

А.С. Ященко,

А.А. Руденко, канд. техн. наук,

Д.С. Вакула

ПАТ «ВНДІАЕН», Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут атомного і енергетичного насособудування, Суми, Україна,

В.І. Симоновський, д-р техн. наук

Сумський державний університет, Суми, Україна

О.М. Козлов

АТ «Сумський завод «Насосенергомаш», Суми, Україна

ДИНАМІКА ВЕРТИКАЛЬНИХ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ

DYNAMICS OF VERTICAL PUMP UNITS

Мета. Визначення міри впливу жорсткості корпусу відцентрових насосних агрегатів на виникнення просторових коливань корпусу й ротора насоса. З'ясування умов зниження віброактивності відцентрових насосних агрегатів.

Методи дослідження. Аналіз динамічних характеристик ротора, внутрішнього корпусу та системи вертикального насосного агрегата в цілому. Розрахунок перших трьох власних частот коливання ротора, внутрішнього корпусу та всієї системи вертикального насосного агрегата.

Результати дослідження. Проведено аналіз динамічних характеристик ротора, внутрішнього корпусу насоса та системи вертикального насосного агрегата в цілому, виконаний за умов номінальної роботи насоса. У результаті аналізу динамічних характеристик ротора розраховано перші три власні частоти коливань. Виконано аналіз динамічних характеристик конструкції насосного агрегата без ротора насоса. Отримано перші три власні частоти коливань внутрішнього корпусу вертикального насоса. Виконано аналіз динамічних характеристик системи вертикального насосного агрегата (корпус насоса включно з ротором), отримано перші три власні частоти коливань системи. Проаналізовано взаємний вплив ротора та внутрішнього корпусу одне на одного.

Висновки. Виконано аналіз динамічних характеристик вертикальних відцентрових насосних агрегатів, що відносяться до класифікації VS6, яку наведено в API 610 (11-е видання). Досліджено динамічні характеристики консервативної моделі ротора та внутрішнього корпусу насоса та системи вертикального відцентрового насосного агрегата в цілому.

Ключові слова: вертикальний насосний агрегат, динамічні характеристики, динамічна система, ротор, внутрішній корпус насоса, власні частоти коливань.

Вступ

При роботі відцентрових електронасосних агрегатів виникають динамічні сили, що спричиняють різні просторові коливання (вібрації) ротора і корпусу насоса, приводного електродвигуна і інших вузлів, що входять до складу агрегатів. Більшість робіт, що відносяться до проблеми зниження віброактивності відцентрових насосних агрегатів, присвячено боротьбі з вібрацією в джерелах її виникнення. Так, в роботах [1, 2, 3] проводиться дослідження і розроблення заходів щодо зниження збуджень, обумовлених неоднорідністю потоку, в [4] — кавітацією, в [5] — підшипниками, в [6] — ущільненнями, в [7] — з'єднувальними муфтами. Незважаючи на численні рекомендації щодо ефективного зменшення динамічних навантажень, інколи досягнути допустимого рівня вібрації не вдається або виявляється економічно недоцільним.

У цих випадках постає задача мінімізації вібрацій. До способів досягнення цієї мети входить зміна жорсткості конструкції і її елементів, використання засобів віброізоляції (амортизації) і вібропоглинання (вібропоглинаючих матеріалів, спеціальних демпферів і гасителів коливань). Для підвищення жорсткості корпусних елементів відцентрових насосних агрегатів широко використовується постановка ребер жорсткості, яка дає можливість уникнути значного збільшення металоємності. У деяких типах насосних агрегатів використовується амортизація при кріпленні до фундаменту [8] і гнучкі вставки між патрубками насоса і трубопроводами [9], що дозволяє зменшити рівні переданих вібрацій і т.п.

Однією з ефективних умов зниження віброактивності відцентрових насосних агрегатів є відбудова їх від резонансних режимів роботи. Її значення зростає в зв'язку з тенденцією збільшення одиничної

потужності насосів при одночасному зниженні питомої металосмістності за рахунок підвищення частоти обертання роторів.

