

SECTION 9. MECHANICAL ENGINEERING

DOI: 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.2.9.1

**9.1 Комплексний метод визначення раціональних параметрів посадки з
натягом у системах автоматизованого проєктування**

Машинобудування є однією з провідних галузей промисловості в Україні, значну частку в якій займає виробництво продукції військового призначення, яке повинно базуватися на наукомістких технологіях. В той же час, до сучасних машин і механізмів висуваються підвищені вимоги щодо технічного рівня та конкурентоздатності на внутрішньому і зовнішньому ринках. Головною умовою досягнення вказаних вимог машинобудівних виробів є зниження термінів їх проєктування і виробництва, підвищення точності виготовлення їх деталей і вузлів, якості функціональних поверхонь. В умовах воєнного стану економічний розвиток в Україні передбачає більш швидке технічне переозброєння виробництва, модернізацію, створення та випуск вузлів, агрегатів машин і обладнання. Особливо це стосується розвитку науково-технічного прогресу військово-промислового комплексу, який має надважливе значення в умовах війни.

Важливою задачею у процесі конструювання нових та модернізації існуючих виробів технічного призначення є відповідна підготовка конструкторської документації. Такі процеси потребують забезпечення відповідними встаткуванням і засобами контролю, а також ефективними технологічними процесами складання агрегатів і вузлів машин. Враховуючи різноманіття сучасної військової техніки, обладнання та озброєння, що застосовується у військових формуваннях України, вже на етапі проєктування виробів слід приділяти велику увагу розробці науково обґрунтованих надійних методів розрахунку, моделювання і прогнозування міцності з'єднань. Вирішення зазначеної проблеми залежить від оперативної інженерної підготовки проєктувальника та пов'язано з вибором необхідної точності виготовлення і складання деталей під час їх проєктування.

Одним із видів складальних з'єднань, що набули широкого поширення в машинобудівній галузі, є посадки з гарантованим натягом по гладкій поверхні, які часто використовуються в конструкціях озброєння і військової техніки. Такі вироби мають можливість передавати значні за величиною і різні за напрямком навантаження при порівняно невеликих габаритних розмірах, що зумовило їхнє застосування у відповідальних вузлах машин і механізмів, які працюють тривалий час у різних умовах навантаження і зовнішніх середовищах. Однак, більшість фізико-механічних процесів, що відбуваються у місці стику контактуючих поверхонь деталей з'єднань мало досліджені у теперішній час. У таких випадках, під час розрахунку та проектування методом прецедентів і подібності використовують досвід застосування посадок із натягом в окремих вузлах машин або механізмів, які найчастіше вимагають перевірки та кореляції розрахунків.

У зв'язку із ймовірнісною природою величини фактичного натягу і контактного тиску можуть варіюватися у широкому діапазоні в області їх допустимих значень, на етапі проектування у конструктора виникає завдання відшукати раціональне проектне рішення зі скінченої множини допустимих. Такий підхід потребує значного досвіду від конструктора-проектувальника, що ставить ефективність проекту в залежність від суб'єктивного фактору.

З урахуванням вказаної проблеми актуальним питанням є забезпеченість підприємства високим рівнем автоматизації процесу проектування і виробництва виробів, що є основою виробничих процесів на сучасних машинобудівних підприємствах. Впровадження інноваційних технологій важко уявити нині без використання й інтеграції сучасних систем автоматизованого проектування деталей з'єднань з натягом. До таких систем висувають комплексні вимоги, починаючи з формалізації поставленої задачі та закінчуючи отриманням комп'ютерних програмних засобів.

В результаті проведених чисельно-досліджень, автором створено ряд ефективних засобів і методика пошуку раціонального проектного рішення із множини отриманих допустимих [295, 296]. Вказані засоби дозволяють

підвищити ефективність і якість широкої номенклатури з'єднань з натягом по гладкій поверхні при їх автоматизованому проектуванні.

В основу вказаних засобів вибору раціонального проектного рішення положено синтезовану автором графічну інтерпретацію (рис. 1) часткової параметричної моделі області існування раціональних посадок з натягом (ОІРПН) у координатному квадранті dlN (де d – посадковий діаметр, l – посадкова робоча довжина, N – натяг у гладкому з'єднанні). Модель dlN є складовою частиною комплексу мультипараметричної моделі (ОІРПН) та побудована на основі аналізу результатів чисельно-аналітичних досліджень розглядуваного з'єднання, отриманих за допомогою авторської комп'ютерної програми Interference Fit [297].

