

УДК 532.505

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-3771382019202960>

В. В. Губська¹, старший викладач, **О. С. Лимарченко²**, професор,
О. О. Сіренко³, спонукач

КЕРУВАННЯ СУМІСНИМ РУХОМ РЕЗЕРВУАРА ІЗ РІДИНОЮ НА ОСНОВІ КОМПЕНСАЦІЇ СИЛОВОГО ВІДГУКУ РІДИНИ

En

The combined motion of nonlinear dynamics of a cylindrical reservoir with liquid under non-periodic loading in the form of one or two periods of sine on below resonance frequency is studied. The high dimensionality of the system and its non-linearity does not allow the application of commonly used mathematical methods of motion control problems. At the same time, problems of high precision maneuvering of structures with a liquid are urgent in modern engineering. We suggest the scheme of control based on the use of information about force interaction of a liquid with reservoir walls, obtained within the framework of the method, grounded on the Hamilton-Ostrogradskiy variational principle. For such approach, we succeeded to construct a mathematical model of the combined motion of the structure with a liquid, based on analytical methods of mathematical physics, variational and asymptotic methods of mechanics. The suggested model is the model of minimal dimensionality (its dimension is equal to the number of degrees of freedoms of the system), which creates preconditions for its successful numerical implementation. This model was successfully tested for transient and steady modes of motion of structures with a liquid for translational and angular motion of the structure. The testing of the model showed good qualitative concordance of results with known results of experimental research. The potential of obtaining forces of interaction of a liquid with the reservoir (liquid response) as a consequence of the use of the technique of varying is the specificity of application of the Hamilton-Ostrogradskiy variational principle. Using this information about the force interaction of the structure with a liquid we analyze the algorithm of motion control, which is based on the principle of compensation of liquid force response. The suggested algorithm enables the construction of control, which eliminates the effect of liquid mobility on the motion of a rigid body being extremely important for high precision performance of prescribed motion of structures with liquid. Such control is not optimal, but it enables getting the desired results for the relatively high dimensional and nonlinear problem. By the example of the system motion disturbance by one or two periods of action of harmonic forces we show efficiency of the suggested technique.

Ru

Рассматривается совместная задача нелинейной динамики цилиндрического резервуара с жидкостью под действием непериодической силовой нагрузки в виде одного или двух периодов синусоиды на дорезонансной частоте. Высокая размерность системы и ее нелинейность не позволяют применить общепринятые математические методы исследования задач управления

¹ КІІІ ім. Ігоря Сікорського

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка

³ Київський національний університет імені Тараса Шевченка

движением. Предлагается схема управления, основанная на применении информации о силовом взаимодействии жидкости со стенками резервуара, которая получается в рамках метода исследования задачи, базирующейся на вариационном принципе Гамильтона-Остроградского. Предложенный алгоритм позволил построить управление, которое исключат влияние подвижности жидкости на движение твердого тела, что является чрезвычайно важным для высокоточного выполнения программных движений конструкций с жидкостью. На примере возбуждения движения системы одним или двумя периодами действия гармонических сил показано эффективность методики.

Вступ

У сучасній промисловості ставляться завдання підвищення надійності складних механічних систем, точності виконання ними своїх функцій за умови мінімізації виробничих площ. Зокрема, у задачах транспортування нових окремих складових обладнання у разі їх часткового встановлення та за наявності різних комунікацій з'являється потреба точного дотримання технологічних вимог у переміщенні конструкцій. Особливо це є важливим для конструкцій, що містять у своєму складі резервуари із рідиною із вільною поверхнею, під час різних режимів експлуатації, коли рухомість рідини за її високої відносної маси ускладнює точність виконання маневрів. Такі проблеми виникають у задачах транспорту, транспортної інфраструктури, енергетиці [1, 2].

