

Граняк В. Ф.

кандидат технічних наук, старший викладач кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань Вінницького національного технічного університету

Богачук В. В.

кандидат технічних наук, доцент, начальник науково-дослідної частини Вінницького національного технічного університету

МЕТОД ТА ЗАСІБ КОНТРОЛЮ ВІБРОШВИДКОСТІ ГІДРОАГРЕГАТА У РЕЖИМІ РОЗГОНУ НА ОСНОВІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ПАРАМЕТРІВ ВІБРОПРИСКОРЕННЯ

В статті запропоновано метод аналітичного розрахунку віброшвидкості на базі інформаційної обробки динамічного сигналу віброприскорення вузлів гідроагрегату у режимі запуску, запропоновано підхід для підвищення точності зазначеного аналітичного розрахунку та конструкцію засобу вимірювального контролю віброшвидкості гідроагрегата, що реалізує запропонований метод розрахунку віброшвидкості.

Ключові слова: *гідроагрегат, віброшвидкість, віброприскорення, аналітичний розрахунок, апроксимація, інтегрування.*

В статье предложен метод аналитического расчета виброскорости на базе информационной обработки динамического сигнала виброускорения узлов гидроагрегата в режиме запуска, предложен подход для повышения точности указанного аналитического расчета и конструкцию средства измерительного контроля виброскорости гидроагрегата, реализующее предложенный метод расчета виброскорости.

Ключевые слова: *гидроагрегат, виброскорость, виброускорение, аналитический расчет, аппроксимация, интегрирования.*

In the article the method of calculation of the analytical vibration based on information processing dynamic acceleration signal hydro units in run mode, an approach to improve the accuracy specified analytical calculation and design of measuring vibration control hydraulic unit that implements the proposed method of calculation of vibration.

Keywords: *hydro, vibroshvydkist, acceleration, analytical calculation, approximation, integration.*

Постановка задачі. Контроль параметрів вібрації гідроагрегатів є важливою умовою забезпечення їх експлуатаційної надійності. Особливо важливим є здійснення віброконтролю вузлів гідроагрегату у режимі запуску, під час якого,

навіть для бездефектного обладнання, характерним є перевищення рівня вібрації, що досягається в усталеному режимі, у декілька разів [1]. Таке зростання вібрації неминуче призводить до збільшення механічної напруженості у конструктивних елементах як самого гідроагрегата, так і в його фундаментах та кріпленнях, а, отже, дає підстави розглядати режим пуску, як режим підвищеного ризику пошкодження устаткування та опорних конструкцій. А так як процес розгону передбачає контроль параметрів вібрації при малих миттєвих швидкостях ротора, для яких застосування датчиків віброшвидкості є доволі обмеженим [2], то розробка нових методів аналітичного розрахунку віброшвидкості на основі відомих значень віброприскорення, придатних для застосування у режимі пуску гідроагрегата, є актуальною науковою задачею, що має значний практичний інтерес.

Особливістю контролю вібрації потужних гідроагрегатів є те, що переважна більшість із них відносяться до тихохідних електричних машин, з номінальною частотою обертання до 500 об/хв [3]. Так як частоти вібрації таких машин знаходяться нижче нижньої межі роботи індукційних датчиків віброшвидкості, то для визначення параметрів їх вібрації, як правило, застосовуються п'єзосенсори (п'єзоелектричні акселерометри), сигнал на виході яких прямопропорційний параметру віброприскорення [2]. А так як зміна віброшвидкості для стаціонарного режиму роботи гідроагрегату носить періодичний полігармонічний характер, частота першої гармоніки якого рівна частоті обертання ротора а нульова гармоніка рівна нулю, то параметри віброшвидкості, які для електричних машин регламентується нормативними документами [4], можуть бути знайдені з аналітичної залежності віброприскорення від часу шляхом інтегрування останньої за період обертання ротора при нульових початкових умовах [2]. Про те, у режимі пуску гідроагрегата таких підхід є дуже обмеженим в наслідок неперіодичності зміни віброприскорення, що необхідно враховувати при розрахунку функції зміни віброшвидкості. А так як залежність віброприскорення від часу, як показано у роботах [2], має складний характер, то його опис за допомогою полінома високого порядку є неефективним. Тож доцільним є роз-

робка нових методів аналітичного представлення функції віброприскорення від часу, що була б інтегрованою на усьому часовому проміжку розгону гідроагрегату та описувала б залежність віброприскорення від часу з точністю, що була б достатньою для реалізації задачі контролю.

