

**Кундо Ю.А., Корсун В.Е., Федоренко А.А.**

*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры  
(ул. Сумская, 40, Харьков, 61002, Украина; e-mail: [yuriykundo@gmail.com](mailto:yuriykundo@gmail.com); [korvik@ukr.net](mailto:korvik@ukr.net);  
[a\\_gunchenko@ukr.net](mailto:a_gunchenko@ukr.net); [orcid.org/0000-0001-7950-3142](https://orcid.org/0000-0001-7950-3142); [orcid.org/0000-0002-9402-5457](https://orcid.org/0000-0002-9402-5457);  
[orcid.org/0000-0002-2539-6131](https://orcid.org/0000-0002-2539-6131))*

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

Выполнено исследование вибрационных режимов работы системы «двигатель-насос» насосных агрегатов. Экспериментально получены зависимости виброскорости опор ротора электродвигателей СТД -5000-2 от частоты вращения при питании от преобразователей частоты ПЧВН-12. Даются рекомендации по соблюдению вибрационных режимов работы насосных агрегатов и выбору управляющей автоматизированной системы.

**Ключевые слова:** насосный агрегат, электродвигатель, частотное регулирование, вибрация, виброизмерительные преобразователи.

**Введение.** При переходе на частотное регулирование производительности насосных агрегатов возникают опасения появления недопустимых вибраций ротора синхронного двигателя типа СТД-5000 (три метра между опорами ротора). Поэтому актуальной является задача исследования вибрационных режимов работы системы «двигатель-насос» при частотном регулировании. Актуальность обусловлена возможностью возникновения повышенной вибрации за счет пульсирующего электромагнитного поля между статором и ротором двигателя, а также за счет повышения вибрации насоса при понижении его оборотов.

Наиболее ответственным элементом в насосном агрегате является приводной электродвигатель. Силы, вызывающие колебания в электродвигателе, по своей природе подразделяются на силы механического и магнитного характера. В быстроходных электродвигателях с частотой вращения 3000 об/мин преобладают вибрации за счет механической несбалансированности ротора. В крупных тихоходных машинах с частотой вращения до 1000 об/мин основным источником вибрации являются электромагнитные силы [1].

Динамическая прочность электродвигателя определяется в основном вибропрочностью ротора при низкочастотной вибрации от 1 до 100 Гц. Причинами низкочастотной вибрации в электромашинах с частотой вращения до 50 Гц (3000

об/мин), являются: небаланс ротора, несоосность привода, нарушение геометрии цепи, двойная жесткость ротора.

Существенное значение имеют электромагнитные силы, действующие в воздушном зазоре между статором и ротором электромашины. Эти силы имеют характер вращающихся или пульсирующих силовых волн, величина которых зависит от электромагнитных нагрузок и параметров активных частей электромашины. В большинстве типов электромашин значение магнитной вибрации лежит в диапазоне частот 100 – 4000 Гц. Наибольшую интенсивность имеет вибрация, возбуждаемая основной волной вращающегося магнитного поля. Частота этой вибрации равна удвоенной частоте питающей сети, а величина ее во многом зависит от статора электромашины.

Анализ пространственно-временных гармоник магнитного поля в воздушном зазоре электродвигателя при его питании от тиристорного преобразователя частоты показал [1], что даже незначительные искажения кривой питающего напряжения и тока являются источником возникновения значительной вибрации. Особенно сильное возрастание вибрации наблюдается в асинхронных электродвигателях, питаемых от тиристорных преобразователей, в которых не предусмотрены специальные схемные решения для сглаживания кривой питающегося тока. Частотный спектр вибрации в этих случаях становится

особенно насыщенным не только в области высоких, но и низких частот.