Відомо, що для ефективного моделювання руху конструкцій із рідиною із вільною поверхнею доводиться використовувати нелінійні моделі високої розмірності [1, 2]. У той же час більшість алгоритмів керування рухом передбачає використання лінійних систем відносно невеликої розмірності [3 – 5]. Для опису поведінки системи резервуар–рідина із вільною поверхнею застосовано метод, заснований на використанні варіаційного принципу Гамильтона-Остроградського, для якого є природним визначення сил взаємодії між компонентами. У ході застосування такого підходу вдається аналітично визначити головний вектор сил тиску рідини на стінки резервуара в аналітичній формі [2, 6] (такий вектор у літературі ще називають силовим відгуком рідини). Відповідно, якщо прикласти до стінок резервуара цей силовий відгук із протилежним знаком, ми отримаємо, що конструкція буде рухатися таким чином, як ніби то рух рідини у ній був би відсутнім, що виключило б коливний рух системи обумовлений внутрішнім хвильовим рухом рідини. Раніше такий алгоритм компенсації силового відгуку рідини було ефективно використано для задачі про збудження руху системи короткотривалими імпульсами прямокутної та трикутної форм [6].

Постановка задачі

Метою роботи є дослідження можливості використання такого компенсаційного алгоритму зменшення (а практично виключення) інтенсивності прояву внутрішнього руху рідини для реалізацій програмних рухів системи конструкції із рідиною із вільною поверхнею за короткотривалого вібраційного навантаження.

Математична модель

Розглядається поступальний рух циліндричного резервуара, частково заповненого ідеальною нестисливою безвихровою рідиною. Рух системи розглядається лише вздовж одного горизонтального напрямку. Резервуар розглядається як абсолютне тверде тіл. Загальна форма динамічної моделі, орієнтована на дослідження перехідних процесів, була розвинена у [3] **Помилка! Джерело посилання не знайдено.**, і для поступального руху системи система диференціальних рівнянь руху має такий вигляд

$$\begin{aligned} \sum_i \ddot{a}_i \left\{ \delta_{ir} + \sum_j a_j A_{rij}^3 + \sum_{j,k} a_j a_k A_{rijk}^4 \right\} + \ddot{\varepsilon} \cdot \frac{1}{\alpha_r} \left\{ \bar{B}_r^1 + \sum_i a_i \bar{B}_{ri}^2 + \sum_{i,j} a_i a_j \bar{B}_{rij}^3 + \right. \\ \left. + \sum_{i,j,k} a_i a_j a_k \bar{B}_{rijk}^4 = \sum_{i,j} \dot{a}_i \dot{a}_j C_{ijr}^3 + \sum_{i,j,k} \dot{a}_i \dot{a}_j a_k C_{ijk}^4 + \dot{\varepsilon} \cdot \left[\sum_i a_i \bar{D}_{ir}^2 + \sum_i \dot{a}_i a_j \bar{D}_{ijr}^3 + \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_i \dot{a}_i a_j a_k \bar{D}_{ijk}^4 \right] - g \frac{N_r}{\alpha_r} a_r. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{M_F + M_T} \sum_i \ddot{a}_i \left(\bar{B}_i^1 + \sum_j a_j \bar{B}_{ij}^2 + \sum_{j,k} a_j a_k \bar{B}_{ijk}^3 \right) + \ddot{\varepsilon} = \\ = \frac{\vec{F}}{M_F + M_T} + \vec{g} + \frac{\rho}{M_F + M_T} \left(\sum_{i,j} \dot{a}_i \dot{a}_j \bar{B}_{ij}^2 + \sum_{i,j,k} \dot{a}_i \dot{a}_j a_k \bar{B}_{ijk}^3 \right). \end{aligned} \quad (2)$$

У цих рівняннях невідомими є a_i – амплітуди збудження форм коливань рідини із вільною поверхнею та ε – параметри поступального руху резервуара відносно трьох осей. Вказана система рівнянь включає у себе $N+3$ ступеня вільності, де N – кількість форм коливань рідини, які беруться до уваги. У роботі [3] показано як обирати черговість розташування форм коливань, їх загальну кількість, і способи моделювання нелінійних властивостей для адекватного моделювання сумісного руху складових системи. У системі рівнянь (1), (2) багатоіндексні коефіцієнти є квадратурами від форм коливань вільної поверхні рідини та їхні значення наведені у [3].

