

Ю.А. ПОДВОЙСЬКИЙ, наук. співр., НТУ «ХПІ»;
П.С. ЗАВ'ЯЛОВ, канд. техн. наук, проф. НТУ «ХПІ»;
Ю.М. КУХТЕНКОВ, канд. техн. наук, ст. викл., НТУ «ХПІ»

УТОЧНЕННЯ АЛГОРИТМУ І ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПУЛЬСАЦІЙ ТИСКУ ВІД ВИХРОВИХ ДЖГУТІВ У ВІДСМОКТУЮЧІЙ ТРУБІ ГІДРОТУРБИНИ

Надано короткий опис математичної моделі, алгоритм і особливості розрахунків низькочастотних пульсацій тиску вихрових джгутів у відсмоктуючій трубі для прогнозування характеристик на основі даних експериментальних досліджень і зондування потоку в трубі за допомогою датчиків-зондів тиску для гідротурбін на напори 100-300 метрів.

Ключові слова: модель пульсації тиску, вихрові джгути, гідротурбіна, відсмоктуюча труба, гармоніки коливань швидкості.

Актуальність теми. Вібраційний стан у гідротурбінах у значному ступені залежить від пульсацій тиску (ПТ), які обумовлені рухом вихрових джгутів (ВД) за робочими колесами у відсмоктуючій трубі (ВТ). Силова взаємодія вихорів з елементами проточного тракту може призвести до серйозних аварій. У більшості ці вихрові джгути мають складну просторову гвинтову форму, тому для розрахунку пульсацій треба використовувати просторові математичні моделі. Математичні моделі для розрахунків низькочастотних пульсацій повинні бути досить простими і у той же час, достатньо повно відображати закономірності робочого процесу, забезпечуючи необхідну точність розрахунків амплітуд та частот пульсацій у ВТ гідротурбін з використанням геометричних параметрів джгута – ексцентриситету, діаметру й кута нахилу вихрової лінії. Метою даної роботи є уточнення прогнозування пульсаційних характеристик гідротурбін на основі просторової математичної моделі руху ВД у відсмоктуючій трубі і визначення її особливостей.

Просторова математична модель розрахунку пульсацій тиску у відсмоктуючій трубі. На основі узагальнення існуючих підходів і проведених експериментальних досліджень ставилася та була вирішена завдання розробки просторової математичної моделі розрахунку ПТ від довільного числа фізичних ВД рівної інтенсивності з рівним кроком у циліндричній ВТ [1 – 4].

Стінка відсмоктуючої труби моделюється вихровою поверхнею, яка складається з нескінченно великого числа тонких вихрових шнурів змінної інтенсивності з кроком, що дорівнює кроку фізичних вихрових джгутів, які мають форму гвинтової спіралі, або поверхнею джерел. Завдання розгляда-

ється у квазістаціонарній постановці, рідина вважається нев'язкою. Потік поза вихором при визначенні індукованих швидкостей приймається потенціальним. Ураховано також додатковий осесиметричний потік, обумовлений проходженням рідини через робоче колесо. Завдання зводиться до пошуку швидкостей у будь-якій точці відсмоктуючої труби.

Важливим моментом для розрахунку ПТ була підготовка вказаних вище геометричних параметрів вихрових джгутів. Вона здійснювалася на основі апроксимації даних, що були одержані з візуальних експериментів з фотографуванням вихрових джгутів і з використанням датчика-зонда тиску.

