

Лимарченко Олег<sup>1</sup>, Семенович Катерина<sup>2</sup>, Сіренко Олександр<sup>3</sup>

<sup>1</sup>завідувач кафедри, доктор технічних наук, професор, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна, e-mail: [olelim2010@ukr.net](mailto:olelim2010@ukr.net)

<sup>2</sup>асистент, кандидат фізико-математичних наук, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна, e-mail: [kateryna.semenovych@gmail.com](mailto:kateryna.semenovych@gmail.com)

<sup>3</sup>старший викладач, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна, e-mail: [olelim2010@ukr.net](mailto:olelim2010@ukr.net)

## КЕРУВАННЯ КОНСТРУКЦІЯМИ З РІДИНОЮ НА ОСНОВІ КОМПЕНСАЦІЇ СИЛОВОГО ВІДГУКУ РІДИНИ

**Анотація.** Для задач динамки конструкцій з рідиною у випадках сумісного руху складових компонент системи мобільність рідини заважає виконувати точне маневрування. Розроблено нелінійну модель динаміки сумісного руху конструкції і рідини, для якої силова взаємодія складових визначається в аналітичному вигляді. Побудовано алгоритми керування рухом системи на основі компенсації силового відгуку рідини. Розглянуто різні варіанти наближеного визначення силового відгуку рідини і показано вплив цих підходів на точність маневрування конструкцій.

**Ключові слова:** конструкції з рідиною, вільна поверхня рідини, керування рухом, точне маневрування.

**Вступ.** При русі конструкцій з рідиною у випадках сумісного руху складових компонент системи мобільність рідини заважає виконувати точне маневрування. Такого роду задачі є складовими елементами аерокосмічних, морських енергетичних систем, Для зменшення впливу рідинного наповнення на рух тіла-носія переважно використовували алгоритми керування оснований на лінійних моделях систем, що не дозволяло в повній мірі моделювати явища, які вимагають залучення нелінійних моделей, а існуючі алгоритми керування рухом не дозволяють розглядати багатовимірні до того ж нелінійні моделі.

На основі варіаційних методів механіки, асимптотичних методів диференціальних рівнянь і методів модальної декомпозиції авторами було розроблено нелінійну модель динаміки сумісного руху конструкції і рідини, для якої силова взаємодія складових визначається в аналітичному вигляді. Запропоновано використати принцип компенсації силового відгуку рідини на рух тіла-носія для зменшення впливу рухомості рідини на рух системи. Такий алгоритм керування не є оптимальним, проте, як свідчать розглянуті приклади, є високо ефективним і порівняно простим. Було застосовано такий алгоритм для



групи задач про усталені і перехідні рухи тіла-носія, при цьому вплив рухомості рідини на рух тіла-носія практично виключався. Для практичного випадків розрізняють три варіанти використання алгоритму керування. Перший, при відомому початковому стані системи пропонується алгоритм керування на основі визначення силового відгуку рідини по нелінійної моделі. Другий, при відомому початковому стані системи силовий відгук рідини визначається за спрощеною схемою. Третій, початковий стан рідини невідомий, відгук рідини визначається наближено на основі даних телеметрії з використанням певних гіпотез математичного характеру. Наведемо приклад.

Для аналізу ефективності таких алгоритмів визначення силового відгуку рідини вивчимо рух системи для випадку початкового динамічного збудження руху системи силовим імпульсом у вигляді прямокутного імпульсу, прикладеного до стінки циліндричного резервуара, тривалість імпульсу вважається меншою за чверть періоду вільних коливань системи ( $\tau = 0,25c$ ). В нелінійній моделі сумісного руху конструкції з рідиною враховується  $N = 12$  форм коливань вільної поверхні рідини. Числові результати отримано для вертикально розташованого кругового циліндричного резервуара радіуса  $R = 1$  м з глибиною заповнення  $H = 1$  м, заповненого водою; маса резервуара приймалась як 10 % від маси рідини (випадок суттєвого впливу рухомості рідини). На рис. 1 приведено залежність в часі поступальної швидкості руху тіла-носія. Крива 1 (суцільна крива) відповідає руху системи без керування для випадку «затверділої» рідини; крива 2 (суцільна крива, яка на малюнку співпадає з кривою 1) відповідає руху системи за наявності рідини і керування на основі принципу компенсації силового відгуку рідини на основі повної інформації про залежність силового відгуку від параметрів руху рідини; крива 3 (штрих-пунктирна крива) відповідає випадку руху рідини без керування; крива 4 (штрихова крива) відповідає руху системи для випадку визначення силового відгуку рідини на основі лінійного наближення. На рисунку всі лінійні розміри віднесено до радіуса резервуара, час задається в секундах.