Аналіз шляхів розв'язання задачі. Як випливає з роботи [2], найбільш точно залежність віброприскорення від часу описується за допомогою ряду Фур'є, що повною мірою пояснюється фізичною природою його виникнення у вузлах електричної машини. Про те, такий опис передбачає стаціонарність та періодичність коливального процесу, що не має місця під час розгону гідроагрегата. В режимі пуску загальний коливальний процес можна представити у вигляді складної автоколивальної системи, у якій частоти примусових автоколивань зростають пропорційно миттєвій частоті обертання ротора.

Так як частота складного періодичного вібросигналу, як правило, співпадає з частотою обертання ротора [2], то для кожного моменту режиму пуску гідроагрегата з доволі високою точністю такий вібросигнал може бути представлений у вигляді ряду Фур'є, частота першої гармоніки якого буде співпадати з миттєвою частотою обертання ротора. При чому, враховуючи інерційність процесу запуску потужних електрогенеруючих установок, криву розгону гідроагрегату з допустимою похибкою можна замінити ступінчатою функцією, для якої реальне значення швидкості при умові невеликого кута переміщення ротора можна вважати рівною середній швидкості руху ротора при повороті на заданий кут (рис. 1).

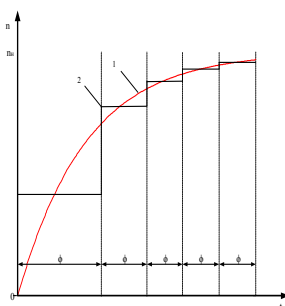


Рисунок 1 – Крива розгону ротора гідроагрегата: 1 – реальна, 2 – спрощене представлення

При такому спрощенні у межах кожного сектору повороту ротора на кут ϕ вібраційний процес можна вважати умовно стаціонарним та таким, що може бути представлений у наступному вигляді:

$$A_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \beta < (i-1)\phi; \\ a(t), & \text{якщо } (i-1)\phi \leq \beta \leq i\phi; \\ 0, & \text{якщо } \beta > i\phi, \end{cases} \quad (1)$$

де β – поточне значення кута зміщення ротора відносно початкового положення; $a(t)$ – аналітична залежність віброприскорення від часу, отримана на основі вимірювань аксилерометра, i – номер сектору, для якого отримується аналітична залежність.

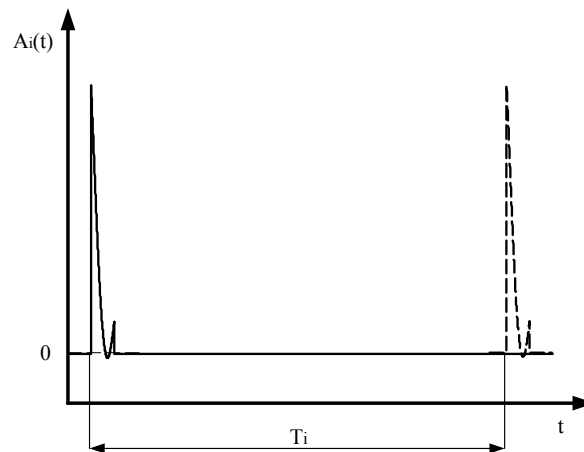


Рисунок 2 – Штучно періодизований сигнал з періодом T_i

Не дивлячись на те, що сигнал віброприскорення при проходженні сектору ϕ є неперіодичним, про те, оскільки він діє на деякому визначеному проміжку часу, його можна штучно періодизувати, як це зроблено з деяким неперіодичним сигналом на рис. 2 та надалі вважати періодичним [5].

В такому випадку миттєве значення віброшвидкості для кожного моменту пускового режиму гідроагрегату може бути розраховано наступним чином:

$$v(\tau) = \sum_{i=1}^N \int_0^{\tau} A_i(t) dt, \quad (2)$$

де $v(\tau)$ – миттєве значення віброшвидкості в поточний момент часу τ ; N – номер сектору, у якому знаходиться ротор в поточний момент часу τ .