Для оцінки степені коректності отриманої моделі виконувалось дослідження конкретного посадкового з'єднання з натягом – зубчастого вінця зі маточиною колеса «Маточина-бандаж» по гладкій циліндричній поверхні, що здійснюється при термічному способі складання, для прикладу з вихідними даними, що розглядалися у роботах [298–301].

Алгоритм побудови часткової моделі ОІРПН у координатному квадранті dlN [295, 296] складається з наступних етапів.

На координатних площинах dN , lN і dl (див. рис. 1 і 2) відображаються проєкції геометричного образу тривимірної часткової моделі 2 ОІРПН. У межах цього об'єкту з'являється можливість вибирати всі конструкторські рішення, що відповідають граничним умовам придатності посадок з натягом. Однак у міру збільшення посадкової робочої довжини до значення $l \rightarrow \infty$ вздовж координатної осі Ol на координатних площинах lN і dl ця модель ОІРПН та її проєкції мають нескінченні форми об'єктів.

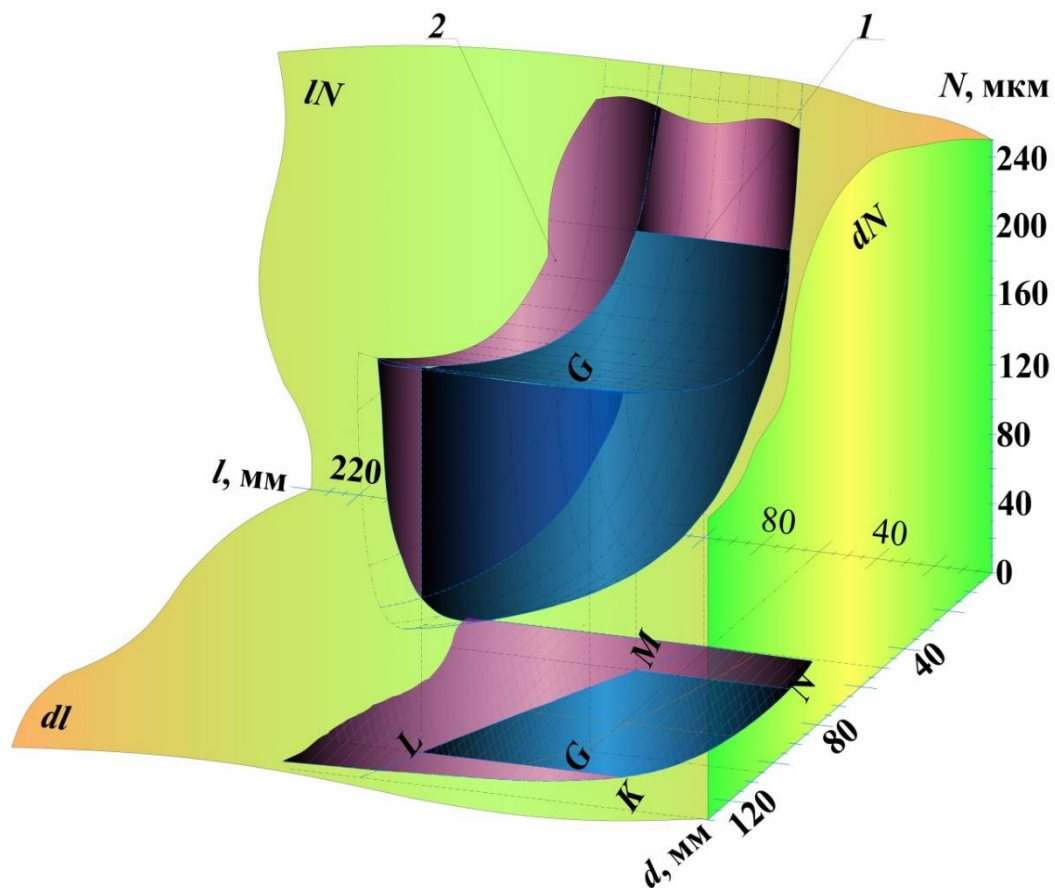


Рисунок 1. Просторовий образ часткової моделі ОІРПН і ЛРЗ у квадранті dlN