**Материалы и методы исследования.** При изучении поперечных колебаний электрической машины основное внимание уделяют определению критических частот вращения. Правильно сконструированный вал имеет критические частоты вращения, достаточно удаленные от рабочих. У вала на двух опорах с нагруженной консолью, как известно, имеются две критические частоты вращения. Первая из них – низшая критическая частота, при которой инерционные силы, действующие в пролете между опорами и на консоли, направлены в противоположные стороны. При второй критической частоте (высшей) инерционные силы направлены согласен (в одну сторону). Обычно для электродвигателей практическое значение имеет только первая критическая частота вращения, которая указывается в паспорте (например, для СТД-5000-2 она равна 2230 об/мин).

Кроме обычной критической частоты вращения, которая возбуждается небалансом ротора, в горизонтальных валах возникает повышенная вибрация при частоте вращения, равной половине критической (в вертикальных электромашинках эта вибрация отсутствует). Эти вибрации возбуждаются массой ротора совместно с двойной жесткостью и называются критической частотой второго рода. В синхронных двигателях двойная жесткость двухполюсного ротора обусловлена наличием больших зубцов в пазовой зоне бочки и двух пазов для токоподвода в зоне хвостовины. Наличие двойной жесткости в роторе приводит к тому, что даже при отсутствии в роторе небаланса на опоры действует возбуждающая сила, которая в течении одного оборота два раза меняет свое значение. Если вал вращается с частотой в два раза меньше критической, то импульсы этой силы имеют частоту, равную частоте собственных колебаний, вследствие чего возникает повышенная вибрация. Этот вид колебаний возможен при более высоких частотах вращения, соответствующих половинам нечетных форм колебаний.

В насосном агрегате, состоящем из электродвигателя и насоса, имеют место крутильные колебания. При работе электродвигателя в агрегате уровень вибрации во многом зависит от правильного сопряжения роторов и насосов, т. е. от их центровки.

Для снижения напряжений от крутильных колебаний в валу и элементах ротора сочленение его с насосом часто выполняется с помощью эластичной муфты.

Требования ограничения уровней вибрации электромашин предусматривают контроль их вибрации в нормальных эксплуатационных (рабочих) режимах.

При оценке вибрации электрических машин в качестве нормируемых параметров устанавливаются [1,2,5,6]: среднеквадратическое значение вибрационной скорости, мм/с, в диапазоне частот 10–1000 Гц; среднеквадратическое значение вибрационной скорости, мм/с, в октавной полосе частот, включающей в себя частоту вращения ротора или якоря; пиковое значение вибрационного перемещения, мкм.

Для электромашин с двумя и более частотами вращения испытания проводят для каждой частоты вращения.

Точность измерения вибрации зависит от измерительной аппаратуры, способа установки вибродатчиков, точек измерения и режима работы испытуемого насосного агрегата [3-8]. В качестве датчиков используют акселерометры, осуществляющие преобразование ускорения в электрический сигнал. Датчики изготавливаются на основе пьезокерамических преобразователей (ЦТС и др.), обладающих пьезоэффектом. Масса датчика, жестко укрепляемого на электромашине или насосе, не должна превышать десятой доли массы вибрирующей части агрегата [10].

Для контроля вибрационных режимов агрегатов, представляющих систему «электродвигатель – насос», применяют в основном контрольно-сигнальную аппаратуру с помощью которой осуществляется измерение текущих значений вибрации и выдаются сигналы о превышении предельных значений виброскоростей.

Так, например, для контроля вибрации газотурбинных двигателей и другого аналогичного оборудования используют контрольно-сигнальную виброизмерительную аппаратуру типа ВВК-005. Эта аппаратура применяется в автоматизированных системах управления (АСУ) газоперекачивающих станций и электростанций с судовым газотурбинным двигателем.

Контроль вибрации менее ответственных агрегатов осуществляют периодически с помощью переносных виброизмерительных приборов, например, типа ВШВ-003. С помощью прибора определяют также уровень шума, возбуждаемого электродвигателями и другими вращающимися машинами.

**Результаты исследований.** На насосной станции второго подъема водопровода «Днепр» были проведены экспериментальные исследования зависимости вибрации опор ротора электродвигателей СТД-5000-2 при питании от преобразователей частоты ПЧВН-12.