Так як точний опис періодичної функції рядом Фур'є можливий лише при врахуванні нескінченній кількості гармонік, що є неможливим у реальній системі віброконтролю, то доцільним є дослідження можливості опису такого сигналу скінченною кількістю перших гармонік ряду Фур'є. Оскільки сигнал віб-

роприскорення носить полігармонічний характер [2], то для дослідження адекватності такого аналітичного представлення залежності $A(t)$ було здійснено розкладання у скінченний ряд Фур'є, що містить шістдесят перших гармонік, полігармонічного сигналу з наступними параметрами.

$$10 \text{ ел. град.} \leq \beta \leq 20 \text{ ел. град.}, \quad (3)$$

$$a(t) = \sum_{j=1}^{10} \sin(j\omega). \quad (4)$$

Результати моделювання зазначеного перетворення наведені на рис. 3.

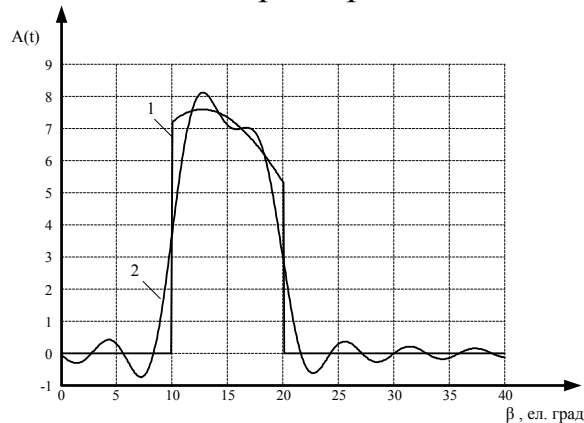


Рисунок 3 – Результати моделювання залежності $A(t)$: 1 – реальне значення; 2 – апроксимація

Як впливає з рис. 3, аналітичний опис залежності $A(t)$ містить додаткову складову похибки, обумовлену неточністю апроксимації, що умовно може бути поділена на похибку апроксимації у межах сектора φ_i , та похибку апроксимації поза межами цього сектора.

Для зменшення похибки аналітичного опису поза межами сектора φ_i , розрахунок віброшвидкості доцільно здійснювати не за виразом (2), а наступним чином:

$$v(\tau) = \sum_{i=1}^{N-1} \int_{\tau_1}^{\tau_2} A_i(t) dt + \int_{\tau_2}^{\tau} A_{N-1}(t) dt, \quad (5)$$

де $T_0 = 0$; T_i – штучний період при проходженні ротором сектору φ_i ; τ_1, τ_2 – моменти часу, що розраховуються наступним чином:

$$\tau_1 = \sum_{i=1}^{N-2} T_i, \quad (6)$$

$$\tau_2 = \sum_{i=1}^{N-1} T_i. \quad (7)$$

Як видно з рис. 3, максимальна похибка при апроксимації залежності $A(t)$ виникає на початку та кінці сектору φ_i . Це пояснюється наявністю вертикального переднього та заднього фронтів, що неминуче призводить до збільшення амплітуди вищих гармонік ряду Фур'є при його розкладі [6]. Тож, для зменшення похибки аналітичного опису у межах сектора φ_i доцільним є зменшення висоти переднього та заднього фронту сигналу, що розкладається у скінченний ряд Фур'є. Для досягнення цієї мети апроксимацію сигналу $A(t)$ можна представити у наступному вигляді:

$$A(t) = C \cdot 1(t - \tau_1) + D_0 + \sum_{k=1}^M (D_k \sin(k\omega) + B_k \cos(k\omega)), \quad (8)$$

де $1(t - \tau_1)$ – одинична ступінчата функція (функція Хевісайда), зміщена вправо на час τ_1 ; C – амплітуда одиничної ступінчатої функції; D_0 – амплітуда нульової гармоніки отриманого скінченного ряду Фур'є; D_k, B_k – коефіцієнти k -ї гармоніки отриманого скінченного ряду Фур'є.