У насосних агрегатах під дією збуджуючих сил, що охоплюють широку область частотного спектра, можуть проявитися резонансні вібрації практично з будь-якою власною частотою. Це вимагає проведення ретельного аналізу динамічних властивостей всієї конструкції.

На рисунку 1 показано типову конструкцію вертикального насосного агрегата, що відноситься до класифікації VS6, яку наведено в API 610 (11 видання) [10].

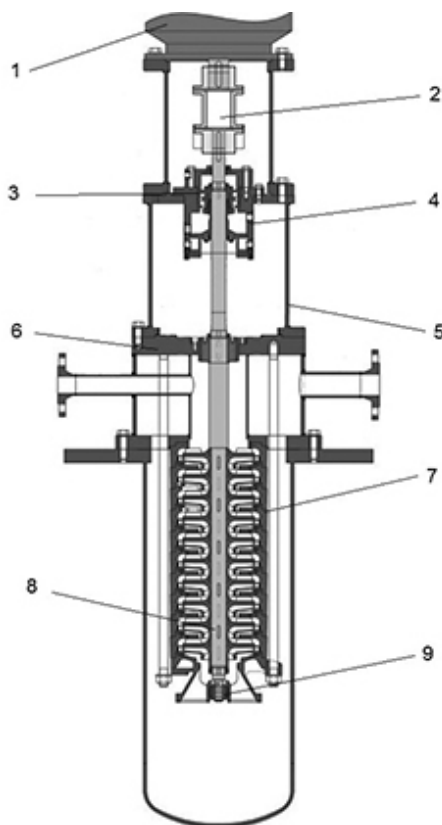


Рисунок 1 — Конструкція вертикального насосного агрегата

Вертикальний насосний агрегат складається з електродвигуна 1, що встановлено на ліхтарі 5. Ротор електродвигуна з'єднаний з ротором насоса 8 за допомогою муфти 2. Ротор насоса знаходиться у підвішеному стані, опорою йому слугує опорно-упорний підшипник кочення 3, що знаходиться в корпусі підшипникової опори 4. Корпус підшипникової опори жорстко зв'язаний з ліхтарем електродвигуна. Внизу конструкції опорою для ротора насоса в радіальному напрямку слугує гідродинамічний підшипник ковзання 9, який працює на перекачуваній рідині. Гідродинамічний підшипник ковзання є нижньою частиною внутрішнього корпусу 7 насоса, який кріпиться до напірного корпусу 6. На напірному корпусі насоса розташовані лапи, за допомогою яких насос монтується на фундаменті.

Конструкція вертикального насосного агрегата має відносно невелику жорсткість. Це призводить до того, що майже усі агрегати подібного вигляду є гнучкими конструкціями і їх робоча частота обертання знаходиться вище за нижчі власні частоти коливань.

Встановлено, що власні частоти коливань вертикального насосного агрегата обумовлені як згинними, так і крутильними коливаннями, та розташовані поблизу робочої частоти обертання і області найбільш інтенсивних сейсмічних навантажень [11].

Враховуючи викладене вище, необхідно проаналізувати динамічні характеристики ротора, внутрішнього корпусу та системи вертикального насосного агрегата у цілому, визначити ступінь впливу жорсткості внутрішнього корпусу на динамічні характеристики ротора.

Аналіз динамічних характеристик ротора

Ротор відцентрового насоса є однією з найскладніших і відповідальних збірних одиниць і багато в чому визначає надійність насоса в цілому.

До основних деталей ротора відносяться вал, робочі колеса, з'єднувальні муфти, захисні гільзи, деталі торцевих ущільнень, розвантажувальні пристрої і т.п. Залежно від конструкції насоса ротор виконують з різним взаємним розташуванням деталей.

На рисунку 2 показано розрахункову модель ротора, яка є консервативною динамічною системою.



Рисунок 2 — Консервативна модель ротора насоса

Розрахунки виконані за допомогою програмного комплексу Ansys Workbench 14.5 [12].