Для вихрових джгутів гідротурбін на основі експериментів були одержані наступні поліноміальні залежності відносного ексцентриситету \bar{e} , відносного діаметра $\bar{d}_{ж}$, а також кута нахилення вихрової лінії $\beta_{ж}$ у полі універсальної пульсаційної характеристики у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \bar{e}(n'_1, Q'_1) &= A_0 + A_1 Q'_1 + A_2 Q_1'^2 \\ \bar{d}_{ж}(n'_1, Q'_1) &= B_0 + B_1 Q'_1 + B_2 Q_1'^2 \\ \beta_{ж}(n'_1, Q'_1) &= 90^\circ(1 - C_1 Q'_1 + C_2 Q_2'^2 + C_3 Q_3'^3) \end{aligned} \right\}$$

де $A_0, A_1, A_2, B_0, B_1, B_2, C_1, C_2, C_3$ – змінні коефіцієнти, що є поліномами від n'_1 ; параметри $\bar{e}, \bar{d}_{ж}, \beta_{ж}$ визначалися з фізичних експериментів або за допомогою приблизних емпіричних залежностей типу

$$\bar{e} = (4|(\bar{Q}'_1 - \bar{n}'_1)|\bar{Q}'_1 + 1) / (4 + |(\bar{Q}'_1 - \bar{n}'_1)|\bar{Q}'_1), \quad \beta_{ж} = 90(1 - k\sqrt{\bar{e}}), \quad k = 0,7 - 0,9,$$

які теж були одержані на основі модельних експериментів для гідротурбін РО115–170.

Визначення циркуляції за робочим колесом здійснювалося на основі спрощеної осередненої осесиметричної задачі з урахуванням робіт *Етинберга І.Е.* і *Гольдіна Б.* [5].

Особливості використання математичної моделі для розрахунку пульсацій тиску від вихрових джгутів. Для знаходження інтенсивності вихрової поверхні відсмоктуючої труби $\gamma(\alpha_2)$ у розрахунковому перетині пропонується її модель у вигляді усіченого ряду Фур'є. Ступінь усікання полягає в обмеженому числі членів цього ряду до $n = 10$ гармонік. Із граничних умов *непротікання*, записаних для ряду точок поперечного перерізу ВТ у розрахунковому перетині, складена перепевна система лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) в матричному вигляді. Вона записується як

$$A\bar{x} = \bar{b}, \quad \text{де } \bar{x} - \text{вектор невідомих коефіцієнтів Фур'є.}$$

Метод найменших квадратів (МНК) приводить до узагальненої системи

$$\tilde{A}x = \tilde{A}b,$$

де \tilde{A} – транспонована матриця, а $\tilde{A}A$ – квадратна матриця розміру $2n \times 2n$,

незалежно від того, як сильно була перевизначена система.

Значимо, що знайдений із цієї системи узагальнений розв'язок не обов'язково повинен задовольняти першій системі через неточність вихідних даних, а саме коефіцієнтів матриці A і вільних доданків b . Крім того, при введенні інформації в ЕОМ, виникають похибки перекладу з однієї системи в іншу, обчислення елементарних функцій, використання обчислювальних алгоритмів, оскільки всі обчислення проводяться з округленням. Тому завжди виходить наближений розв'язок x , точність якого нас може не влаштувати.

Тоді $\bar{x} = \bar{x}_1 + \bar{z}$, де \bar{z} – є уточнення розв'язку, а \bar{x}_1 – перше наближення до розв'язку. Маємо

$$A(\bar{x}_1 + \bar{z}) = \bar{b} \text{ і при цьому } A\bar{x}_1 + A\bar{z} = \bar{b}, \text{ звідки } A\bar{z} = \bar{b} - A\bar{x}_1,$$

де розбіжність між правою частиною \bar{b} і наближеною лівою частиною $A\bar{x}_1$ назвемо *нев'язкою* наближеного розв'язку \bar{x} , точніше *вектор-нев'язкою*, і позначимо цей вектор \bar{r}_1 . Тоді замість вихідного рівняння будемо мати рівняння $A\bar{z} = \bar{r}_1$ для уточнення до наближеного розв'язку.

Оскільки звичайно модуль \bar{r}_1 набагато менше модуля правої частини \bar{b} , то отримане нове рівняння вдається розв'язати вже з більш високою абсолютною точністю, тому відносна точність наближеного розв'язку \bar{x}_1 повинна підвищуватися [6].

