

УДК 623.004.67

С.Л. Котлярова, В.В. Романашенко, П.А. Саприкіна

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИТРАТОМІРІВ ПРИ СКЛАДНИХ КІНЕМАТИЧНИХ СТРУКТУРАХ ПОТОКУ

В статті розглянуті особливості імітаційного методу дослідження метрологічних характеристик електромагнітних витратомірів при складному профілі потоку. Приведені вирази для поверхневих вагових функцій при граничних режимах течії: турбулентному і ламінарному.

**Ключові слова:** електромагнітні витратоміри; магнітне поле; кінематична структура потоку; об'ємна вагова функція.

### Вступ

**Постановка задачі.** При дослідженні метрологічних характеристик електромагнітних витратомірів імітаційним методом, який називають також непрямым, основна проблема полягає у вимірюванні магнітного поля в каналі. Недостатньо зміряти магнітне поле в невеликій локальній області (наприклад, в центрі каналу), необхідно мати повну інформацію про його значення і топографію у всій робочій зоні каналу. Крім того, необхідно враховувати геометрію каналу і розподіл швидкості потоку.

**Аналіз літератури** У роботах [1,2] отриманий вираз для сигналу витратоміру через "поверхневу вагову функцію".

**Метою статті** є дослідження електромагнітних витратомірів імітаційним методом, що володіє простотою виконання вимірювань і достатньою точністю отриманого результату.

### Основний матеріал

Вимірювання розподілу неоднорідного магнітного поля традиційними методами (за допомогою теслометра) виявилось практично нездійсненним із-за складності вимірювань і низької точності отриманого результату. Спроби виключити необхідність вимірювання магнітного поля, орієнтуючись на розрахункове його визначення, також виявились безрезультатними. Неоднорідність розподілу магнітного поля в каналі залежить від багатьох чинників, деякі з них важко контролювані, наприклад, щільність намотування котушок індуктора, магнітні властивості матеріалу трубопроводу, неточність виготовлення і збірки магнітопровода, якість збірки первинного перетворювача в цілому і ін. Два прилади навіть одного і того ж серію і типорозмера, виготовлені за однією і тією ж технологією, можуть істотно відрізнитися по функції розподілу індукції магнітного поля в каналі.

Необхідне принципово інше рішення задачі дослідження електромагнітних витратомірів імітаційним методом, що володіє простотою виконання вимірювань і достатньою точністю отриманого результату.

Оскільки магнітне поле можна описати скалярним магнітним потенціалом, який однозначно визначається своїм значенням на поверхні каналу або площини, що проходить через вісь каналу і лінію, що сполучає електроди, то сигнал  $U$  витратоміру можна записати у вигляді

$$U = v_0 \int_S B_n G_1 dS,$$

де  $G_1$  – поверхнева вагова функція, залежна від кінематичної структури потоку;  $B_n$  — нормальна до поверхні  $S$  компонента магнітного поля;  $v_0$  — середня швидкість потоку. Введення поняття "Поверхневої вагової функції" дозволило описати сигнал витратоміру при істотно меншому об'ємі необхідної інформації про магнітне поле в робочій зоні каналу і, тим самим, не тільки відкрити реальну можливість дослідження електромагнітних витратомірів безпроливним способом, але і істотно спростити їх розрахунок.

Для вимірювання магнітного поля в робочому об'ємі каналу була запропонована конструкція перетворювача магнітного поля (зонда), що є спеціальною плоскою індукційною котушкою, що розташовується в каналі на внутрішній поверхні каналу або в площині осі каналу і лінії, що сполучає електроди.

Фізичною основою створення перетворювача магнітного поля у вигляді поверхневої або плоскої індукційної котушки з'явилась можливість відновити характеристику магнітного поля у всьому робочому об'ємі каналу по характеристиці розподілу на вказаних поверхнях.

Якщо витки котушки розподілені по лініях поверхневої вагової функції  $W_n$ , а котушка поміщена в канал в площині, що проходить через вісь каналу і лінію, що сполучає електроди, то напругу, що індуктується в котушці, пропорційно напрузі, що виникає між електродами при русі потоку рідини з відповідним розподілом швидкості. Таким чином, імітаційна модель з перетворювачем магнітного поля у вигляді плоскої індукційної котушки, виконаної по поверхневій ваговій функції, дозволяє моделювати прилади різної конструкції при різних гідродинамічних режимах і структурах потоку.

Підкреслимо цінність можливості моделювання за допомогою зонда поверхневої вагової функції витратоміру. Остання залежить від геометрії каналу, кінематичної структури потоку, розподілу фазового складу вимірюваного середовища в каналі, рівня заповнення рідиною каналу при безнапірному потоці. Отже, безпроливним методом можна досліджувати метрологічні характеристики витратоміру при зміні кожного з перерахованих чинників окремо або всіх їх разом. Для цього досить застосувати зонд, виконаний з урахуванням тієї поверхневої вагової функції, яка відображає який-небудь досліджуваний чинник або їх сукупність.