Ротор насоса моделюється балкою круглого поперечного перерізу шматочно-постійної жорсткості і погонної маси з дискретно розташованими моделями насаджених на вал деталей (робочих коліс, втулок, розвантажувального диска, напівмуфти і т.д.).

Розрахунок динамічних характеристик ротора виконаний для умов номінальної роботи.

В таблиці 1 наведені власні частоти коливань, а на рисунку 3 перші три форми коливань ротора насоса.

Аналіз динамічних характеристик внутрішнього корпусу насоса

Конструкція внутрішнього корпусу вертикального насосного агрегата є консольною і має відносно велику податливість. Це призводить до того, що при гармонійних навантаженнях з невеликою частотою, яка відбувається в районі власної частоти коливань, амплітуди коливань

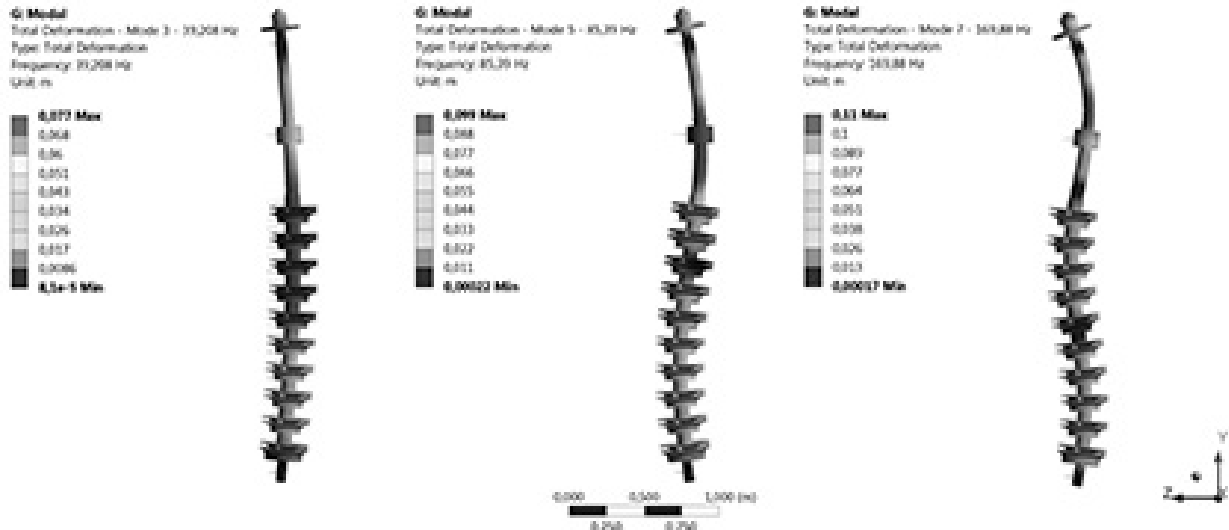


Рисунок 3 — Перші три форми коливань ротора насоса

Таблиця 1 — Власні частоти коливань ротора насоса

Власна частота коливань	Числове значення, Гц
Перша	39,2
Друга	85,4
Третя	169,9

сягатимуть значних величин, що може призвести до втрати працездатності насоса. Тому необхідно враховувати вплив внутрішнього корпусу на динамічні характеристики насоса та ротора зокрема.

На рисунку 4 показано розрахункову модель внутрішнього корпусу насоса, яка є консервативною динамічною системою.

В таблиці 2 наведені власні частоти коливань, а на рисунку 5 перші дві форми коливань внутрішнього корпусу насоса.

