



Научно-технический
и информационный журнал

Журнал зарегистрирован
в Минпечати РФ
Рег. свид. ПИ №7-11904

Учредители

Ассоциация компрессорщиков
и пневматиков
ООО «Издательство «КХТ»

Издатель

ООО «ИИЦ «КХТ»

Главный редактор

Галеркин Ю.Б., д.т.н., проф.
Yu.B. Galerkin, doctor of Engineering
Science
yuri_galerkin@mail.ru

Зам. главного редактора

Морозова Э.И.
E.I. Morozova
morozova@chemtech.ru

Научный редактор

Крузе А.С.

Редакционная коллегия

Амин Хаджу, д.т.н.

Amin Haghjoo (Germany),
PhD Technology Leader

Бухолдин Ю.С., канд. техн. наук

Bukholdin Yu.S. (Ukraine), cand. of Eng. Sc.

Демиков К.Е., д.т.н., проф.

Demikhov K.E., d-r of Eng. Sc., prof.

Захаренко В.П., д.т.н., проф.

Zakharenko V.P., d-r of Eng. Sc., prof.

Игнатъев Д.К., к.т.н.

D.K. Ignatiev (USA), PhD(Eng)

Кузнецов Л.Г., д.т.н., проф.

Kuznetsov L.G., d-r of Eng. Sc., prof.

Кулагин В.А., д.т.н., проф.

Kulagin V.A., d-r of Eng. Sc., prof.

Парафейник В.П., д.т.н., проф.

Parafeinik V.P. (Ukraine), d-r of Eng. Sc., prof.

Сальников С.Ю., канд. техн. наук

Salnikov S.Yu., cand. of Eng. Sc.

Сухомлинов И.Я., д.т.н., проф.

Sukhomlinov I.Ya., d-r of Eng. Sc., prof.

Хисамеев И.Г., д.т.н., проф.

Khisameev I.G., d-r of Eng. Sc., prof.

Цыганков А.В., д.т.н., проф.

Tsigankov A.V., d-r of Eng. Sc., prof.

Шайхутдинов А.З., канд. техн. наук

Shaikhutdinov A.Z., cand. of Eng. Sc.

Ян Крысинский, д.т.н., проф.

Ian Krysiniski (Poland), D.Sc., PhD, D.h.c.

mult

Ян Кеннет Смит, д.т.н., проф.

Ian Kenneth Smith (UK), B.Sc(Eng), DIC, PhD

Дизайн и компьютерная верстка

Япин О.Ю.

Адрес редакции

107258, Москва,
ул. 1-я Бухвостова, 12/11,
ИИЦ «КХТ»
Для почты: 107061, Москва, п/о 061, а/я 547,
ИИЦ «КХТ»
Тел./факс: (495) 223-66-35
E-mail: info@chemtech.ru
www.compressortech.ru

Журнал входит в перечень ВАК РФ

Юридическую ответственность
за достоверность рекламы
несут рекламодатели.
Полная или частичная перепечатка
материалов допускается только
с письменного разрешения редакции.

© «Компрессорная техника и пневматика», 1991

Сдано в набор 20.07.2016.
Подписано в печать 10.08.2016.
Формат 60×90/8. Печать офсетная.
Усл.-печ.л. 5,0. Зак. 1395

Отпечатано в ООО «АМА-пресс»,
111116, Москва., Зельев пер., 3

Компрессорная техника и Пневматика

Compressors & Pneumatics

6/сентябрь
2016

СОДЕРЖАНИЕ

Мехника

Хоринек А., Пестов Д.А., Москаленко Д.С.

Преимущества компрессорных клапанов с профилированными пластинами
A. Horinek, D. Pestov, D. Moskalenko. Compressor Valves Benefit from Profiled Plate 2

Расчет и конструирование

Бусаров С.С., Гошля Р.Ю., Громов А.Ю., Недовенчаный А.В., Бусаров И.С., Титов Д.С.

Математическое моделирование процессов теплообмена
в рабочей камере тихоходной ступени поршневого компрессора
S.S. Busarov, R.Yu. Goshlya, A.Yu. Gromov, A.V. Nedovenchany, I.S. Busarov, D.S. Titov.
Mathematical Modeling of Processes of Heat Exchange in the Working Chamber of Low-speed
Reciprocating Compressors STAGE 6

Галеркин Ю.Б., Дроздов А.А., Рекстин А.Ф., Солдатова К.В.

Альтернативный способ расчета характеристики коэффициента
теоретического напора центробежного компрессорного колеса
Yu.B. Galerkin, A.A. Drozdov, A.F. Reksin, K.V. Soldatova. Alternative
Method of Centrifugal Compressor Loading Factor Modeling 11

Чернявский Л.К.

Профилирование сварных входных устройств
центробежных компрессоров с радиальным подводом газа
L.K. Chernyavsky. Shaping of Centrifugal Compressors input Devices
having Weld Construction and Radial Intake 19

Кузнецов Ю.В., Никифоров А.Г.