В такому випадку у скінченний ряд Фур'є буде розкладатися наступна функція:

$$A_1(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \beta < (i-1)\phi; \\ a(t) - C, & \text{якщо } (i-1)\phi \leq \beta \leq i\phi; \\ 0, & \text{якщо } \beta > i\phi. \end{cases} \quad (9)$$

Оскільки найбільша похибка при аналітичному розкладанні функції $A(t)$ вноситься за рахунок вертикальних фронтів [6], а не співпадання значень реального та апроксимованого сигналів в околі заднього фронту значною мірою знаходиться поза межами сектора φ_i (рис. 3) і не враховується залежністю (5), то за допомогою одиничної ступінчатої функції доцільно забезпечити повне усунення у функції $A_1(t)$ вертикального переднього фронту. В такому випадку амплітуда функції Хевісайда буде розраховуватися наступним чином:

$$C = A(\tau_1), \quad (10)$$

Для підтвердження зробленого припущення про підвищення точності аналітичного опису штучно періодизованого сигналу, отриманого на базі полігармонічної залежності, було розраховано відносну похибку визначеного інтегралу для кожного сектору φ_i величиною 30 ел. град. сигналу (4) при розкладанні функції $A(t)$ у скінченний ряд Фур'є, що включає у себе шістдесят перших гармонік. Результати розрахунку наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку відносну похибку визначеного інтегралу при апроксимації штучно періодизованого сигналу, отриманого на базі полігармонічної залежності (4)

φ, ел. град.	δ, %	
	$A(t) = D_0 + \sum_{k=1}^M (D_k \sin(k\omega) + B_k \cos(k\omega))$,	$A(t) = C \cdot I(t - \tau_1) + D_0 + \sum_{k=1}^M (D_k \sin(k\omega) + B_k \cos(k\omega))$,
0 – 30	0,095 %	0,095 %
30 – 60	1,195 %	0,303 %
60 – 90	3,442 %	0,249 %
90 – 120	6,806 %	0,407 %
120 – 150	10,698 %	2,389 %
150 – 180	13,567 %	10,492 %
180 – 210	13,567 %	13,567 %
210 – 240	10,698 %	2,746 %
240 – 270	6,806 %	0,498 %
270 – 300	3,442 %	0,228 %
300 –	1,195 %	0,327 %

330		
330 – 360	0,095 %	0,147 %

Як випливає з табл. 1, застосування при аналітичному описі штучно періодизованого сигналу, отриманого на базі полігармонічної залежності та доданка у вигляді одиничної ступінчатої функції з амплітудою $A(\tau_1)$ дозволяє підвищити точність апроксимації, що повною мірою підтверджує зроблене раніше припущення.

Виходячи з сказаного, структурна схема засобу, що реалізує вимірювальний контроль віброшвидкості гідроагрегата та побудована на основі використання запропонованого методу аналітичного розрахунку віброшвидкості у пусковому режимі може мати вигляд, наведений на рис. 4.