Таблиця 2 — Власні частоти коливань внутрішнього корпусу насоса

Власна частота коливань	Числове значення, Гц
Перша	52,6
Друга	294,7

Аналіз динамічних характеристик системи вертикального насосного агрегата

Насосний агрегат складається з двох консольних частин — підсистема «ліхтар-електродвигун» та

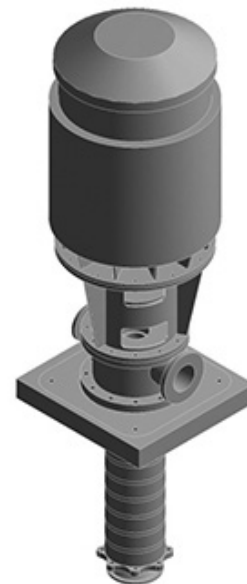


Рисунок 4 — Консервативна модель внутрішнього корпусу насоса

внутрішній корпус, валопроводу (двох послідовно з'єднаних роторів насоса та електродвигуна за допомогою муфти) та напірного корпусу, який жорстко кріпиться до фундаменту. Ліхтар електродвигуна, на якому кріпиться корпус підшипникової опори, так само як і внутрішній корпус насоса, має велику податливість [11]. Це впливає на динамічні характеристики системи насосного агрегата в цілому.

На рисунку 6 показано геометричну модель системи насосного агрегата в цілому.

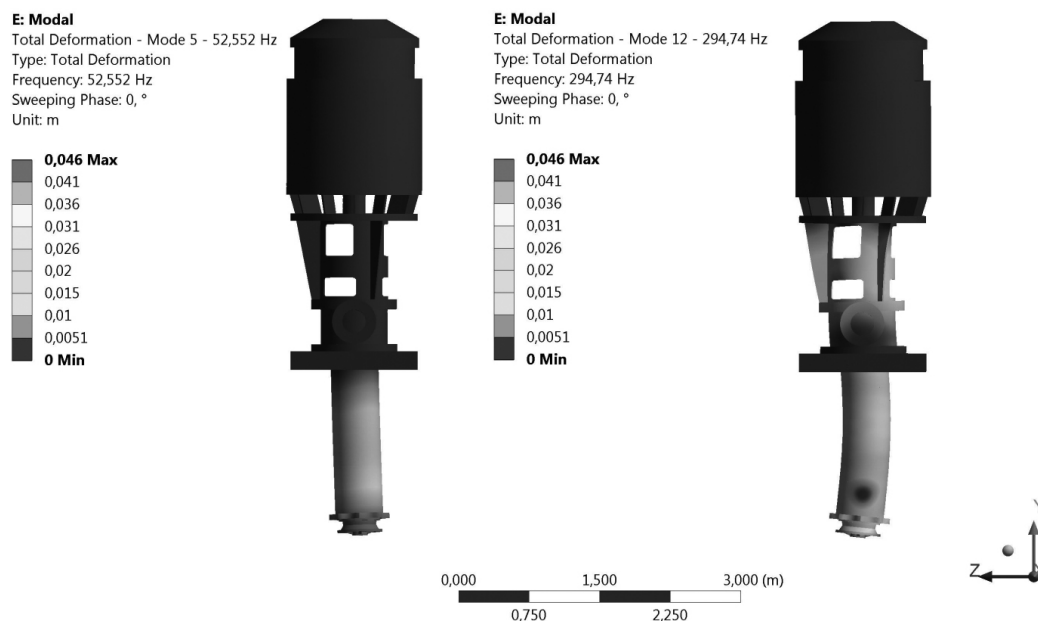


Рисунок 5 — Перші дві форми коливань внутрішнього корпусу насоса

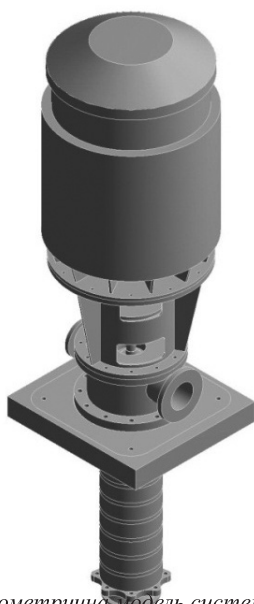


Рисунок 6 — Геометрична модель системи вертикального насосного агрегата

У таблиці 3 наведено значення власних частот коливань ротора та внутрішнього корпусу як консервативних систем, системи насосного агрегата в цілому, розраховано відносний вплив ліхтаря електродвигуна та внутрішнього корпусу на динамічні характеристики ротора насоса.