1 – просторова локалізована рекомендована зона; 2 – часткова модель ОІРПН

Посадкова робоча довжина може бути призначена проєктувальником будь-якої величини в діапазоні $l_{кр} \leq l \leq \infty$. У реальних умовах для якісного, ефективного і економічно доцільного виготовлення деталей посадок з натягом та способу їх складання, мають бути враховані технологічні, міцнісні і експлуатаційні умови, які уявляють собою певну кількість факторів обмежень, що накладаються на параметри посадки і впливають на прцездатність як окремих деталей, так всього з'єднання. Для полегшення вибору всередині об'ємної часткової моделі 2 міститься просторова локалізована рекомендована зона (ЛРЗ) 1, яка має скінчені розміри форми. У межах ЛРЗ рекомендується відшукувати раціональну посадку з натягом, як остаточне проєктне рішення, серед множин альтернативних придатних. ЛРЗ 1 відділяється від ОІРПН 2 січною поверхнею 3, що розмежовує значення рекомендованих параметрів від усіх можливих придатних.

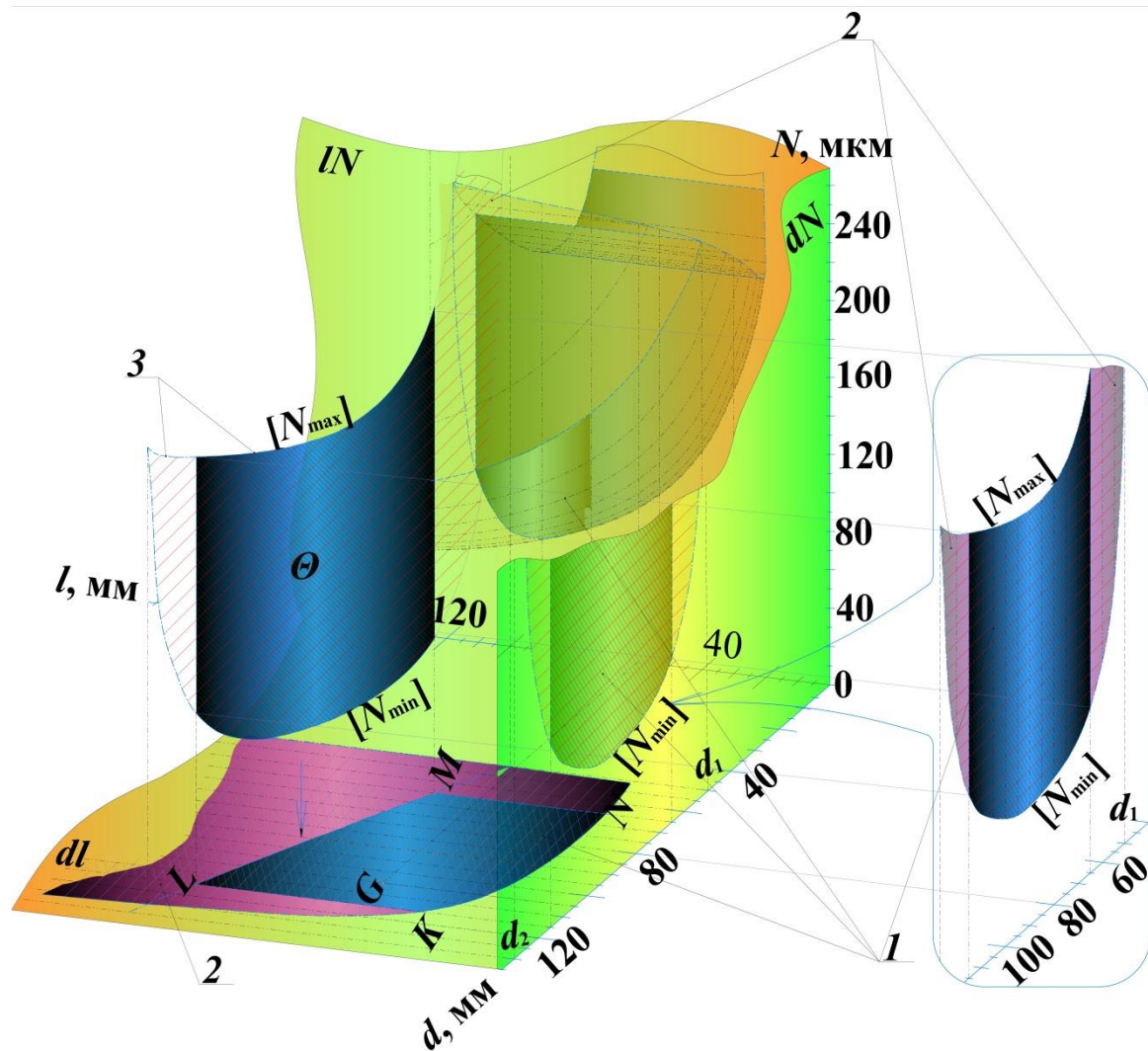


Рисунок 2. Просторові проєкції часткової моделі ОІРПН, ЛРЗ та розташування січної поверхні у квадранті dN