Розглянемо докладніше можливість дослідження електромагнітних витратомірів імітаційним методом при складних кінематичних структурах потоку, коли дослідження за допомогою проливних витратомірних установок із-за складності і дорожнечі вживаного устаткування практично нереальні, особливо у разі витратомірів великого діаметру.

Відомо, що розвиток і вдосконалення електро- і теплоенергетичних об'єктів, рішення питань захисту екологічного середовища вимагають все більш точних і надійних засобів вимірювань витрати води і теплоносіїв на основі води в напірних трубопроводах. Вимірювання витрати електропровідних середовищ з складною структурою потоку, що часто змінюється, кінематичною, необхідне і при рішенні технологічних задач в хімічній і металургійній промисловості, при виробництві засобів мікроелектроніки і ін.

Сигнал, що порушується на електродах електромагнітного витратоміру, визначається розподілом швидкості потоку по поперечному перетину каналу, усередненим з так званою об'ємною ваговою функцією, залежною тільки від геометрії каналу витратоміру. Ця властивість не характерна для інших перетворювачів витрати, в яких вимірюваною величиною найчастіше є локальна швидкість потоку.

Відмінності умов вимірювання в трубах малого (20...80 мм) і великого (200...2000 мм) діаметрів приводять до різних кінематичних структур потоку в робочому об'ємі витратоміру.

Витратоміри малого діаметру майже завжди можна встановити достатньо далеко від трубопровідної арматури, і профіль потоку в трубах малого діаметру з високим ступенем точності можна вважати осесиметричним. Проте вимога переходу до діапазону 1 : 1000 неминуче приводить до перебудови профілю швидкості усередині допустимого діапазону витрат.

Потоки в трубах великого діаметру завжди турбулентні. Тут витратоміри часто потрібно встановити поблизу трубопровідної арматури. Профіль швидкості істотно асиметричний. Такі потоки характерні для магістральних, дериватів, розподільних і технологічних трубопроводів, що поставляють воду від насосних станцій до енергетичної системи, що діє, або відвідних від неї воду.

Потоки, як правило, протікають при температурі 5...35 °С, проте в системах теплопостачання температура рідкого теплоносія може досягати 150...180 °С. У холодній воді можлива незначна кількість піску, мула, водоростей і навіть дрібної риби. Як правило, для зниження кількості домішок на всмоктуючій частині насоса ставлять фільтри. Швидкість рідини не перевищує 1,5...3,5 м/с, причому, чим більше діаметр трубопроводу, тим нижче номінальна швидкість потоку.

Трубопроводи малих і середніх діаметрів (400...1200 мм) виготовляють зазвичай із сталі, а великих діаметрів — із залізобетону. Їх прокладають під землею на глибині 2...3 м від її поверхні. Доступ для установки витратомірів зазвичай можливий в найбільш незручному для вимірювань місці: у зігнутого відведення трубопроводу від насоса, підведення до якого-небудь агрегату, відстійника, баку або усередині колодезя, де розташована замочна засувка, дисковий затвор, зворотний клапан або відвідний трійник. Як відомо, розподіл швидкості потоку тут часто має істотно асиметричну епіюру. Крім того, в цих місцях обмежений доступ до трубопроводу, оскільки він зазвичай лежить безпосередньо на бетонній підставі або близько примикає до агрегату. За межами приміщень, на горизонтальній і прямолінійній ділянці трубопроводу, де епіюра розподілу швидкості осесиметрична, установка витратоміру утруднена необхідністю виконання будівельно-монтажних робіт по розтині трубопроводу і організації обслуговування приладу.

Електромагнітні витратоміри дозволяють вимірювати витрату при складних структурах потоку, що створюються достатнім заповненням каналу вимірюваним середовищем; неоднорідним розподілом фазового складу при вимірюванні вугільних, піскових пульп і суспензій; зміною розподілу швидкості по перетину каналу близько розташованою трубопровідною арматурою і ін. Для дослідження електромагнітних витратомірів в таких умовах необхідне спеціальне метрологічне забезпечення. Пролівні витратомірні установки, відтворюючи необхідну структуру потоку, у край складні і дорогостоящи. Перевірку електромагнітних витратомірів при складних структурах потоків можна здійснювати методом імітаційного моделювання.