Для измерения вибрации использовался измеритель шума и вибрации ВШВ-003, содержащий два пьезоэлектрических виброизмерительных преобразователя ДН-3 и ДН-4. Преобразователи жестко закреплялись на опорах ротора электродвигателей и корпусе насоса, как показано на рис. 1.

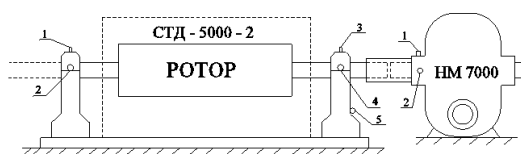


Рис. 1. Схема размещения вибродатчиков 1...5 на опорах

Вибрация подшипниковых опор ротора электродвигателя измерялись в горизонтальной и вертикальной плоскостях, проходящих через ось вращения, в поперечных направлениях. Измерялись среднеквадратические значения вибрационной скорости при различных фиксированных значениях скорости вращения ротора в диапазоне скоростей от 0 до 2350 об/мин. Результаты измерений сведены в табл. 1, а затем построены графические зависимости вибрационной скорости от

скорости вращения ротора, показанные на рис. 2.

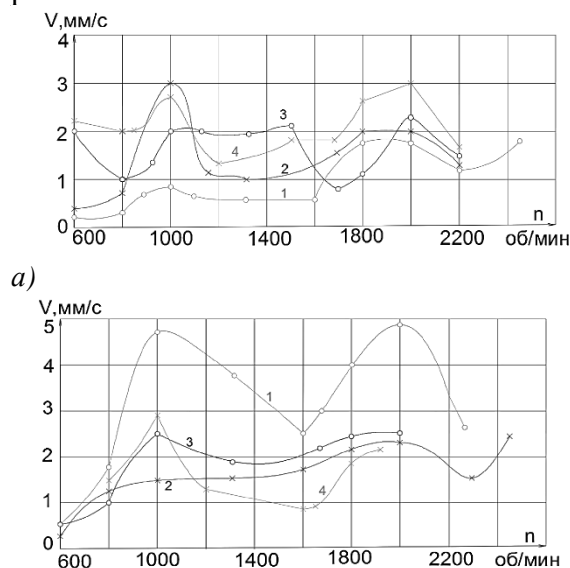


Рис. 2. Графики зависимости виброскорости  $V$  от числа оборотов  $n$  для первого а) и третьего б) агрегатов

Таблица 1 - Результаты измерения вибрации опор двигателя СТД-5000-2 и насоса НМ-7000-210

Номер насосного агрегата	Скорость вращения, об/мин	Вибрационная скорость, $V$ , мм/с						
		СТД-5000-2				НМ-7000		
		1	2	3	4	5	1	2
1	600	0,1	0,2	2,0	2,1	0,2	-	-
	800	0,2	0,5	1,0	2,0	0,4	-	-
	900	0,7	0,5	1,2	1,3	-	-	-
	1000	0,8	3,0	1,9	2,5	1,0	1,0	1,2
	1100	0,8	0,8	2,0	-	1,0	-	-
	1300	0,6	0,7	1,9	1,2	0,8	1,0	1,4
	1500	-	1,2	2,1	2,0	0,9	-	-
	1700	0,5	1,2	1,7	1,5	-	-	-
	1800	1,9	2,1	1,3	2,5	1,0	-	-
	2000	1,9	1,9	2,2	3,0	1,5	-	-
	2200	1,2	1,3	1,3	1,4	0,9	4,0	3,0
2450	1,8	3,0	-	-	-	-	-	
3	600	0,8	-	0,8	0,5	0,4	1,0	1,3
	800	1,6	1,3	0,9	1,4	0,4	1,3	1,5
	1000	5,0	1,6	2,6	2,3	1,0	1,8	1,8
	1300	3,8	1,6	1,8	1,3	0,8	1,3	1,4
	1600	2,5	2,0	-	0,9	1,1	3,4	1,7
	1700	3,0	1,7	1,7	0,8	1,2	2,4	1,5
	1800	4,0	2,1	2,2	2,0	-	-	-
	2000	4,9	2,3	2,2	-	-	-	-
	2300	2,6	1,6	-	-	-	2,2	2,1
	2450	3,3	2,5	-	-	2,0	-	-