1 – проєкції ЛРЗ; 2 – проєкції ОІРПН (часткової моделі); 3 – січна поверхня, що розмежовує значення рекомендованих параметрів від усіх можливих придатних

Форма проєкції січної поверхні 3 [295, 296] на координатній площині dN (рис. 2) утворена двома кривими лініями – зверху відповідає значенням $[N_{\max}]$, а нижче – $[N_{\min}]$ (де $[N_{\min}]$ і $[N_{\max}]$ – мінімально і максимально допустимі граничні натяги відповідно у інтервалі значень (від діаметру внутрішньої поверхні охоплюваної деталі d_1 до умовного зовнішнього діаметру охоплювальної деталі d_2). Остаточним параметром, що впливає на вибір посадки, є дійсний натяг N_f , який має відповідати умові $[N_{\min}] \leq N_f \leq [N_{\max}]$.

При певній дискретній величині посадкового діаметра d_i буде відповідне критичне значення посадкової робочої довжини $l_{крj}$. Інакше кажучи, при d_i величина $[N_{max}]_i$ буде постійною незалежно від будь-яких значень посадкової робочої довжини в діапазоні $l_{крj} \leq l_j \leq \infty$ вздовж координатної осі Ol . Параметр $[N_{max}]_i = \text{const}$ залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу слабшої деталі з'єднання. При відповідному d_i на відміну від $[N_{max}]_i$ величина мінімального граничного натягу $[N_{min}]_i$ поступово зменшується в цьому ж діапазоні $l_{крj} \leq l_j \leq \infty$ (при збільшенні значення $l_j \rightarrow \infty$) та асимптотично наближається $[N_{min}] \rightarrow 0$. За цих умов лінії допустимих значень натягу часткової моделі ОІРПН 2, утворені крайніми точками відрізків діапазону $[N_{min}] \dots [N_{max}]$ проєктуються на координатну площину lN . Кількість множин придатних проєктних рішень (посадок з натягом) послідовно збільшується між кривими границь цієї поступово зростаючої ОІРПН, параметри яких вписуються в цю модель. З цієї причини на координатній площині dN з урахуванням факторів обмеження показано проєкцію січної поверхні 3, позначеною літерою Θ . Крива гранична лінія поверхні 3, що відповідає значенню $[N_{min}]$, визначена залежно від величини максимально рекомендованої посадкової робочої довжини l_{pmax} охоплюювальної деталі з'єднання для сталевих матеріалів, яку рекомендовано обчислювати [295, 302] як: $l_{pmax} \leq 4d^{0,7}$. Січна поверхня 3 проєктується в плані на координатну площину dl у вигляді кривої (прямої) лінії (залежно від l_{pmax}), а її частина (відрізок LM) обмежує ЛРЗ в діапазоні гранично прийнятних значень посадкового діаметра $(d_1 + 15) \dots (d_2 - 15)$.

При побудові математичних моделей просторових об'єктів при проведенні чисельно-аналітичних досліджень у системах автоматизованого проєктування посадок з натягом у роботах [298, 300] розглядалося вибір критерія призначення раціонального сполучення геометричних параметрів d і l посадки з натягом у

межах плоскої проєкції ЛРЗ 1 (у вигляді плоскої фігури $KLMN$), яка належить частковій математичній моделі ОІРПН 2, побудованої в координатній площині dl . Ці об'єкти аналітично описані в роботі [298] за допомогою математичного апарату теорії R-функцій [303 – 306]. Чисельні значення сполучення основних величин d і l представляють собою розташування точки G з відповідними координатами (d_G, l_G) . Розглядувана точка, як центр групування шуканих величин, утворюється при перетині відрізків діапазону $r_{d_{\max}}$ зміни раціональних значень посадкового діаметру та діапазону $r_{l_{\max}}$ зміни раціональних значень посадкової робочої довжини. Визначення центра групування G раціонального сполучення посадкових діаметра d і робочої довжини l є основоположним критерієм як для визначення інших важливих параметрів посадки (питомого тиску p і температури нагрівання t_2 (охолодження t_1) і натягу N , як головної функції) та їх аналізу, так і для вибору конструкторського рішення зі скінченної множини придатних альтернативних у будь-якій області комплексу мультипараметричної математичної моделі.

