним показником є показники вартості будівельних робіт з відновлення ґрунтових основ та фундаментів будівель та споруд. Такі цілі характеризуються співвідношеннями:

$$i_{02} = 2i_2; i_2 = \overline{1, m_2}; y_{i_{02}}^* = \min_{i_{02}} \Phi(x). \quad (13)$$

3. Попередні процедури створили основу для розробки процедури формування функціональних залежностей цілей. З огляду на функціональні залежності у від змінних  $x = (x_1, x_2, x_3)$ :

$$y_i = \Phi_i(x); i = \overline{1, m}, \quad (14)$$

на основі результатів  $B_i^*, D_2^*, D_3^*$  формується система рівнянь:

$$y_i[q_0] - \Phi_i(x_1, x_2[q_2], x_3[q_3]) = 0; i = \overline{1, m}; q_0 = \overline{1, Q_0}. \quad (15)$$

Тут дискретні аналоги  $y_i[q_0]; x_2[q_2]; x_3[q_3]$  для  $B_i^*, D_2^*, D_3^*$  визначаються співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \hat{B}^* &= \{y_i | y_i = y_i[q_0]; y_i[q_0] \in B_i^*; q_0 = \overline{1, k_0}; y_i[1] = b_i^-; y_i[k_0] = b_i^+\} \\ \hat{D}_2^* &= \{x_2 | x_2 = x_2[q_2]; x_2[q_2] \in D_2^*; q_2 = \overline{1, k_2}; x_2[1] = d_2^-; x_2[k_2] = d_2^+\} \\ \hat{D}_3^* &= \{x_3 | x_3 = x_3[q_3]; x_3[q_3] \in D_3^*; q_3 = \overline{1, k_3}; x_3[1] = d_3^-; x_3[k_3] = d_3^+\} \end{aligned}$$

4. Система рівнянь (7) формується окремо для цілей варіанту 1 та варіанту 2 і містить відповідно  $N_1 = m_1 \times Q_0$  і  $N_2 = m_2 \times Q_0$  рівнянь, де невідомими є компоненти  $x_{1j_1}, j_1 = \overline{1, n_1}$  вектора  $x_1$ . Кожен варіант системи (5) є несумісною системою нелінійних рівнянь. Рівняння є нелінійними, оскільки  $y_i$  визначаються ієрархічною системою нелінійних моделей (5), (12)–(14). Система рівнянь є несумісною, оскільки кількість  $N_1$  і  $N_2$  рівнянь перевищує кількість  $n_1$  компонентів вектора  $x_1$ . З огляду на зазначені особливості, доцільно кожен систему (15) звести до класу Чебишевських завдань наближень для несумісних систем нелінійних рівнянь, метод вирішення яких запропоновано в [21]. Результати рішення систем рівнянь для формування цілей варіанту 1 та варіанту 2 складають множину раціональних компромісів цілей.

Розглянемо приклад вирішення тестового завдання на основі формування множини Парето  $P_{D,B}(\Phi)$ . Мета прикладу – продемонструвати потенційні можливості концепції множини Парето  $P_{D,B}(\Phi)$  у вирішенні задачі багатокритеріального формування та системного узгодження суперечливих цілей в умовах невизначеності. Розглянемо тестові вихідні дані за 8 змінними параметрами (табл. 1) [21].

Таблиця 1 – Вихідні дані

Номер вибірки	Параметр № 1	Параметр № 2	Параметр № 3	Параметр № 4	Параметр № 5	Параметр № 6	Параметр № 7	Параметр № 8
1.	8	8	3	3	0	3	2	18
2.	5	5	3	3	0	2	4	12
3.	10	8	4	5	1	4	5	20
4.	2	6	2	3	0	3	4	11
5.	7	5	2	5	1	2	2	19
6.	6	4	3	1	0	2	5	13
7.	2	3	3	1	1	1	3	14
8.	5	5	2	2	0	2	2	17
9.	4	6	3	2	1	3	3	13
10.	5	5	2	1	0	2	2	18
11.	3	9	2	5	0	3	3	10
12.	4	7	5	4	0	5	2	17

Процедури розв'язання задачі відображалися в діалогових вікнах:

- Головне меню.
- Вибір параметрів функцій.
- Формування умов роботи.
- Формування вибірки рівнянь.
- Ітераційна процедура.

На рисунку представлено діалогове вікно «Ітераційна процедура», в якому відображено варіант формування множини Парето для вихідних даних (табл. 1) [21].