Апроксимація розв'язку системи лінійних рівнянь виконується за методом найменших квадратів з вагами [7]. При уточненні розв'язку системи $A\bar{x} = \bar{b}$ не всі невязки однаково рівнозначні. Щоб зрівняти вагомість невязок для методу найменших квадратів, необхідно користуватися цим методом з урахуванням ваги точок даних. Замість того щоб вирішувати завдання

$$\min_x \sum_{i=1}^p (\bar{b} - A\bar{x})_i^2, \text{ щодо параметрів } x, \text{ ми будемо вирішувати завдання}$$

$$\min_x \sum_{i=1}^p w_i (\bar{b} - A\bar{x})_i^2, \text{ де } w_i - \text{ вага, що відбиває важливість точок даних, тобто}$$

кожній невязці можна приписати її вагу. Якщо помилка i -го рівняння e_i , то вибираємо $w_i = 1/e_i^2$. Усі програми, використовувані для розв'язку незваженої задачі МНК, можна використовувати для розв'язку зважених завдань. Для цієї мети необхідно зробити масштабування правої частини системи \bar{b} -та матриці коефіцієнтів A , тобто потрібно кожний рядок матриці A і рядок вектора \bar{b} помножити на вагу w_i , а потім розв'язати наступне завдання мінімізації:

$$\min_x \sum_{i=1}^p (\bar{b}_w - A_w \bar{x})_i^2 = \min_x (\bar{b} - A\bar{x})^T \bar{w} (\bar{b} - A\bar{x}) .$$

Так вага w_i була взята зворотною величиною до квадрата нев'язки для кожного i -го рядка системи, $w_i = 1 / (b_i - \sum_{j=1}^{2n} A_{i,j} x_j)^2$, де i – фіксується й змінюється від 1 до p , а j – від 1 до $2n$, де n – число гармонік, p – число рівнянь.

Тоді коефіцієнти в новій системі будуть визначатися з вагами $w_i = 1/e_i^2$,

$$(b_w)_i = b_i / (b_i - \sum_{j=1}^{2n} A_{i,j} x_j)^2, \text{ а } (A_w)_i = A_{i,j} / (b_i - \sum_{j=1}^{2n} A_{i,j} x_j)^2 .$$

Замість вихідної системи $A\bar{x} = \bar{b}$ необхідно вирішувати систему $A_w \bar{x} = \bar{b}_w$ зі зваженими на нев'язки коефіцієнтами. МНК із вагами був реалізований програмно мовою Фортрана і отримана пульсаційна характеристика для модельної турбіни PO230, рис. 1.

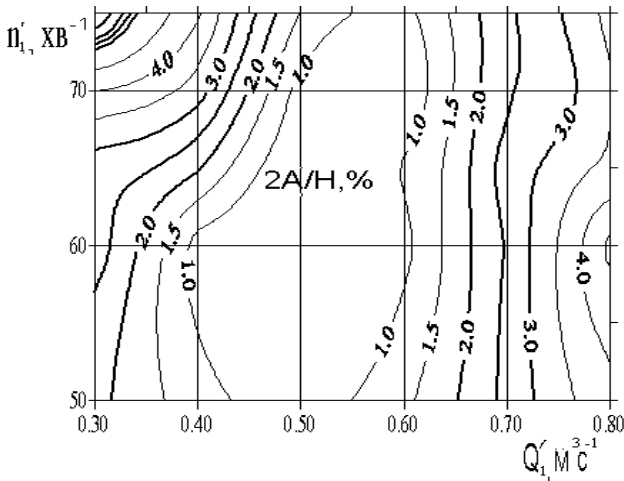


Рис. 1 – Пульсації тиску в трубі турбіни PO230 з рівняння Бернуллі по МНК з вагами.