На рис. 3 представлено просторовий образ часткової моделі ОІРПН разом з ЛРЗ та їх тривимірними проєкціями у квадранті dlN на які накладаються кілька проєкцій локалізованих макетів множин (ЛММ) альтернативних придатних посадок з натягом. Паралельно кожній з цих трьох взаємно перпендикулярних площин dN , lN і dl для розглядуваного прикладу накладаються проєкції n -на кількість ЛММ альтернативних придатних посадок з натягом ($H7/v7$, $H7/u7$ і $H8/u8$), як раціональних конструкторських рішень.

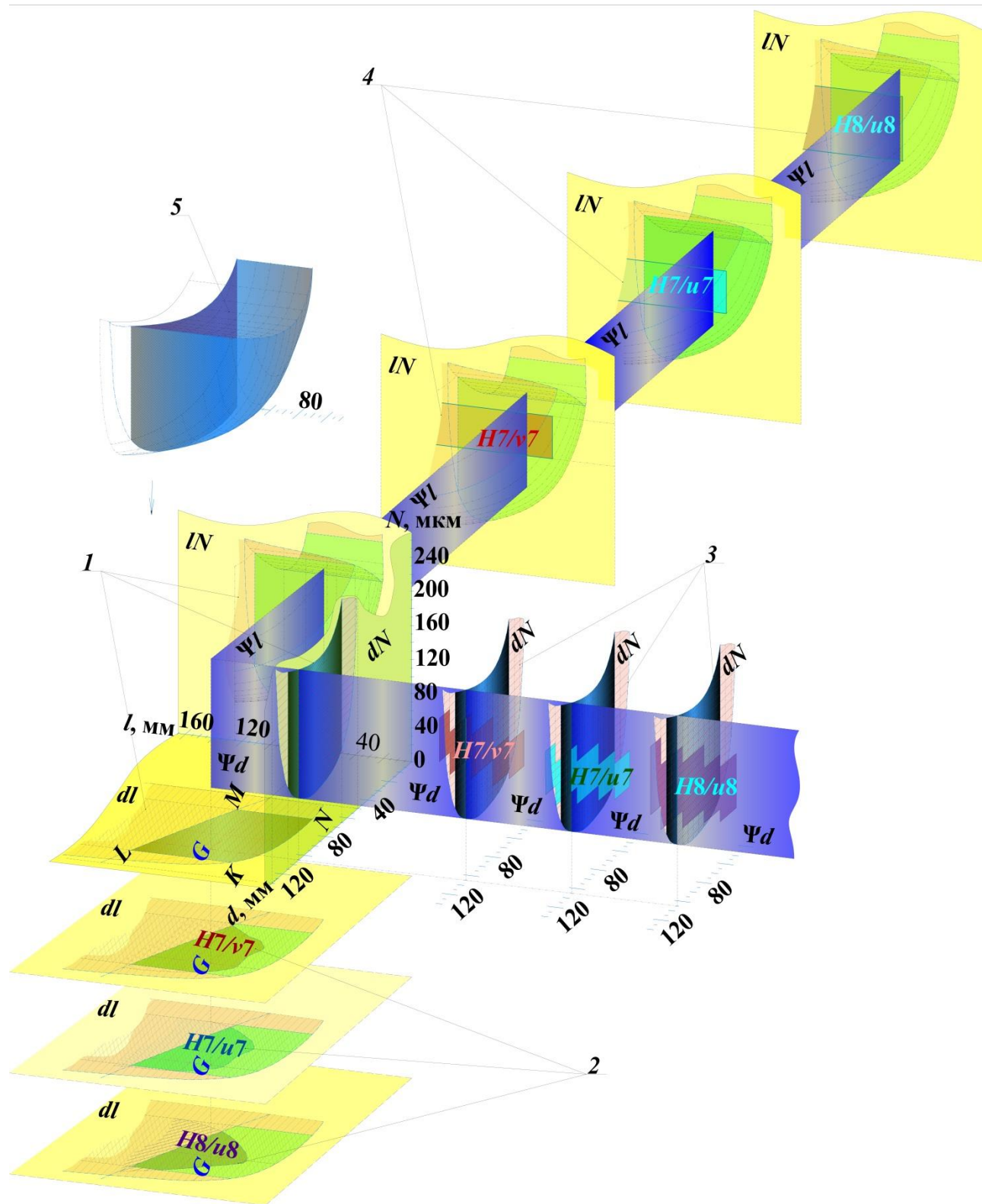


Рисунок 3. Просторовий образ часткової моделі ОІРПН та її проєкції з ЛММ у координатному квадранті dlN