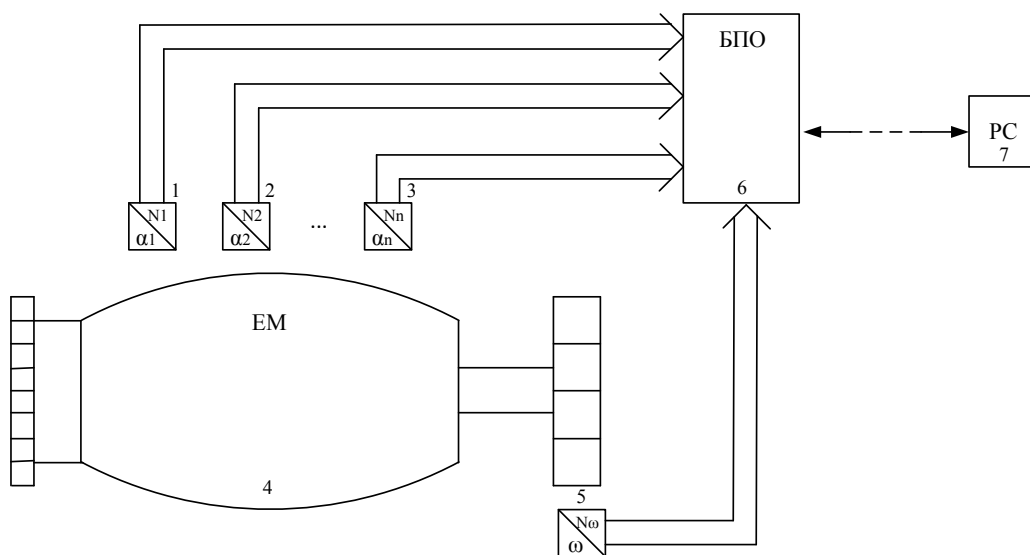


Рисунок 4 – Структурна схема засобу вимірювального контролю віброшвидкості гідроагрегата

Приведений на рис. 4 засіб вимірювального контролю віброшвидкості гідроагрегата працює наступним чином. З «n» датчиків віброприскорення 1–3 на блок проміжної обробки 6 поступає інформація про поточні значення віброприскорення «n» вузлів гідроагрегата 4. Паралельно з цим з датчика кутової швидкості 5 на блок програмної обробки 6 поступає сигнал про миттєве значення швидкості обертання ротора гідроагрегата 4. Блок проміжної обробки 6 здійснює формування пакету інформації про виміряні технологічні параметри та

здійснює їх передачу у сервер 7. У випадку, якщо миттєве значення швидкості обертання ротора гідроагрегата 4 зростає на протязі кількох циклів вимірювання поспіль, то розрахунок віброшвидкості у сервері здійснюється за алгоритмом, описаним вище. Якщо ж швидкість обертання ротора гідроагрегата 4 залишається постійною, то розрахунок віброшвидкості здійснюється за класичним алгоритмом.

Висновки:

1. Запропоновано метод аналітичного розрахунку віброшвидкості у пусковому режимі гідроагрегата за рахунок штучної періодизації полігармонічного сигналу віброприскорення з подальшим його аналітичним описом скінченим рядом Фур'є та інтегрування, що дозволило аналітично отримати миттєві значення віброшвидкості в режимі розгону гідроагрегата.

2. Запропоновано способи підвищення точності розрахунку віброшвидкості за рахунок неврахування значень аналітичної залежності віброприскорення від часу поза межами досліджуваного сектору повороту ротора φ_i та аналітичного опису полігармонічного сигналу віброприскорення у вигляді суми одиначної ступінчатої функції з амплітудою $A(\tau_1)$, зміщеної у момент входження ротора гідроагрегату у сектор φ_i . Доведено їх адекватність.

3. Запропоновано конструкцію засобу, що реалізує вимірювальний контроль віброшвидкості гідроагрегата та побудована на основі використання запропонованого методу аналітичного розрахунку віброшвидкості у пусковому режимі.

Список використаних джерел

1. Гаврилець Г. О. Моделювання вібрацій в електромеханічній системі з асинхронним двигуном. Електронний ресурс. – Режим доступу: <http://ees.kdu.edu.ua/wp-content/uploads/2013/04/533.pdf>

2. Моніторинг, діагностування та прогнозування вібраційного стану гідроагрегата. Монографія / Кухарчук В. В., Качив С. Ш., Мадьяров В. Г. та ін. – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 168 с. – ISBN 978-966-641-573-1
3. Енергетика; Історія, сучасність і майбутнє. Розвиток теплоенергетики та гідроенергетики / Базеєв Є. Т., Білека Д. Б., Васильєв Є. П. та ін. – Київ: «Редакція видання «Енергетика: історія, 2011. – 400 с. – ISBN 978-966-8163-15-9
4. ГОСТ 10816 – 1 – 97. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях – Минск: Стандартиформ, 2009. – 18 с.
5. Основи теоретичної електротехніки. Перехідні процеси в лінійних колах. Синтез лінійних кіл. Електричні та магнітні нелінійні кола. Підручник / Ю. О. Карпов, Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук, С. Ш. Качив. За редакцією Ю. О. Карпова – Вінниця: ВНТУ, 2011 – 530 с. – ISBN 978-966-641-446-8.
6. Бабак В. П. Обробка сигналів. Підручник / В. П. Бабак, В. С. Хандецький, Е. Шрюфер – Київ: Либідь, 1996 – 392 с. – ISBN 5-325-00631-2.