Расчет количества сконденсированной влаги при охлаждении сжатого воздуха
Yu.V. Kuznetsov, A.G. Nikiforov. The Calculation of the Amount
of Condensed Moisture on Cooling the Compressed Air 23

Теория и методы испытаний

Кистойчев А.В., Машечкин Н.В., Урьев Е.В.

Вибрационная надежность турбокомпрессоров на магнитных подшипниках
A.V. Kistoychev, N.V. Mashechkin, E.V. Ur'ev. Vibrational Reliability
of Turbochargers on Magnet Bearings 29

Сусликов Э.В., Мазитов И.Д., Ахметзянов А.М., Сальников С.В., Москалев А.В.

Стенд-имитатор центробежного компрессора
с электромагнитным подвесом ротора
E.V. Suslikov, I.D. Mazitov, A.M. Akhmetzyanov, S.V. Salnikov, A.V. Moskalyov.
Simulator Stand for Centrifugal Compressor with Electromagnetic Suspension of the Rotor 34

Энергетическое машиностроение

Крюков О.В.

Стартер-генераторные комплексы газотурбинных газоперекачивающих агрегатов
O.V. Kryukov. The Starter-Generator Complexes of Gas-turbine Gas Compressor Units 38

Технологии

Чигарин В.И., Поморцев Е.Н.

Применение в компрессоростроении
аморфных и порошковых сплавов для защиты сталей от коррозии
V.I. Chigarin, E.N. Pomortsev. Using Amorphous and Powder Alloy
for Steel Cladding in Compressor Construction 43

Информация

Померанцев М.М. Информация о продукции, прошедшей сертификацию
в Ассоциации «СЦ НАСТХОЛ» за июль – август 2016 г. 45

IX Международный промышленно-экономический Форум
«Стратегия объединения» 46

Поздравляем с юбилеем!

Борису Сергеевичу Хрусталеву 70 лет 33

Стенд-имитатор центробежного компрессора с электромагнитным подвесом ротора

Э.В. Сусликов, И.Д. Мазитов, А.М. Ахметзянов

(ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», Группа «ГМС»),

С.В. Сальников, А.В. Москалёв (ООО Фирма «Калининградгазприборавтоматика»)

Приведено описание стенда-имитатора центробежного компрессора НЦ16-76/1,44 с электромагнитным подвесом ротора, созданного для обучения специалистов ПАО «Газпром», а также приведены характеристики электромагнитов, изготовленных для стенда-имитатора.

Ключевые слова: центробежный компрессор, система магнитного подвеса, система автоматического управления электромагнитным подвесом, электромагнитные подшипники, шкаф управления, собственные частоты, критические частоты, виброперемещение ротора.

Simulator Stand for Centrifugal Compressor with Electromagnetic Suspension of the Rotor
E.V. Suslikov, I.D. Mazitov, A.M. Akhmetzyanov (JSC Niiturbokompressor n.a.V.B. Shnepp, HMS Group),
S.V. Salnikov, A.V. Moskalov (JSC Kaliningradgazpriboravtomatika)

Description of the simulator stand for centrifugal NTs16-76/1,44 compressor with electromagnetic suspension of the rotor, created for training of specialists of PJSC Gazprom is provided, and also characteristics of the electromagnets made for the simulator stand are provided.

Keywords: centrifugal compressor, system of magnetic suspension, automatic control system of electromagnetic suspension, electromagnetic bearings, control cabinet, natural frequencies, critical frequencies, vibration displacement of a rotor.

Применение систем магнитного подвеса в центробежных компрессорах требует наличия квалифицированного обслуживающего персонала, способного не только проводить техническое обслуживание системы магнитного подвеса, заключающееся во внешнем ее осмотре и необходимых проверках, но и выполнять настройку шкафа управления для обеспечения работоспособности компрессора.

Для выполнения данной задачи ООО Фирма «Калининградгазприборавтоматика» (ООО Фирма «КГПА»), являясь разработчиком шкафа управления электромагнитными подшипниками, в июле 2014 г. заключила договор с АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» (входит в состав Группы ГМС) на разработку и изготовление стенда-имитатора центробежного компрессора с электромагнитным подвесом ротора.

Уникальность стенда-имитатора заключается в том, что конструкция с ротором на электромагнитных подшипниках является имитатором нагнетателя НЦ16-76/1,44 по критическим частотам ротора. Стенд-имитатор предназначен для обучения специалистов ПАО «Газпром» эксплуатации и обслуживанию системы электромагнитного подвеса ротора центробежного компрессора на базе системы автоматического управления электромагнитными подшипниками (САУ ЭМП) «Неман-100», поставляемой ООО Фирма «КГПА» на объекты ПАО «Газпром». Стенд предназначен для следующих целей:

- изучения принципов работы, состава и технических решений САУ ЭМП «Неман-100»;
- отработки навыков эксплуатации, обслуживания и настройки САУ ЭМП «Неман-100»;
- отработки навыков метрологического контроля системы измерения положения ротора;

- изучения принципов поиска неисправности в системе электромагнитного подвеса;
- изучения параметров системы на различных режимах работы.