1 – проєкції часткової моделі ОІРПН; 2 – проєкції ЛММ альтернативних посадок у координатній площині dl ; 3 – проєкції ЛММ альтернативних посадок у координатній площині dN ; 4 – проєкції ЛММ альтернативних посадок у координатній площині lN ; 5 – тривимірна часткова модель ОІРПН

На площину dN кожний ЛММ ($H7/v7$, $H7/u7$ і $H8/u8$) проєктуються у формі прямокутних східців залежно від інтервалу значень номінальних діаметрів, рекомендованих для відповідної посадки, що представляють області значень імовірнісних натягів $N_{i\min_k} \dots N_{i\max_k}$ k -ї посадки, де має знаходитися величина дійсного натягу N_f та має відповідати умові:

$$[N_{\min}]_i \leq N_{i\min_k} \leq N_f \leq N_{i\max_k} \leq [N_{\max}]_i. \quad (1)$$

На площину lN (відповідному значенні d_i) – у вигляді прямокутних плоских смужок постійної висоти з різницею значень імовірнісних натягів $N_{i\max_k} - N_{i\min_k}$ для кожної k -ї посадки, що беруть початок від l_{kpj} та не мають кінця у діапазоні $l_{kpj} \leq l_j \leq \infty$. На площину dl – у вигляді множин, що мають форми поверхонь з криволінійними границями, які при збільшенні кожного значення $l_j \rightarrow \infty$ мають нескінченість. В об'єктах кожної ЛММ k -х посадок, які обмежуються і вписуються у загальні проєкції ЛРЗ на координатних площинах dN , lN і dl , слід шукати раціональне проєктне рішення та відповідні його параметри. На координатну площину dN проєктуються лінія значень, що ортогонально перетинає проєкції січної поверхні з кривими лініями $[N_{\max}]$ і $[N_{\min}]$ допустимих граничних натягів часткової моделі ЛРЗ і ОІРПН (залежно від $l_{p\max}$ при $d=105\text{мм}$) та параметричні ЛММ альтернативних посадок постійної висоти з різницею значень імовірнісних натягів $N_{i\max_k}$ і $N_{i\min_k}$. Січна параметрична площина Ψd ортогонально перетинає проєкцію ЛРЗ і ОІРПН у координатній площині dN , аналогічно, таким самим чином, січна параметрична площина Ψl перетинає проєкцію часткової моделі у площині lN . Лінія ортогонального перетину січних площин Ψd і Ψl , з висотою, що дорівнює різниці граничних значень допустимих натягів $[N_{\max}] - [N_{\min}]$, при прийнятих на основі критерія призначення раціонального сполучення геометричних параметрів d_i і l_j , проєктується в точку $G(d_G, l_G)$ [298, 300, 301] на проєкційній моделі ЛРЗ (фігури $KLMN$), яка належить координатній

площині dl . Також ця лінія через центр групування G ортогонально прошиває проєкції кожного ЛММ k -х посадок, тобто це дозволяє призначити всі ці з'єднання залежно від прийнятих значень d і l .

Для розглянутого прикладу на основі запропонованого узагальненого критерію вибору раціонального конструкторського рішення з переліку альтернативних [298] залежно від геометричних посадкових параметрів d і l (при $d = 105\text{мм}$ і $l = 60\text{мм}$) на рис. 4 показана локалізація просторового параметричного ЛММ обраної k -ї посадки з натягом $H7/v7$ та його проєкцій на відповідні координатні площини.