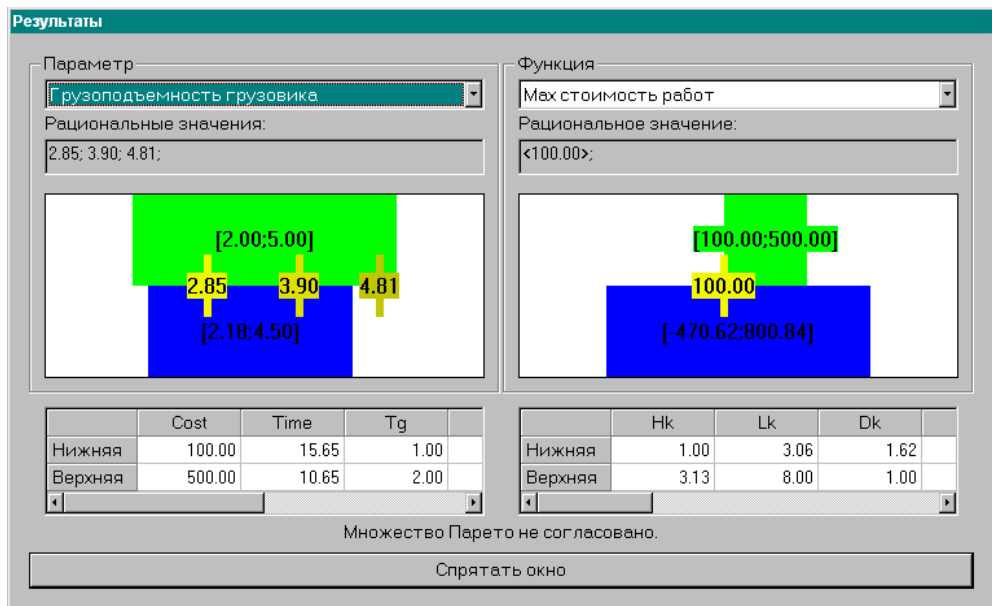


Рисунок – Ітераційна процедура знаходження множини Парето

В результаті ітераційного вирішення задачі в інтерактивному діалоговому режимі отримана наступна узгоджена множина Парето (табл. 2).



Таблиця 2 – Результати формування множини Парето

Параметр № 1	Параметр № 2	Параметр № 3	Параметр № 4	Параметр № 5	Параметр № 6	Параметр № 7	Параметр № 8
[3.4;5.8]	[5.9;7.5]	[2.4;3.5]	[2.1;4.1]	[0;1]	[2.8;4.2]	[2.4;4.4]	[11.2;18.9]

## Висновки

1. Значний комплекс змін напружено-деформованого стану ГС під впливом природних і техногенних чинників підвищує ймовірність виникнення резонансних явищ у формуванні "породи підгрунтя – будівельна споруда" внаслідок широкого спектру хвиль сейсмічних поштовхів та техногенних мікросейсмічних впливів.

2. Для того щоб спроектувати єдину систему управління надійністю ґрунтових основ, необхідно перш за все розробити систему взаємопов'язаних критеріїв, визначити залежність між критеріями і їх системну підпорядкованість цільовій функції.

3. Побудовано алгоритм системного узгодження різних вимог і показників надійності ґрунтової основи шляхом пошуку компромісу суперечливих цілей на основі формування множини Парето.

4. Завдання математичного моделювання відмови ґрунтової основи необхідно розглядати як складну самостійну задачу, від правильного і оптимального вирішення якої буде залежати надійність досліджуваного об'єкта або споруди, коректність підсумкових результатів і, в кінцевому результаті, – безпека життя і експлуатації будівель та споруд.

## REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Lacasse, S. (2013). 8th Terzaghi Oration Protecting society from landslides – the role of the geotechnical engineer. In *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris* (pp. 15-34).
2. Uchenye: Sil'nye zemletrjasenija mogu byt' vo vsej Ukraine. (2011, March 23). *Novosti Ukrainy*. Retrieved from <http://for-ua.com/ukraine/2011/03/23/085121.html> (in Russian).
3. Alonso-Rodriguez, A., Nikitas, N., Knappett, J., Kampas, G., Anastasopoulos, I., & Fuentes, R. (2018). System identification of tunnel response to ground motion considering a simplified model. *Frontiers in Built Environment*, (4), 1-11.
4. Balducci, M., Regni, R., Buttiglia, S., Piccioni, R., Venanti, L.D., Casagli, N., & Gigli, G. (2011). Design and built of a ground reinforced embankment for the protection of a provincial road (Assisi, Italy) against rockslide. *Proc. XXIV conv. Naz. Geotecnica, AGI, Napoli, 22th-24th June 2011*.
5. Barla, M., Antolini, F., & Dao, S. (2014). Il monitoraggio delle frane in tempo reale. *Strade e Autostrade*, (107), 154-157.
6. Borja, R.I., White, J.A., Liu, X.Y., & Wu, W. (2011). Factor of safety in a partially saturated slope inferred from hydro-mechanical continuum modeling. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 63(2), 140-154.
7. Casagli, N., Catani, F., Del Ventisette, C., & Luzi, G. (2010). Monitoring, prediction, and early warning using ground-based radar interferometry. *Landslides*, 7(3), 291–301.
8. Frodella, W., Ciampalini, A., Bardi, F., Salvatici, T., Di Traglia, F., Basile, G., & Casagli, N. (2018). A method for assessing and managing landslide residual hazard in urban areas. *Landslides*, 15(2), 183-197.