На рисунку 7 відтворено форми коливань системи вертикального насосного агрегата.

Залежність динамічних характеристик насосного агрегата від ступінчастості насоса

Деякі типорозміри насосних агрегатів використовують для створення машин з одним числом продуктивності та різними напірними характеристиками. Такі маніпуляції можливі за допомогою зміни ступінчастості насоса. Тобто, продуктивність насоса залежить від геометрії робочого колеса, а напір — від кількості робочих коліс.

В таблиці 4 наведено дослідження впливу кількості робочих коліс ротора на динамічні характеристики насосного агрегата при лінійному зменшенні ступінчастості ротора. Жорсткість внутрішнього корпусу незмінна.

Відносний вплив на частоти коливань ротора та внутрішнього корпусу розрахований по відношенню до вихідної моделі системи вертикального насосного агрегата в цілому (таблиця 5).

Висновки

Проаналізовано динамічні характеристики вертикальних відцентрових насосних агрегатів, що відносяться до класифікації VS6, яка вказана в API 610 (11-е видання).

Досліджено динамічні характеристики консервативної моделі ротора та внутрішнього корпусу вертикального відцентрового насосного агрегата та системи в цілому.

Встановлено, що динамічні характеристики парціальних консервативних моделей окремих елементів значно відрізняється від динамічних характеристик системи вертикального насосного агрегата в цілому. Причому відносний вплив внутрішнього корпусу насоса на динамічні характеристики ротора збільшується в залежності від зменшення жорсткості внутрішнього корпусу насоса.

Таблиця 3 — Власні частоти коливань вертикального насосного агрегата

Елемент	Власна частота коливань елемента, Гц	Відповідна власна частота коливань системи, Гц	Відносна різниця, %
	39,2	37,1	5,7
Ротор	85,4	83,4	2,4
	169,9	159,5	6,5
Внутрішній корпус	52,5	51,4	2,1
	294,7	296,8	-0,7