Розв'язок системи $A\bar{x} = \bar{b}$ рівносильний відшукуванню мінімуму квадрата нев'язки $|A\bar{x} - \bar{b}|$, тобто мінімуму функції

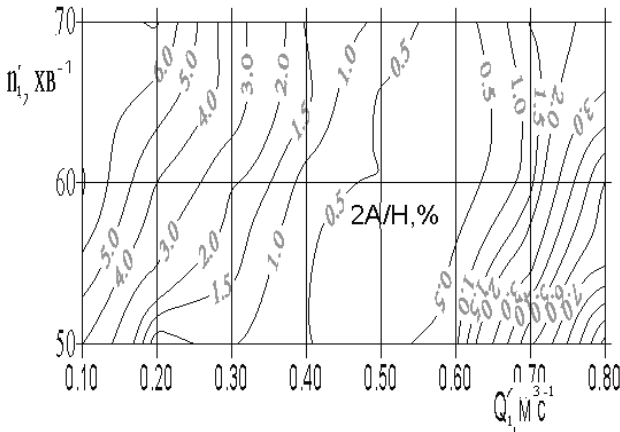
$$F(x_1, x_2, \dots, x_N) = |A\bar{x} - \bar{b}|^2, \text{ або } F(\bar{x}) = |A\bar{x} - \bar{b}|^2,$$

де \bar{x} (коефіцієнти Фур'є) – це вектор (x_1, x_2, \dots, x_N) . Для знаходження міні-

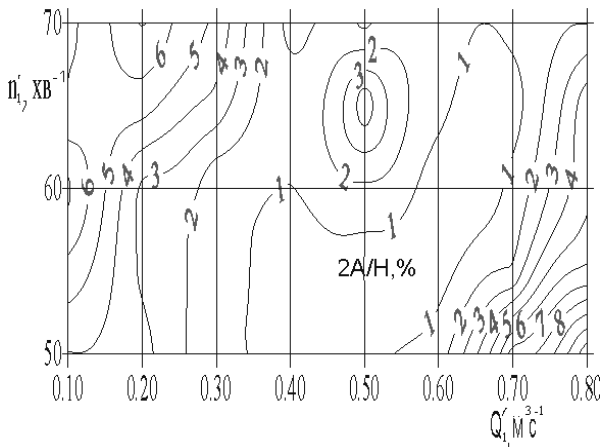
муму функції n – змінних, у нашому випадку $N = 20$, оскільки ми беремо $N = 2n$, $n = 10$ гармонік, застосовувався метод покоординатного спуску [8].

Для порівняння з отриманими результатами оптимізації використовується другий метод: метод прямого пошуку. Програма прямого пошуку є перекладом на мову Фортран Алгол-програми (178b) із [9].

Розрахунки проводилися для моделі гідротурбіни PO230 рис.2.



а



б

Рис. 2 – Пульсації тиску в трубі турбіни PO230 з рівняння Бернуллі:
а – отримано методом прямого пошуку; б – методом покоординатного спуску.

Порівняння методів пошуку оптимальних значень коефіцієнтів усіченого ряду Фур'є [10]. Метод покоординатного спуску не завжди дозволяє

знайти оптимальний розв'язок. Він добре працює у випадку нескладних цільових функцій, коли лінії рівня близькі за формою до окружностей або еліпсів. Якщо в цільову функцію входять члени, що містять добутки змінних $(x_1 x_2)$, то цей алгоритм працює погано. Якщо осі еліпсів нахилені до осей координат вихідної системи координат, то обчислювальна ефективність методу знижується через збільшення числа кроків пошуку й росту числа обчислень. Цей метод годиться для використання на перших стадіях розв'язку завдання, потім потрібно використовувати більш складні методи. До позитивних якостей методу покоординатного спуска відноситься можливість використання одномірних методів пошуку, таких як, наприклад, *метод золотого перетину*.

Цей метод не пристосований до пошуку глобального оптимуму, у той час як оптимізація нев'язки при розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь є багатоекстремальним завданням. Перш ніж користуватися цим методом, бажане переконатися, що лінії рівня цільової функції не мають точок зламу, що характерно для типу рельєфу цільової функції, який називають *яружним*.