9. Highland, L., Bobrowsky, P. (2008). *The Landslide Handbook – a Guide to Understanding Landslides*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Circular.
10. Intrieri, E., Gigli, G., Gracch, T., Nocentini, M., Lombardi, L., Mugnai, F., Frodella, W., Bertolini, G., Carnevale, E., Favalli, M., Fornaciai, A., Alavedra, J. M., Mucchi, L., Nannipieri, L., Rodriguez-Lloveras, X., Pizziolo, M., Schina, R., Trippi, F., & Casagli, N. (2018). Application of an ultra-wide band sensor-free wireless network for ground monitoring. *Engineering Geology*, (238), 1-14.
11. Kaliukh, I., Senatorov, V., Marienkov, N., Trofymchuk, O., Silchenko, K., & Kaliukh, T. (2015). Arrangement of deep foundation pit in restricted conditions of city build-up in landslide territory with considering of seismic loads of 8 points. *Proc. XVI ECSMGE, Edinburgh, 13th-17th September 2015*.
12. Kaliukh, I., Senatorov, V., Khavkin, O., Kaliukh, T., & Khavkin, K. (2013). Experimentally-analytical researches of the technical state of reinforce-concrete constructions for defense from landslide's pressure in seismic regions of Ukraine. *Proc. FIB symp., Tel-Aviv, 22-24 April 2013*.
13. Lollino, G., & Chiara, A. (2006). UNESCO World Heritage sites in Italy affected by geological problems, specifically landslide and flood hazard. *Landslides*, 3(4), 311-321.
14. Martinelli, M., Burghignoli, A., & Callisto, L. (2016). Dynamic response of a pile embedded into a layered soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, (87), 16-28.
15. Shokrabadi, M., Burton, H.V., & Stewart, J.P. (2018). Impact of Sequential Ground Motion Pairing on Mainshock-Aftershock Structural Response and Collapse Performance Assessment. *Structural Engineering* 144 (10).
16. Trofymchuk, O. M., Kaliukh, I. I., Hlebchuk, H. S., & Berchun, V. P. (2013). Experimental and analytical studies of landslides in the south of Ukraine under the action of natural seismic impacts. *Proceedings of the International Symposium on Earthquake-Induced Landslides, Kiryu, Japan* (pp. 883-890).
17. Sirenko, A. P. (2014). Vlihanie urovnja gruntovyh vod na ustojchivost' opolznevogo sklona. *Budivel'ni Konstrukcii*, (80), 210-213 (in Russian).
18. Sirenko, A. P. (2013). Krytychna vidstan' mizh utrymujuchymy elementamy dlja zsvnyh ta zsvonebezpechnyh shylyv Chernivec'koi' oblasti. *Ekologichna Bezpeka ta Pryrodokorystuvannja*, (13), 73-76 (in Ukrainian).
19. Lushhyk, A. V., & Jakovlev, J. O. (2000). Osnovni metodychni polozhennja inzhenerno-sejsmologichnogo rajonuvannja v umovah intensyvnoi' gospodars'koi' dijal'nosti. *Informacijnyj Bjuletyn' pro Stan Geologichnogo Seredovyshha Ukrai'ny u 1998 Roci*, (17), 134-137 (in Ukrainian).
20. Podinovskij, V. V., & Nogin, V. D. (1982). *Pareto-optimal'nye reshenija mnogokriterial'nyh zadach*. Moscow: Nauka (in Russian).
21. Pankratova, N. D., & Oparina, E. L. (2004). Vosstanovlenie mnogofaktornyh zakonomernostej v uslovijah konceptual'noj neopredelennosti. *Systemni Doslidzhennja ta informacijni Tehnologii*, (3), 103-114 (in Russian).

*The article was received 20.03.2019 and was accepted after revision 09.04.2019*

### **Сіренко Анатолій Петрович**

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів Механіко-машинобудівного інституту НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

**Адреса робоча:** 03056 Україна, м. Київ-56, проспект Перемоги, 37

**e-mail:** [sirenkoap@gmail.com](mailto:sirenkoap@gmail.com)

ORCID ID: 0000-0002-4951-1165