На графиках видны повышенные вибрации при частотах вращения около 1000 об/мин, а также при частотах в диапазоне 1000 – 2000 об/мин. Это повышенные вибрации соответствует критическим частотам вращения двигателя СТД-5000-2, определенным разработчиком двигателей (частотам 1980 и 900 об/мин).

Сопоставление графиков двух агрегатов показало, что в электродвигателе третьего агрегата наиболее высокий уровень вибрации на опоре свободного конца вала ротора. Это свидетельствует о том, что подшипник свободного конца вала больше изношен, возможно из-за какой-то несносности валов двигателя и насоса.

Следует особо отметить, что наиболее высокий уровень вибрации опор ротора двигателя наблюдается при переходе из режима генератора в режим двигателя.

Дело в том, что при включенном ПЧВН двигатель продолжал вращаться за счет подпорных насосов с частотой несколько меньшей 600 об/мин.

После включения ПЧВН двигатель увеличивал обороты и именно при переходе через точку режима холостого хода возникали резкие отклонения стрелки измерителя ВШВ-003 и ощущались на слух повышенные низкочастотные вибрации. Уровень вибрации в переходном режиме не зафиксирован, т. к. переход осуществлялся быстро, а задержка на этом режиме нежелательна (может привести к нежелательным последствиям). Анализ результатов исследований показал, что контроль вибрации опор ротора можно осуществлять с помощью стационарно устанавливаемых на крышках подшипниковых опор датчиков пьезокерамических акселерометров и измерительной аппаратуры типа ВШВ-003 или контрольно-сигнальной аппаратуры типа ВВК. Установлено, что двигателя СТД-5000-2 при питании от преобразователя частоты ПЧВН не могут работать длительное время на частоте около 1000 об/мин, т. к. в этом режиме возникают вибрации сверх допустимых значений.

В насосном агрегате наиболее ответственным и чувствительным к вибрации элементом является электродвигатель.

Поэтому для соблюдения вибрационных режимов насосных агрегатов достаточно ограничения вибрации подшипниковых опор и пакетов статора электродвигателей.

Стандарт [2] устанавливает допустимые значения собственных вибраций электрических машин при приемочных и других испытаниях.

Среднеквадратическое значение вибрационной скорости подшипниковых опор и пакетов статора согласно [2] не должно превышать 4,5 мм/с, и не должно превышать 7,1 мм/с при частоте вращения 3000 об/мин и 4,5 мм/с при частоте вращения 1500 об/мин.

Среднеквадратическое значение вибрационной скорости в октавной полосе частот V0 подшипниковых опор не должны превышать значений, указанных в табл. 2. [9].

Таблица 2 - Предельные среднеквадратические значения вибрации опор подшипников ротора в октавной полосе частот

Синхронная частота, $n1$ , об/мин	3000	1500	1000	750	600
V0, мм/с	3,3	2,8	2,4	2,0	1,8

Пиковое значение вибрационного перемещения A подшипниковых опор электрических машин с синхронной частотой вращения менее 600 об/мин не должно превышать 50 мкм (норма рекомендуемая).

Установленные стандартом [2] нормируемые параметры и их допустимые значения относятся к собственным вибрациям синхронных машин в компенсационном режиме и асинхронных машин в режиме холостого хода (с дробным числом пазов) или в режиме нагрузки (с целым числом пазов).

Измерения значений указанных параметров проводятся при приемочных, периодических и типовых испытаниях на специальных стендах, а также могут исполняться при установке и сдаче в эксплуатацию новых электрических машин.