Метод прямого пошуку Хука-Дживса більше використовує апріорні відомості про завдання й мають пам'ять, тобто зсуви в області змінних, які виявилися вдалими, фіксуються й потім використовуються у пошуку надалі, чого немає в методі покоординатного спуска. Метод прямого пошуку має велику тактичну гнучкість, оскільки, якщо він заходить у глухий кут, то повертається до найбільш удалої з колишніх базових спроб і змінює крок і напрямки пошуку. Тому він більш пристосований до пошуку глобального оптимуму. На практиці метод спуска є більш повільним, ніж метод прямого пошуку. Обидва методи не вимагають знаходження частинних похідних в аналітичному вигляді, оскільки диференціювання може збільшити складність завдання і ймовірність помилок при його реалізації.

Уточнення коефіцієнтів Фур'є було зроблено по методу прямого пошуку й методу покоординатного спуска. З'явилася можливість порівняти результати обох методів при розрахунках пульсацій тисків по *рівнянню Бернуллі* з експериментальними значеннями у полі універсальної характеристики.

На режимі $Q'_1 = 0,3 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ і $n'_1 = 60 \text{ хв}^{-1}$ прямий пошук дає пульсації тисків 2,25%, експеримент – 2,55%, покоординатний спуск – 1,8%. При $Q'_1 = 0,3 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ і $n'_1 = 65 \text{ хв}^{-1}$, маємо відповідно, – 3,65%, 3,5% і 3,35%. При $Q'_1 = 0,4 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ і обертах $n'_1 = 60 \text{ хв}^{-1}$ маємо – 0,8%, 1,3% і 1%. При $Q'_1 = 0,4 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ і $n'_1 = 65 \text{ хв}^{-1}$ – 1,6%, 1,4% і 1,5%.

З порівняння цих результатів вбачаємо, що найбільше близькі до експерименту результати дає метод прямого пошуку. Щоб зменшити рівень осциляції графіку $\gamma(\alpha_2)$ напруженості вихрової поверхні відсмоктуючої труби в розрахунковому перетині застосуємо σ -метод Ланцоша усікання ряду

Фур'є [11].

Припускаємо, що напруженість вихрової поверхні відсмоктуючої труби в розрахунковому перетині $\gamma(\alpha_2)$ є функцією безперервною й періодичною, тому можливо її розкладання в ряд Фур'є:

$$\gamma(\alpha_2) = -\frac{\Gamma}{R\pi} + \sum_{k=1}^{\infty} x_k \cos k\alpha_2 + \sum_{k=1}^{\infty} x_{k+n} \sin k\alpha_2, \text{ де } \omega = 2\pi/T$$

– це основна частота розкладання, а T – період. Попереднє розкладання – окремий випадок цього розкладання, коли $\omega = 1$, тобто $T = 2\pi$. Тоді $\omega_k = k\omega = 2\pi k/T = 2\pi/(T/k)$ – це набір частот гармонійних коливань, що становлять $\gamma(\alpha_2)$ із періодами $T, T/2, T/3, \dots, T/N$, і частотами $2\pi/T, 2\pi/(T/2), 2\pi/(T/N)$. Оскільки $T = 2\pi$, маємо періоди $2\pi, 2\pi/2, \dots, 2\pi/N$ й частоти $1, 2, 3, \dots, N$. У залишку ряду Фур'є головної є гармоніка з періодом $T/(N+1)$ і частотою

$$\omega_{N+1} = (N+1)\omega = 2\pi(N+1)/T = 2\pi/(T/(N+1))$$

або періодом $T/(N)$ і частотою

$$\omega_N = (N)\omega = 2\pi(N)/T = 2\pi/(T/(N)) \text{ при } T = 2\pi.$$

Тому, якщо ми з розкладання заберемо останню N -ту гармоніку, ми перейдемо від повного ряду Фур'є до усіченого, що складається з $(N-1)$ гармоніки. Щоб забрати із суми гармонік яку-небудь гармоніку, необхідно проінтегрувати цю суму по інтервалу, рівному періодові цієї гармоніки. Тоді інтеграл, як площа під цією гармонікою дорівнює нулю через її періодичність. Оскільки інтенсивність вихрової поверхні не може бути сильно осциляційною, необхідно зменшити ефект цих пульсацій. Зниження пульсацій $\gamma(\alpha_2)$ досягається за рахунок згладжування її усіченого ряду по періоду $T/(N)$ його останнього N -го залишеного доданку. Це згладжування являє собою інтегрування (усереднення) по періоду $T/(N)$ ряду Фур'є. Як наслідок, одержимо:

$$\gamma(\alpha_2) = -\frac{\Gamma}{R\pi} + \sum_{k=1}^N \sigma(N,k)(x_k \cos k\omega\alpha_2 + \sum_{k=1}^N \sigma(N,k)x_{k+n} \sin k\omega\alpha_2),$$

де $\sigma(N,k) = \sin(\pi k/N)/(\pi k/N)$ – це сігма-множники для ряду Фур'є.

Якщо $k = N$, то $\sigma(N,N) = \sin(\pi N/N)/(\pi N/N) = 0$.

Таким чином, вибирається з ряду остання N -а гармоніка, залишок ряду втрачає свою провідну гармоніку й повний ряд Фур'є зближається зі своїм усіченим, і при цьому зменшуються пульсації інтенсивності $\gamma(\alpha_2)$. У силу такого підходу ми всю інформацію про залишок ряду переносимо на перші його $N-1$ гармоніки.

У теорії спектрального аналізу сигналів цей підхід трактується як спо-

стерезення сигналу через вузьке просвітчаєтє прямокутне вікно завширшки $T/(N)$, так зване *спектральне вікно*. Через це вікно проглядається весь ряд Фур'є у вигляді свого усередненого відрізу. Тоді згладжений усічений ряд Фур'є і похідні ряду Фур'є будуть помножені на відповідні сигма множники. Цей підхід реалізований у вигляді окремої програми мовою Fortran.

Алгоритм розрахунків пульсацій тиску у відсмоктуючій трубі турбіни. Цей алгоритм зводиться до наступних кроків:

– підготовка даних для розрахунку режимних і геометричних параметрів – Q'_{10} , n'_{10} , $\Delta Q'_1$, $\Delta n'_1$, R , R_{2BT} , \bar{e} , $\beta_{ж}$, $\bar{d}_{ж}$, кроку, числа витків вихрових джгутів та інших;

– визначення інтенсивності фізичних вихорів Γ_{2BT} з розв'язку осесиметричної задачі на вихідній кромці лопаті; обчислення компонент швидкостей фізичних вихорів;

– формування елементів матриці перевизначеної системи лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення коефіцієнтів x_k і x_{k+n} , які використовуються у функції напруженості вихрового кулі $\gamma(\alpha_2)$; формування нормальної системи рівнянь $\tilde{A}x = \tilde{A}b$; обчислення коефіцієнтів x_k і x_{k+n} з рішення перевизначеної системи методом Гауса; обчислення функції $\gamma(\alpha_2)$;

– розрахунок компонент швидкостей рідини від вихрової поверхні, або поверхні джерел, які моделюють стінку відсмоктуючої труби; обчислення сумарних швидкостей від фізичних вихорів, вихрової поверхні й складових швидкостей додаткового осесиметричного потоку через турбіну; вибір екстремальних значень V_{max} і V_{min} ;

– розрахунок амплітуд пульсацій тиску з інтегралу Бернуллі; обчислення частот обертання вихрових джгутів і частот пульсацій тиску; побудова сумарної пульсаційної характеристики.

Програми для визначення пульсацій тиску складені на мові Фортран і в середовищі Mathcad. Одержані прогностні пульсаційні характеристики для турбін PO115, PO230, PO310 розробки ВАТ «Турбоатом». Отриманий рівень пульсацій тиску є допустимим і гарантує надійну роботу гідротурбін.

Висновки. Робота спрямована на створення обґрунтованої методики чисельного прогнозування джгутових пульсацій тиску у відсмоктуючій трубі гідротурбіни на основі просторової математичної моделі, проведення комплексу експериментів по визначенню геометричних параметрів вихрових джгутів, що дозволило знайти для них аналітичні вирази.