Система рівнянь моделі являє собою систему звичайних диференціальних рівнянь відносно шуканих амплітудних параметрів руху вільної поверхні рідини і поступального руху твердого тіла. Рух системи відбувається під дією активної сили \vec{F} , прикладеної до стінок резервуара. Із рівнянь руху (1), (2) можна встановити аналітичні вирази для силової взаємодії рідини із конструкцією

$$\vec{R} = \rho \left[\left(\sum_{i,j} \dot{a}_i \dot{a}_j \vec{B}_{ij}^2 + \sum_{i,j,k} \dot{a}_i \dot{a}_j a_k \vec{B}_{ijk}^3 \right) - \sum_i \ddot{a}_i \left(\vec{B}_i^1 + \sum_j a_j \vec{B}_{ij}^2 + \sum_{j,k} a_j a_k \vec{B}_{ijk}^3 \right) \right].$$

Чисельний приклад

Аналіз поведінки системи та ефективності запропонованого алгоритму керування здійснюється для випадку нелінійної моделі, у якій приймається до розгляду 12 форм коливань вільної поверхні рідини. Розглядається випадок, коли маса рідини у п'ять разів перевершує масу резервуара, тобто коли вплив рухомості рідини є вагомим $M_r = 0,2M_l$ (M_r – маса резервуару, M_l – маса рідини), R – радіус резервуару, глибина заповнення резервуару $H = R$. Чисельні значення приведені для $R = 1$ м.

Розглянуто два випадки силового горизонтального навантаження на систему у вигляді одного (рис. 1) і двох (рис. 2) періодів синусоїди із частотою 3,0 1/с (зауважимо, що частота коливань рідини із вільною поверхнею по першій формі 4,14 1/с) із амплітудою 5 kN. Під час такого навантаження коливання вільної поверхні рідини відбувалися у межах 0,2–0,35 радіуса, тобто у нелінійному діапазоні. На рисунках суцільною кривою показано зміну у часі швидкості руху резервуару для варіанта із керуванням на основі компенсації силового відгуку рідини, а штриховою лінією показано випадок некерованого руху системи.