Сигнал  $U$  електромагнітного витратоміру є функціоналом розподілів магнітного поля і швидкості рідини. Зважаючи на магнітогідродинамічну взаємодію, розподіл швидкості визначається тільки гідродинамікою і для даного завдання вважається заданим. Явна залежність сигналу  $U$  від вказаних розподілів має вигляд

$$U = \int_{\tau} \mathbf{v} \left[ \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{r}} \times \mathbf{B} \right] d\tau, \quad (1)$$

де  $\mathbf{v}$  – швидкість потоку;  $\mathbf{B}$  – індукція магнітного поля;  $\mathbf{r}$  – радіус-вектор;  $d\tau$  – елемент об'єму;  $\mathbf{g}(\mathbf{r})$  – об'ємна вагова функція, яка в циліндрових координатах має вигляд

$$g(z, \rho, \theta) = \int_0^{\infty} \cos kz \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m \frac{I_n(k\rho)}{r I_n(kr)} \sin \theta dk; \quad (2)$$

$n = 2m + 1.$

Тут  $I_n(k\rho)$  — модифікована функція Бесселя,

$$I'_n(kr) = \left. \frac{dI_n(k\rho)}{d\rho} \right|_{\rho=r}, \quad r - \text{радіус каналу.}$$

Припускаємо, що електроди знаходяться в точках з координатами  $\rho = r, z = 0, \theta = \pm\pi/2$ .

Із залежності (1) виходить, що об'ємна вагова функція характеризує внесок в сигнал витратоміру потенціалів, що індукуються потоком рідини в магнітному полі індуктора в різних точках каналу.

Інтеграл по  $k$  у виразі (2) можна представити як суму вирахувань подынтегрального виразу по полюсах, що є нулями функції  $I'_n(kr)$ . Обмежившись вирахуваннями в нулях з мінімальними значеннями  $|k|$ , отримаємо наближений вираз

$$g(z, \rho, \theta) = \frac{e^{-|z|/r} \left(1 - \rho^2 / r^2 e^{-2|z|/r}\right) \sin \theta}{1 + 2\rho^2 r^{-2} e^{-2|z|/r} \cos 2\theta + \rho^4 / r^4 e^{-4|z|/r}}.$$

Оскільки скалярний магнітний потенціал  $A$  ( $\mathbf{B} = \text{grad}A$ ) задовольняє рівнянню Пуассона, то найбільш загальний вираз для нього в каналі витратоміру можна записати у вигляді

$$A(z, \rho, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikz} \sum_{n=0}^{\infty} \left[ a_n(k) \cos n\theta + b_n(k) \sin n\theta \right] \frac{I_n(k\rho)}{I_n(kr)} dk.$$

Сигнал витратоміру характеризується тій складовій магнітного поля, яка визначається лише коефіцієнтами  $a_n(k)$ . Тому для виразу сигналу через нормальну складову  $H(z, y)$  магнітного поля до площини  $S\{z, y\}$ , що проходить через електроди і вісь труби, досить отримати співвідношення  $a_n = f_n(H(z, y))$ , де  $f_n$  — функціонал від цієї складової.

Відмітимо, що

$$H(z, y) = \left. \frac{\partial A}{\partial x} \right|_{x=0} = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ikz} \left[ \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m (2m+1) a_{2m+1}(k) \frac{I_{2m+1}(ky)}{y} + \sum_{m=0}^{\infty} 2mb_{2m}(k) (-1) \frac{I_{2n}(ky)}{y} \right] dk.$$

Введемо позначення

$$\Phi(y) = \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m n a_n(k) \frac{I_n(ky)}{y}, \quad n = 2m + 1. \quad (3)$$

Оскільки  $\Phi(y)$  — парна функція  $y$ , то її можна розкласти в ряд по  $\cos(2\pi m y / r)$ :

$$\Phi(y) = \sum_{m=0}^{\infty} \alpha_m \cos(2\pi m y / r), \quad (4)$$

причому коефіцієнти  $\alpha_m$  визначимо через складову  $H(z, y)$  таким чином:

$$\alpha_m = \frac{1}{2\pi^2 r} \int_{-\infty}^{+\infty} dz e^{ikz} \int_{-r}^r \frac{H_n(z, y) \cos(2\pi m y / r)}{1 + \delta_{m,0}} dy,$$

де  $\delta_{m,0}$  — символ Кронекера.

Відомо, що

$$\sin t \cos(z \cos t) =$$

$$= \frac{2}{z} \sum_{\rho=0}^{\infty} (-1)^{\rho} (2\rho + 1) J_{2\rho+1}(z) \sin(2\rho + 1)t,$$

де  $J_{2\rho+1}$  — функція Бесселя.