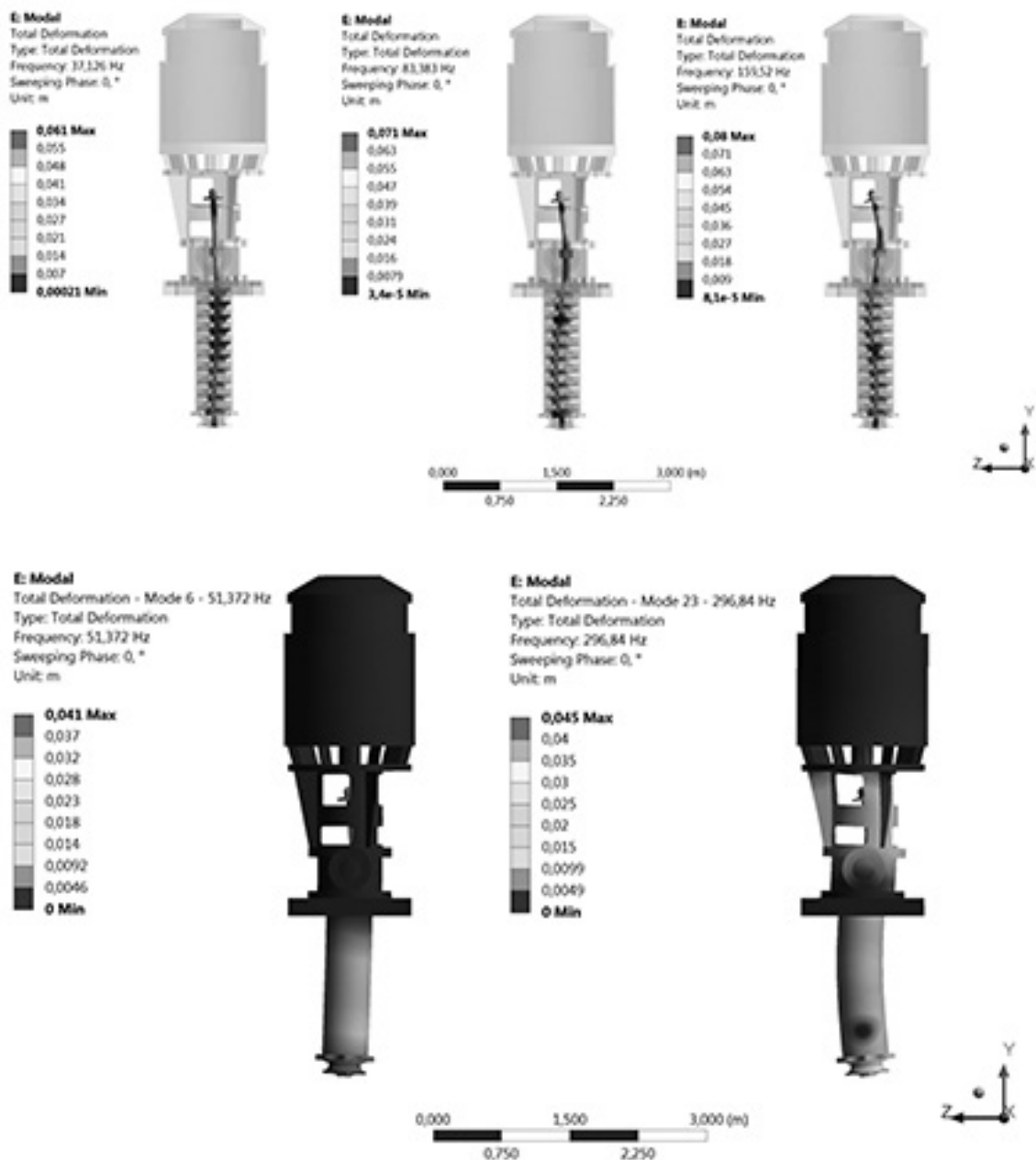


Рисунок 7 — Форми коливань системи вертикального насосного агрегата

Таблиця 4 — Вплив кількості робочих коліс ротора на динамічні характеристики насосного агрегата

Кількість робочих коліс	Частота ротора, Гц			Частота внутр. корпуса, Гц	
	1-а	2-а	3-я	1-а	2-а
9	35,5	82,1	158,0	51,0	296,6
8	29,8	82,0	157,8	50,8	296,3
7	29,8	81,9	157,5	50,5	296,1
6	29,5	81,8	157,4	50,4	295,9
5	27,5	81,3	157,3	50,4	295,9
4	25,8	80,6	157,3	50,3	295,8
3	24,5	79,8	157,0	50,3	295,8
2	23,6	79,1	156,6	50,3	295,7
1	23,3	78,7	156,3	50,3	295,6

Таблиця 5 — Відносний вплив кількості робочих коліс ротора на динамічні характеристики насосного агрегата

Кількість робочих коліс	Відносний вплив, %				
	Частота ротора			Частота внутр. корпуса	
	1-а	2-а	3-я	1-а	2-а
9	4,31	1,56	0,92	0,76	0,07
8	19,68	1,68	1,07	1,17	0,17
7	19,68	1,80	1,25	1,75	0,24
6	20,49	1,92	1,32	1,95	0,30
5	25,88	2,52	1,38	1,95	0,30
4	30,46	3,36	1,38	2,14	0,34
3	33,96	4,32	1,57	2,14	0,34
2	36,39	5,16	1,82	2,14	0,37
1	37,20	5,64	2,01	2,14	0,40

Досліджено вплив ступінчастості насоса на динамічні характеристики вертикального відцентрового насосного агрегата.

Зміна ступінчастості насоса значно впливає на першу власну частоту коливань ротора насоса, що пояснюється зменшенням еквівалентної жорсткості вала в районі центра мас ротора.