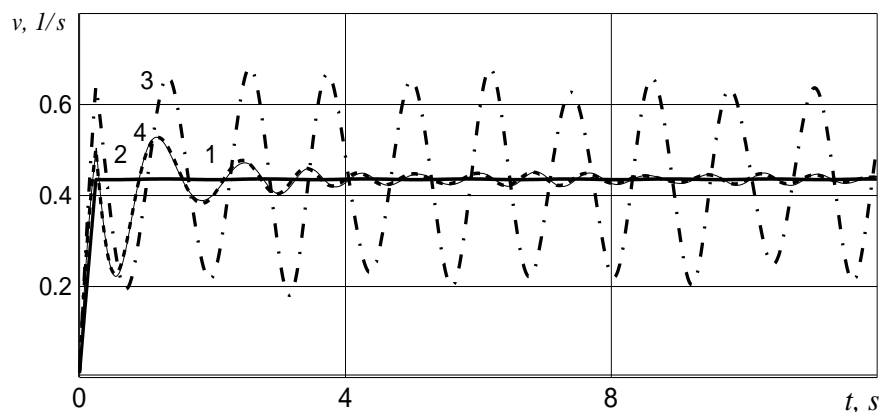


Рисунок 1 – Швидкість руху тіла-носія в часі

З рисунку видно, що у випадку «затверділої» рідини система за час  $\tau$  набуває максимальної швидкості і надалі рухається з цією постійною швидкістю (крива 1). У випадку руху системи без компенсації силового відгуку рідини система за короткий час набуває швидкість, що спочатку перевершує швидкість, яку б набула система із «затверділою» рідиною (крива 3), а надалі відбуваються коливання швидкості навколо цього сталого значення. При русі системи з керуванням, яке включає компенсацію силового відклику рідини на основі повного використання співвідношення (5), закон руху системи практично збігається із законом руху системи із «затверділою» рідиною (крива 2). Тобто, запропонований алгоритм керування забезпечив з високою точністю рух системи, в якому виключено вплив рухомості рідини на рух конструкції носія. Для випадку визначення відгуку рідини на основі лінійного наближення (крива 4) на початковому етапі руху формується певна розбіжність між значеннями швидкостей руху системи у випадку впливу рухомості рідини і випадку «затверділої» рідини.

Проте з часом така відмінність спадає. Аналогічні залежності одержуються і для випадку одночленного наближення визначення відгуку рідини, які практично збігаються з кривою 4. В більшості нестационарних задач неврахування нелінійних властивостей системи на початковому етапі не призводить до вагомих відмінностей результатів надалі. Проте в цьому випадку з керуванням виходить, що неврахування частини інерційних властивостей системи (за рахунок інерції збудження вищих форм коливань) і частини, яка обумовлена квадратичними і кубічними членами, суттєво відбивається на результаті керування саме на початковому етапі. В той же час алгоритм керування надалі мінімізує цей вплив. В процесі руху коливання вільної поверхні рідини залишаються одного порядку (0,25–0,3 радіуса резервуара) і стають навіть трохи меншими, ніж у випадку руху системи без компенсації силового відклику рідини. В той же час для руху без компенсації з часом стає помітним певне відхилення від синусоїдального закону руху, яке слабко помітне для випадків руху системи з компенсацією рухомості рідини. Запропонована схема керування фактично є керуванням з оберненим зв'язком відносно прискорень амплітуд збурень форм коливань вільної поверхні рідини з їх нормуванням за законом формування силового відгуку рідини, який надалі уточнюється нелінійними членами.

**Висновки.** Для реалізації високоточного маневрування запропоновано алгоритм керування рухом конструкцій з рідиною, в основі якого лежить принцип компенсації силової взаємодії рідини зі стінками резервуара, що має суттєво зменшити вплив рухомості рідини на рух конструкції-носія. Підхід базується на аналітичних властивостях початкової



нелінійної динамічної моделі сумісного руху конструкції з рідиною і застосовується для вивчення нелінійної динамічної моделі високої розмірності, де використання традиційних підходів до розв'язування задач керування рухом є складним. Показано, що при спрощеному (лінійному) чи одночленному визначенні силового відгуку рідини цей метод дає значні похибки на початковому етапі руху, проте згодом ці відхилення значно спадають і в підсумку вплив рухомості рідини на конструкцію-носій практично виключається.