Застосування спрощеної осесиметричної задачі дає можливість розраховувати інтенсивність вихрових джгутів з урахуванням геометрії вихідної кромки лопаті через циркуляцію у втулкових перетинах робочого колеса. Прове-

дене порівняння циркуляції, що була отримана на основі розрахунків, з циркуляцією, що була здобута із зондових випробувань, свідчить про задовільне їх узгодження.

Методи поліпшення нев'язки при розв'язанні системи лінійних алгебраїчних рівнянь – метод найменших квадратів з вагами, методи покоординатного спуску і прямого пошуку при знаходженні інтенсивності вихрової поверхні $\gamma(\alpha_2)$, що моделює стінку відсмоктуючої труби, дають приблизно однаково розбіжність розрахованої пульсаційної характеристики з експериментальною становить 0,3%, що і є допустимим.

Список літератури: 1. Григорьев В.Н. Определение пульсаций давления в отсасывающей трубе под действием вихря за рабочим колесом гидротурбины // Энергомашиностроение. – М., 1968. – №9. – с.42-44. 2. Зав'ялов П.С. Математичне моделювання низькочастотних пульсацій тисків від декількох вихрових джгутів за робочими колесами гідротурбін і оборотних гідромашин // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: – 1997. – С. 448-453. 3. Зав'ялов П.С., Кухтенков Ю.М., Подвойський Ю.А. Прогнозування пульсацій тисків від декількох вихрових джгутів за робочим колесом РО гідротурбіни // Вісник НТУ «ХПІ». – Х., 2001. – Вип. 129. – Ч.1. – С. 95-104. 4. Зав'ялов П.С., Кухтенков Ю.М., Подвойський Ю.А., К методу расчета пульсационных характеристик от вихревых жгутов за рабочим колесом гидротурбины // Проблемы машиностроения, №2. –Х., 2003. – С. 84-92. 5. Єтінберг І.С., Раухман Б.С. Гидродинамика гидравлических турбин. – Машиностроение. – Л., 1978. – 279 с. 6. Мышкис А.Д. Математика для вузів. «Наука». – М., 1971. – 632 с. 7. Каханер Д., Моулер К., Ней С. Чисельні методи й програмне забезпечення. – М.: Мир. – 2001. – 256 с. 8. Мудров А.Е. Чисельні методи для ПЕВМ на мовах Бейсик, Фортран, Паскаль. – М, 1985. - 335 с. 9. Бібліотека алгоритмів. Довідковий посібник. – М.: Радіо й зв'язок, 1981. – Вып.4. – 158 с. 10. Банди Б. Методи оптимізації. – М.: Радіо й зв'язок, 1988. – 127 с. 11. Ланцюг К. Практичні методи прикладного аналізу. Держвиддавництво фізмат літератури. – М. 1961. – 267 с.

Надійшла до редколегії 20.05.2013

УДК 621.224

Уточнення алгоритму і особливості розрахунку математичної моделі пульсацій тиску від вихрових джгутів у відсмоктуючій трубі гідротурбіни / Ю. А. Подвойський, П. С. Зав'ялов, Ю. М. Кухтенков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – №37 (1010). – С. 161 – 169. Бібліогр.: 11 назв.

Даны краткое описание математической модели, алгоритм и особенности расчётов низкочастотных пульсаций давления вихревых жгутов в отсасывающей трубе для прогнозирования характеристик на основе данных экспериментальных исследований и зондирования потока в трубе с помощью датчиков-зондов давления гидротурбин на напоры 100-300 метров.

Ключевые слова: модель пульсации давления, вихревые жгуты, гидротурбина, отсасывающая труба, гармоника колебаний скорости.

Provided a brief description of the mathematical model, algorithm and calculation features low-pressure fluctuations in the vortex suction tube bundles for predicting performance based on experimental studies and probing flow in a pipe using pressure sensors, probes for the hydraulic pressure to 100-300 meters.

Key words: model pulsation pressure vortex bundles, hydraulic, suction pipe, harmonic oscillation speed.