Позначивши  $z = iky, \cos t = -i\pi m / (ky)$ , отримаємо

$$\cos(\pi m y / r) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\pi m / (kr))^2}} \sum_{\rho=0}^{\infty} (2\rho + 1) \times \times \frac{I_n(ky) (-1)^{\rho}}{ky} \left[ \frac{\pi m}{kr} - \sqrt{1 + \left(\frac{\pi m}{kr}\right)^2} \right]^{2\rho+1}. \quad (5)$$

Підставивши вираз (5) в розкладання (4) і порівнявши з формулою (3), отримаємо

$$a_n(k) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{a_m}{\sqrt{1 + (\pi m / (kr))^2}} \left[ \frac{\pi m}{kr} - \sqrt{1 + \left(\frac{\pi m}{kr}\right)^2} \right]^{(n-1)/2}.$$

Отже, потенціал магнітного поля

$$A(z, \rho, \theta) = \int_{S(z,y)} H(z, y) W(z - 2\rho y, \rho, \theta) dS(2\rho y),$$

де  $W(z - 2\rho y, \rho, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \cos k(z - 2\rho y) \sum_{\rho=0}^{\infty} \frac{I_n(k\rho)}{I_n(kr)} \times$

$$\times \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\cos(\pi m y / r)}{\sqrt{1 + (\pi m / (kr))^2}} \left[ \frac{\pi m}{kr} - \sqrt{1 + \left(\frac{\pi m}{kr}\right)^2} \right]^{2\rho} dk,$$

$n = 2\rho + 1.$

Враховуючи, що  $\mathbf{B} = \text{grad}A$ , і підставляючи вираз, що вийшов, в залежність (1), знайдемо, що сигнал витратоміру

$$U = \int_{S(z,y)} B_n(z, y) G(z, y) dS(z, y),$$

де поверхнева вагова функція для перетину  $S(z, y)$  має вигляд:

$$G(z, y) = \int_{\tau} v \left[ \frac{\partial g}{\partial r} \frac{\partial W}{\partial r} (z - 2\rho y, \rho, \theta) \right] d\tau, \quad (6)$$

тобто представлена аналітично залежно від конструктивних параметрів каналу і структури потоку.

### Висновок

Широко поширена думка, що проливний метод приваблює імітаційного, хоч би тому, що він відповідає природним умовам експлуатації приладу, на наш погляд, не зовсім логічний. Прोलівний метод дозволяє досліджувати витратомір в умовах, відповідних тільки умовам проливної витратомірної установки (тобто тільки за приватних умов структури потоку і лише при електромагнітних перешкодах, що є на проливній установці). У промислових умовах фізичні властивості

вимірюваного середовища, структура потоку і комплекс перешкод інші. Вони можуть істотно відрізнятися від умов перевірки приладу на витратомірній установці. При імітаційному методі дослідження витратомірів створюються загальні умови, відповідні різним режимам кінематичної структури і різним рівням і частотним спектрам електромагнітних перешкод. Якщо ці умови охоплюють і промислові, то імітаційний метод дозволяє достовірніше визначити дійсні метрологічні характеристики витратоміру в промислових умовах. Більш того, якщо є можливість детально сформулювати умови експлуатації витратоміру, то імітаційний метод дозволяє їх відтворити і досліджувати метрологічні характеристики приладу в цих умовах. Тому імітаційний метод дослідження електромагнітних витратомірів переважніше проливної методу, оскільки він більш інформативний.

## Список літератури

1. Вельт И.Д. О метрологическом обеспечении электромагнитных расходомеров / И.Д. Вельт, Ю.В. Михайлова // Датчики и системы. – 2005. – № 4. – С. 8-14.
2. Вельт И.Д. Имитационное моделирование электромагнитных расходомеров / И.Д. Вельт, Ю.В. Михайлова // Приборы и системы управления. — 1997. – № 11. – С. 42-46.
3. Salami L.A. Application a computer to asymmetric flow measurement in circular pipes / L.A. Salami // Trans, of the Inst. of Meas. and Control. – 1984. – Vol. 6, N 4, July-Sept.

Надійшла до редколегії 17.12.2009

**Рецензент:** канд техн. наук, доц. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РАСХОДОМЕРОВ ПРИ СЛОЖНЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ ПОТОКА

С.Л. Котлярова, В.В. Романашенко, П. А. Сапрыкина

*В статье рассмотрены особенности имитационного метода исследования метрологических характеристик электромагнитных расходомеров при сложном профиле потока. Приведены выражения для поверхностных весовых функций при предельных режимах течения: турбулентном и ламинарном.*

**Ключевые слова:** электромагнитные расходомеры; магнитное поле; кинематическая структура потока; объемная весовая функция.

### MODELING ELECTROMAGNETIC FLOWMETER WITH COMPLEX KINEMATIC STRUCTURES OF FLOW

S.L. Kotlyarova, V.V. Romanashenko, P.A. Saprykina

*The article describes the features of a simulation method of research of metrological characteristics of electromagnetic flowmeters in a complex flow profile. Expressions are given for the surface weighting functions at the limiting flow regimes: turbulent and laminar.*

**Keywords:** electromagnetic flowmeters, magnetic field, the kinematic structure of the flow, volumetric weight function.