Література

1. J.F. Guich. Centrifugal Pumps — Second edition. — Berlin, 2010. — 964 pg.
2. R.E. Schwartz, R.M. Nelson. Acoustic Resonance Phenomena In High Energy Variable Speed Centrifugal Pumps. 1st International Pump Users Symposium. — Texas, 1984. — Pg. 23-28.
3. Тимохин, Ю.В. Рациональные способы снижения шума и вибрации высоконапорных центробежных насосов // Будівництво, реконструкція та експлуатація конструкторцій і споруд залізничного транспорту. — 2012. — № 31. — С. 202—211.
4. Вибрация энергетических машин: Справочное пособие / Под ред. Н.В.Григорьева. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1974. — 464 с.
5. Вибрации в технике: Справочник. Т.3. Колебания машин, конструкций и их элементов / Под ред. Ф.М.Диментберга и К.С.Колесникова. — М.: Машиностроение, 1980. — 544 с.
6. Марцинковский, В.А. Бесконтактные уплотнения роторных машин. — М.: Машиностроение, 1980. — 200 с.
7. Григорьев, Н.В. Динамика упругих муфт // Энергомашиностроение. 1975. — № 7. — С. 8—11.
8. Алексеев, С.П. Борьба с шумом и вибрацией в машиностроении / С.П. Алексеев, А.М. Казаков, А.А. Колотилов. — М.: Машиностроение, 1970. — 208 с.
9. Васильев, В.А. Исследование влияния соединения трубопроводов с насосом на вибрационное состояние насоса / В.А. Васильев, Л.Е. Чегурко // Химическое и нефтяное машиностроение. — 1978. — № 4. — С. 8.
10. Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries. ANSI/API Standard 610 Eleventh Edition, September 2010/ISO 13709: 2009, (Identical) Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries.
11. Руденко, А.А. Особенности динамики вертикальных насосных агрегатов АЭС / А.А. Руденко, А.С. Яценко, Д.С. Вакула, В.И. Симоновский, А.Н. Козлов // Промислова гідравліка і пневматика. — 2016. — № 3. — С. 11—16.
12. Программный комплекс ANSYS 14.5. Лицензионное соглашение 673888.

References

1. J.F. Guich. Centrifugal Pumps — Second edition. — Berlin, 2010. — 964 pg.
2. R.E. Schwartz, R.M. Nelson. Acoustic Resonance Phenomena In High Energy Variable Speed Centrifugal Pumps. 1st International Pump Users Symposium. — Texas, 1984. — Pg. 23-28.
3. Timokhin, Yu.V. Ratsionalnyie sposoby snizhenie shuma i vibratsii vysokonapornykh tsentrobezhnykh nasosov // Budivnitstvo, rekonstruktsiya ta ekspluatatsiya konstruktсий i sporud zaliznichnogo transportu. — 2012. — № 31. — S. 202—211.
4. Vibratsiya energeticheskikh mashin: Spravochnoe posobie / Pod red. N.V.Grigoreva. — L.: Mashinostroenie. Leningr. Otd., 1974. — 464 s.
5. Vibratsii v tekhnike: Spravochnik. T.3. Kolebaniya mashin, konstruktсий i ikh elementov / Pod red. F.M. Dimentberga i K.S.Kolesnikona. — M.: Mashinostroenie, 1980. — 544 s.
6. Martsinkovskiy, V.A. Beskontaknyie uplotneniya rotornykh mashin. — M.: Mashinostroenie, 1980. — 200 s.
7. Grigorev, N.V. Dinamika uprugikh muft // Energomashinostroenie. — 1975. — № 7. — S. 8—11.
8. Alekseev, S.P., Kazakov A.M., Kolotilov A.A. Borba s shumom i vibratsiey v mashinostroenii.— M.: Mashinostroenie, 1970. — 208 s.
9. Vasilev, V.A., Chegurko L.E. Issledovanie vliyaniya soedineniya truboprovodov s nasosom na vibratsionnoe sostoyanie nasosa // Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie. 1978.— № 4.— S. 8.
10. Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries. ANSI/API Standard 610 Eleventh Edition, September 2010/ISO 13709: 2009, (Identical) Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries.
11. Rudenko, A.A. Osobennosti dinamiki vertikalnykh nasosnykh agregatov AES / A.A. Rudenko, A.C. Yaschenko, D.S. Vakula, V.I. Simonovskiy, A.N. Kozlov // Promislova gidravlika i pnevmatyka.— 2016.— № 3.— S. 11—16.
12. Programmnyi kompleks ANSYS 14.5 litsenzionnoe soglashenie 673888.