Практически после монтажа электродвигателя и сочленения его с рабочим механизмом (насосом) проверяют величину вибрации подшипниковых опор

ротора и пакета статора двигателя в номинальном режиме работы. При оценке вибрации электродвигателя в качестве нормируемого параметра принимается среднеквадратическое значение вибрационной скорости  $V$ , мм/с.

Как при первом пуске, так и в процессе эксплуатации электродвигателей среднеквадратическое значение вибрации опор подшипников ротора не должно превышать значений, указанных в табл. 3 [9].

*Таблица 3 - Предельные среднеквадратические значения вибрации опор подшипников ротора*

Синхронная частота, $n$ , об/мин	3000	1500	1000	750	600	500	300
$V$ , мм/с	6,6	5,6	4,8	4,4	3,6	3,0	1,8

Среднеквадратическое значение вибрационной скорости пакета статора не должно превышать 4,5 мм/с.

Для поддержания работоспособности насосных агрегатов необходимо во время эксплуатации систематически наблюдать за работой электродвигателей и выполнять тщательный уход в соответствии с инструкцией по эксплуатации.

Перед пуском электродвигателя, после длительного бездействия, а также после ремонтных и профилактических работ необходимо проверить величину вибрации подшипниковых опор ротора и пакетов статора. Максимальное среднеквадратическое значение вибрационной скорости подшипниковых опор, измеренное в трех взаимно перпендикулярных направлениях, не должно превышать значений, указанных в табл. 3 (для двигателей СТД – не более 6,6 мм/с, для НМ – не более 4,8 мм/с). Среднеквадратическое значение вибрационной скорости пакетов статора не должно превышать 4,5 мм/с для любого электродвигателя.

**Обсуждение результатов.** Виброскорости пакетов статоров следует измерять с помощью датчиков ДН-3 или ДН-4 со специальными щупами. Виброскорости подшипниковых опор необходимо контролировать при жестко закрепленных винтовыми соединениями датчиками на крышке подшипника и на самой опоре.

При вибрации подшипниковых опор, превышающих допустимые нормы необходимо остановить электродвигатель, выяснить причину повышенной вибрации и устранить её. Причинами повышенной вибрации могут быть: овальность шин вала, нарушение центровки линии вала агрегата, ослабление крепления к фундаменту, передача вибрации от насоса. Методы устранения неисправностей электродвигателей изложены в соответствующих инструкциях [9].

Следует отметить, что при нормальном состоянии насосного агрегата при частотном регулировании (при питании электродвигателей от преобразователей частоты) могут возникать повышенные вибрации опор на критических частотах вращения (для двигателя СТД-5000-2 критические частоты около 1000 об/мин и 1960 об/мин). Следует избегать режимов работы насосных агрегатов, соответствующих критическим частотам вращения электродвигателей, для чего необходимо периодически изменять скорости вращения на  $\pm 100$  об/мин относительно критической. Так, если задана производительность насосного агрегата, соответствующая критической скорости вращения  $n_{кр}$ , то следует задавать режим работы  $n = n_{кр} \pm 100$ , сохраняя среднее значение скорости вращения  $n_{ср} = n_{кр}$ .

**Выводы.** Для обеспечения непрерывного контроля вибрации электродвигателей и защиты их от аварийных вибрационных режимов рекомендуется насосные станции оснащать автоматизированными системами управления [11-14], обеспечивающими последовательно-параллельный контроль вибрации в восьми точках агрегата; защиты агрегата путем выдачи сигналов при достижении опасного (предупредительного) и аварийного уровней вибрации; переключения контактов выходных исполнительных реле предупредительной и аварийной сигнализации каждого канала, а также реле общей сигнализации, которые могут быть использованы для автоматического отключения насоса; измерения средних квадратических значений виброскорости и