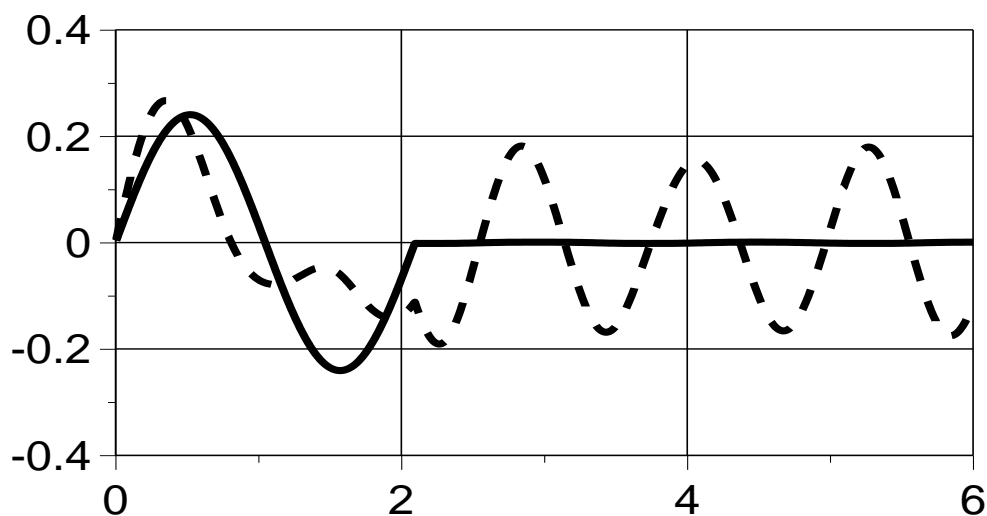


Рис. 1. Зміна швидкості руху резервуару у часі

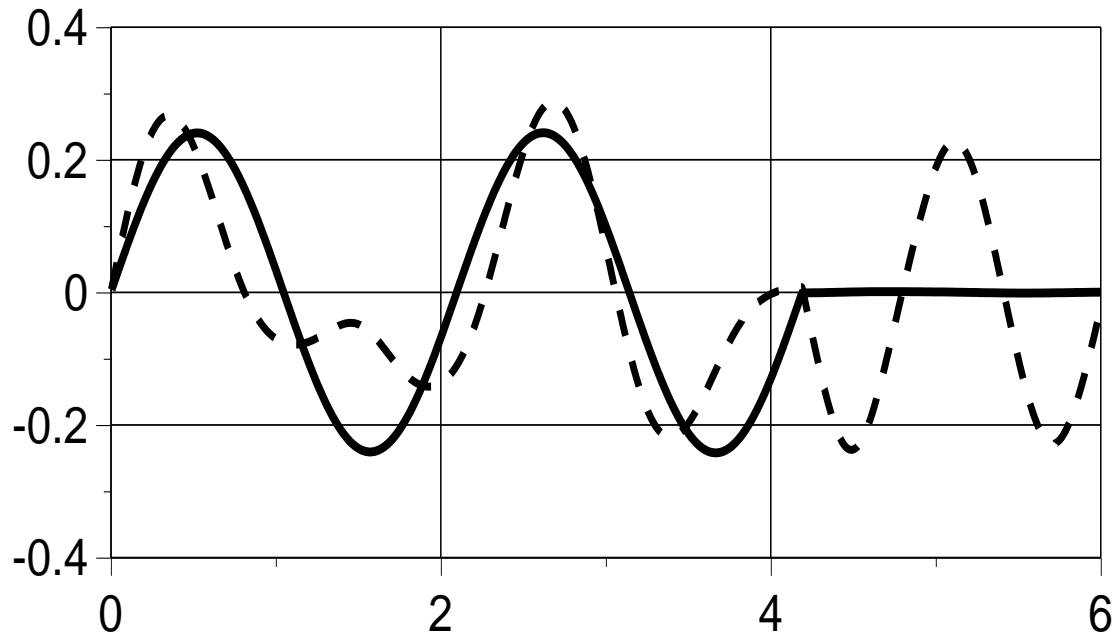


Рис. 2. Зміна швидкості руху резервуару у часі

Із рисунків очевидно, що відмінність поведінки системи на активному і пасивному етапах руху системи є вагомими. На активному етапі через рухомість рідини гармонічний закон зміни швидкості руху спотворений. Особливі відмінності спостерігаються на пасивному етапі. У керованому випадку конструкція фактично не рухається (відхилення від стану спокою обумовлені загальними похибками розрахунків, а також тим, що значення силового відгуку рідини береться на основі параметрів руху за попереднім кроком у часі, і знаходяться в межах $0,0001$), у той час як у разі некерованого руху коливання резервуара є вагомими. Загальна тенденція поведінки системи для одно- та двоперіодичного збудження вагомо не змінилася. Зауважимо, що у випадку керованого руху збурення коливань вільної поверхні рідини стають більшими приблизно на 10-15% у порівнянні із випадком некерованого руху. Це можна пояснити тим, що такий вид керування подібний додатковому обмеженню, накладеному на рух стінок резервуара (унеможливлення впливу рідинного наповнення на рух резервуара), що призводить до додаткових навантажень на стінки резервуара.

Висновки

На основі аналітичних властивостей моделі про сумісний рух конструкції із рідиною із вільною поверхнею у нелінійній постановці визначено силову характеристику взаємодії рідини із стінками резервуара. Запропоновано алгоритм керування рухом системи, який ґрунтується на принципі компенсації ефекту рухомості рідини шляхом включення додаткової сили відгуку рідини як керування. На прикладах короткотривалих вібраційних

навантажень показано ефективність такого прийому для забезпечення високоточного переміщення конструкції шляхом виключення впливу рідинного наповнення на рух резервуара.

Список використаної літератури

1. *Микишев Г. Н.* Динамика твердого тела с полостями, частично заполненными жидкостью / Г. Н. Микишев, Б. И. Рабинович // М.: Машиностроение, 1968. – 532 с.
2. *Лимарченко О. С.* Динамика вращающихся конструкций с жидкостью / О. С. Лимарченко, Дж. Матараццо, В. В. Ясинский // Киев: «Гнозис». – 2002. – 304 с.
3. *Черноусько Ф. Л.* Методы управления нелинейными механическими системами / Ф. Л. Черноусько, И. М. Ананьевский, С. А. Решмин // М.: Физматлит. – 2006. – 328 с.
4. *Формальский А. М.* Управление движением неустойчивых объектов / А. М. Формальский // М.: Физматлит, 2013. – 232 с.
5. *Dickmanns E. D.* Dynamic vision for perception and control of motion / E.D. Dickmanns // London: Springer-Verlag Limited, 2007. – 474 p.
6. Константинов А. В. Динамические приемы гашения колебаний в системе «конструкция – жидкость со свободной поверхностью» / А. В. Константинов, О. С. Лимарченко, В. В. Лукьянчук, А. А. Нефедов // Прикладная механика, – 2018, – том. 55, – № 1, – С. 64–77.