Надійшла 15.04.2017 року

Динаміка вертикальних насосних агрегатів

Dynamics of vertical pump units

А.С. Ященко,
А.А. Руденко, Д.С. Вакула,
В.И. Симоновський,
О.М. Козлов

A.S. Yaschenko,
A.A. Rudenko, D.S. Vakula,
V.I. Simonovsky,
O.M. Kozlov

Мета. Визначення міри впливу жорсткості корпусу відцентрових насосних агрегатів на виникнення просторових коливань корпусу й ротора насоса. З'ясування умов зниження віброактивності відцентрових насосних агрегатів.

Методи дослідження. Аналіз динамічних характеристик ротора, внутрішнього корпусу та системи вертикального насосного агрегата в цілому. Розрахунок перших трьох власних частот коливання ротора, внутрішнього корпусу та всієї системи вертикального насосного агрегата.

Результати дослідження. Проведено аналіз динамічних характеристик ротора, внутрішнього корпусу насоса та системи вертикального насосного агрегата в цілому, виконаний за умов номінальної роботи насоса. У результаті аналізу динамічних характеристик ротора розраховано перші три власні частоти коливань. Виконано аналіз динамічних характеристик конструкції насосного агрегата без ротора насоса. Отримано перші три власні частоти коливань внутрішнього корпусу вертикального насоса. Виконано аналіз динамічних характеристик системи вертикального насосного агрегата (корпус насоса включно з ротором), отримано перші три власні частоти коливань системи. Проаналізовано взаємний вплив ротора та внутрішнього корпусу одне на одного.

Заклучення. Виконано аналіз динамічних характеристик вертикальних відцентрових насосних агрегатів, що відносяться до класифікації VS6, яку наведено в API 610 (11-е видання). Досліджено динамічні характеристики консервативної моделі ротора та внутрішнього корпусу насоса та системи вертикального відцентрового насосного агрегата в цілому.

Ключові слова: вертикальний насосний агрегат, динамічні характеристики, динамічна система, ротор, внутрішній корпус насоса, власні частоти коливань.

Aim. Determination of the degree of influence of discharge bowls stiffness on rotordynamics. Clarification of the conditions for reducing the vibroactivity of centrifugal pump units.

Method of research. Analysis of the dynamic characteristics of the rotor, discharge bowls and vertical pump unit system. Calculation of the first three natural frequencies for the rotor, discharge bowls and vertical pump unit system.

Results of research. The analysis of the dynamic characteristics of the rotor, discharge bowls and vertical pump unit system was performed under the nominal operating conditions of the pump. Based on the results of the analysis of the dynamic characteristics of the rotor, the first three natural frequencies were calculated. The analysis of the dynamic characteristics of the pump unit design without the pump rotor was performed. The first three natural frequencies of the vertical pump unit discharge bowls have been obtained. The analysis of the dynamic characteristics of vertical pump unit system (pump can and rotor) has been carried out; the first three natural frequencies of the system have been obtained. Mutual influences between pump rotor and discharge bowls have been analyzed.

Conclusion. The analysis of the dynamic characteristics of vertical centrifugal pump units of VS6 type (represented at API 610, the 11th edition) was performed. The dynamic characteristics of the conservative model of the rotor, discharge bowls and vertical centrifugal pump unit were investigated.

Key words: vertical pump unit, dynamic characteristics, dynamic system, rotor, pump discharge bowls, natural frequencies.