виброперемещения и непрерывное представление и регистрация в аналоговой форме текущих значений контролируемых параметров. Для вновь проектируемых насосных станций рекомендуется схема автоматического управления, включающая режимы повышенной вибрации насосных агрегатов. Такое устройство позволяет осуществлять непрерывный контроль вибрации регулируемого агрегата и регулировать режим работы так, чтобы исключались скорости вращения с повышенными вибрациями электродвигателя.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Шубов И. Г. Шум и вибрация электрических машин. Л.: Энергия, 1986. 206 с.
2. ГОСТ 20815-93 (МЭК 34-14-82). Машины электрические вращающиеся. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотой оси вращения 56 мм. и более. Измерение, оценка и допустимые значения. 7 с.
3. Макаров Р. А. Средства технической диагностики машин. М.: Машиностроение, 1981. 223 с.
4. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учеб. пособие. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2014. 378 с.
5. Генкин, М. Д., Соколова А. Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
6. Балицкий Ф.Я., Иванова М.А., Соколова А.Г., Хомяков Е.И. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. М.: Наука, 1984. 120 с.
7. Донче Ю.Б. Исследование радиально-совмещенного преобразователя импедансного дефектоскопа методом электрического моделирования. *Дефектоскопия*. 1983. №7. С. 53-69.
8. Астахов Н.В., Лопухина Е.М., Медведев В.Т. и др. Испытания электрических микромашин: учеб. пособие / под ред. Н.В. Астахова. М.: Высшая школа, 1984. 272 с.
9. Номенклатурный каталог синхронных машин. Электродвигатели серии СДН-2, СДН-3-2. АО «Завод крупных электрических машин». Новая Каховка, 2016. 66 с.
10. Петрухин В. В., Петрухин С. В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации. М.: Инфра-Инженерия, 2010. 176 с.
11. Ляткер И. И., Мордкович А. Г., Несвижский А. М. Система непрерывного контроля и диагностики синхронных машин. *Электротехника*. 1996. № 3. С. 44-47.
12. Корсун В.Е., Пермьяков В.И., Сенченко П.И. Информационная система на базе ПЭВМ и модуля связи с объектом для анализа виброакустических процессов в технологическом оборудовании. *Науковий вісник будівництва*. 2001 Вип.13. С. 162-164.
13. Барков А.В., Баркова Н.А., Грищенко Д.В. Идентификация состояния механизмов с узлами вращения по результатам вибрационного мониторинга и контроля температуры. СПб., 2011. 80 с.
14. Василенко С.В., Елжов Ю.Н., Пугачева О.Ю. Автоматизированная система вибрационного контроля оборудования САЭС. *Глобальная ядерная безопасность*. 2015. №3 (16). С. 85-89.

**Кундо Ю.А., Корсун В.Е., Федоренко А.А. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРАЦІЙ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ НАСОСНИХ АГРЕГАТИВ.** Виконано дослідження вібраційних режимів роботи системи «двигун-насос» насосних агрегатів. Експериментально отримані залежності віброшвидкості опор ротора електродвигунів СТД-5000-2 від частоти обертання при живленні від перетворювачів частоти ПЧВН-12. Даються рекомендації щодо дотримання вібраційних режимів роботи насосних агрегатів і вибору керуючої автоматизованої системи.

**Ключові слова:** насосний агрегат, електродвигун, частотне регулювання, вібрація, вібровимірювальні перетворювачі.

**Kundo Yu. A., Korsun V.E., Fedorenko A.A. RESULTS OF THE FREQUENCY-REGULATED ELECTRIC MOTORS VIBRATIONS RESEARCH FOR PUMPING UNITS.** The research of vibration modes operation for the engine-pump system of pumping units has been performed. Experimentally obtained dependence of the rotor supports vibration velocity for electric motors STD-5000-2 at the power supply from the frequency converter PChN-12. Recommendations on the observance of the vibration modes of operation of pumping units and a control automated system the choice of are given.

**Keywords:** pump unit, electric motor, frequency regulation, vibration, vibration measuring transducers.