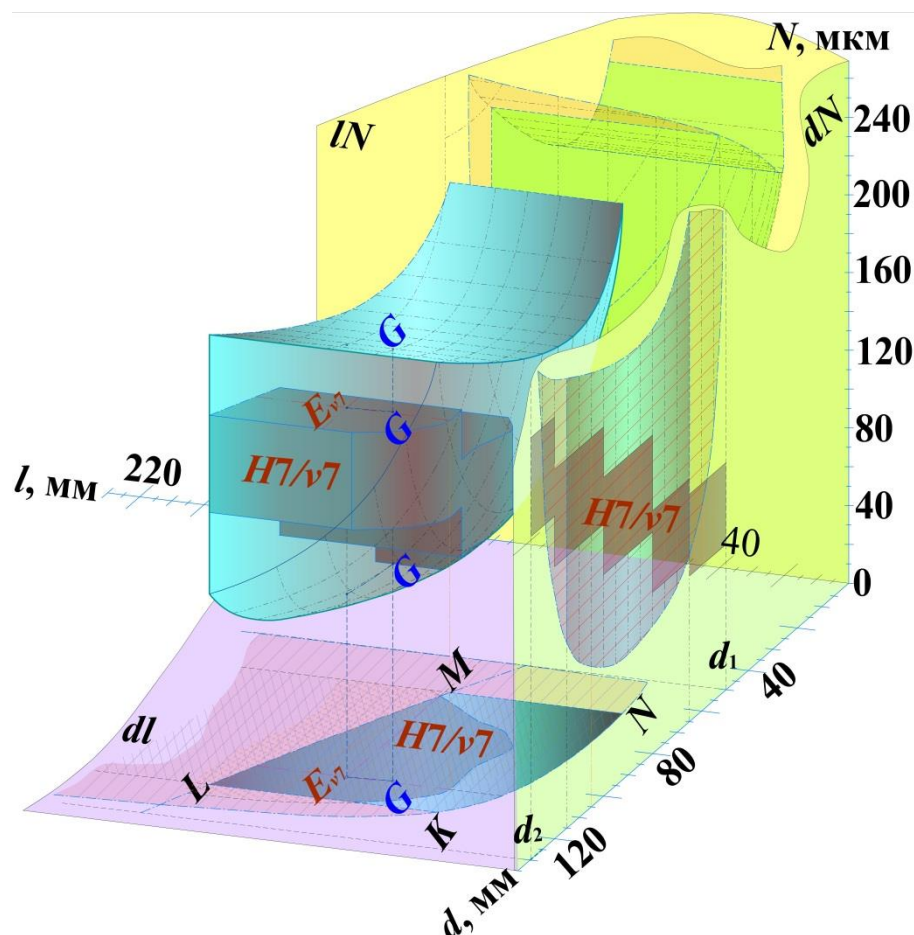


Рисунок 4. Локалізація параметричного ЛММ посадки з натягом $H7/v7$ в ЛРЗ і ОІРПН та їх проєкції у координатному квадранті dIN

Розглядуваний просторовий об'єкт ЛММ міститься всередині тривимірних ЛРЗ і часткової моделі ОІРПН у координатному квадранті dIN . Нагадаємо, суть

критерія полягає у визначенні найкоротшого відрізка GE_k від точки G (у межах проєкції ЛРЗ) до точки E_k (у межах проєкції ЛММ k -ї посадки), що проєктується на координатну площину dl . На поверхні просторового параметричного ЛММ посадки $H7/v7$ показано відрізок GE_{v7} , що наочно показує обґрунтованість прийнятого проєктного рішення з переліку альтернативних як раціонального.

На основі результатів автоматизованого проєктування за допомогою математичного просторового моделювання параметрів посадки з натягом маємо допустимі діапазони значень для визначення ефективності проєктування з'єднання та отримання фактичного натягу, що відповідають умові (1):

$$\left. \begin{aligned} [N_{\min}]_i \leq N_{\text{imin}_{H7/v7}} \leq N_f \leq N_{\text{imax}_{H7/v7}} \leq [N_{\max}]_i \\ 106,043 \text{ мкм} \leq 140 \text{ мкм} \leq N_f \leq 190 \text{ мкм} \leq 214,213 \text{ мкм} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Запропонований автором узагальнений комплексний метод визначення раціонального сполучення і взаємного впливу параметрів математичної моделі посадки з натягом при їх автоматизованому проєктуванні надає можливість наочно представити результати чисельних розрахунків у вигляді просторового геометричного образу. Такий підхід дозволяє всебічно оцінити ефективність та раціональність прийнятих параметрів посадки та проєктного рішення в цілому, а також, підвищити продуктивність процесу проєктування машин та якість конструкторсько-технологічної документації.