Стенд-имитатор разработан согласно следующим основным техническим требованиям ООО Фирма «КГПА» и включает:

- имитатор центробежного компрессора (имитатор ЦК) с «гибким» ротором, критические частоты которого близки к характеристикам нагнетателя НЦ16-76/1,44;
- электромагнитный подвес, включающий радиальные и осевой электромагнитные подшипники, датчики радиального положения ротора с возможностью их установки как с одной, так и с другой стороны от радиальных электромагнитов, датчик осевого положения, а также датчик частоты вращения ротора и страховочные подшипники;
- пластинчатую муфту;
- асинхронный электродвигатель с регулируемой частотой вращения до 6 000 об/мин (мощность до 10 кВт, напряжение 380 В);
- опорную раму, объединяющую составные части в единую электромеханическую установку;
- преобразователь частоты с диапазоном регулирования 0,5...100 Гц.

Габаритные размеры стенда (Д×Ш×В) – не более 2100×600×600 мм; масса в сборе – не более 500 кг.

При создании стенда-имитатора были решены следующие задачи:

- проведены расчеты динамики роторной системы и электромагнитных подшипников;
- проработана компоновка электромагнитных подшипников в имитаторе центробежного компрессора;



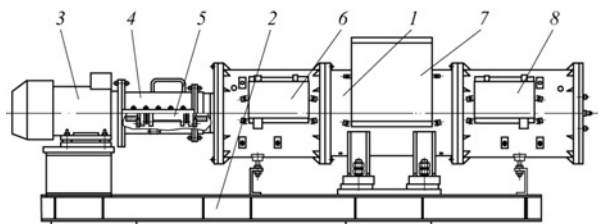


Рис. 1. Общая компоновка стенда-имитатора:
1 – имитатор ЦК; 2 – опорная рама; 3 – электродвигатель;
4 – защитный кожух; 5 – муфта; 6, 8 – клеммная коробка;
7 – шкаф драйверов датчиков положения ротора

- разработана конструкция магнитных подшипников;
- разработана конструкция стенда-имитатора.

Общая компоновка стенда-имитатора представлена на рис. 1. Конструкция стенда-имитатора представляет сборку на опорной раме имитатора ЦК и электродвигателя (АДЧР100L2У3) мощностью 5,5 кВт, валы которых соединены пластинчатой муфтой (МПП-2-6-75-Т Дина-тэк). Для предотвращения контакта с вращающимися элементами стенда-имитатора подвижные элементы (конец вала электродвигателя, вал муфты, конец вала имитатора) закрыты защитным кожухом, состоящим из двух половин (верхней и нижней), на которых установлен концевой выключатель, сигнал которого задействован в системе защиты от включений электродвигателя. На боковой стороне стенда-имитатора установлены распределительные клеммные коробки для соединения электромагнитов со шкафом управления САУ ЭМП «Неман-100» и шкаф драйверов для соединения датчиков положения ротора с системой измерения. Шкаф управления электродвигателем (ШУД) выполнен в виде отдельного корпуса настенного исполнения и устанавливается на некотором расстоянии от стенда-имитатора, определяемом длиной входящего в комплект поставки кабеля (не более 10 м).

Подключение системы электроснабжения 220/380В 50 Гц осуществляется через контактор ШУД. В ШУД предусмотрены органы местного включения и отключения контактора. Включение и отключение электродвигателя на вращение осуществляется органами управления преобразователя частоты ATV61 фирмы Schneider Electric. При этом обеспечивается защита от несанкционированных включений электродвигателя, которая заключается в следующем:

- включение электродвигателя на вращение разрешено только при наличии сигнала (типа «сухой контакт») «КВ замкнут» (КВ – концевой выключатель на защитном кожухе) и отсутствии сигнала «Авария МП»;
- при невыполнении одного из указанных условий электродвигатель не включается на вращение или автоматически отключается, если был включен.

Конструктивная компоновка имитатора ЦК, реализующая требования по изгибным характеристикам, приведена на рис. 2.

В разработанной компоновке имитатора ЦК применены две идентичные сборки электромагнитных опор, каждая из которых содержит радиальный электромагнит, осевой односторонний электромагнит, датчик радиального положения ротора, страховочный подшипник. На приводной стороне ротора установлен радиальный страховочный подшипник, а на неприводной стороне – радиально-осевой. На неприводной стороне имитатора также установлен датчик осевого положения ротора и датчик частоты вращения ротора.

Необходимые изгибные характеристики ротора имитатора обеспечиваются за счет соответствующего выбора диаметра и длины среднего участка ротора имитатора ЦК и выбора масс установленных дисков (роторов осевых электромагнитов и корректирующих дисков).

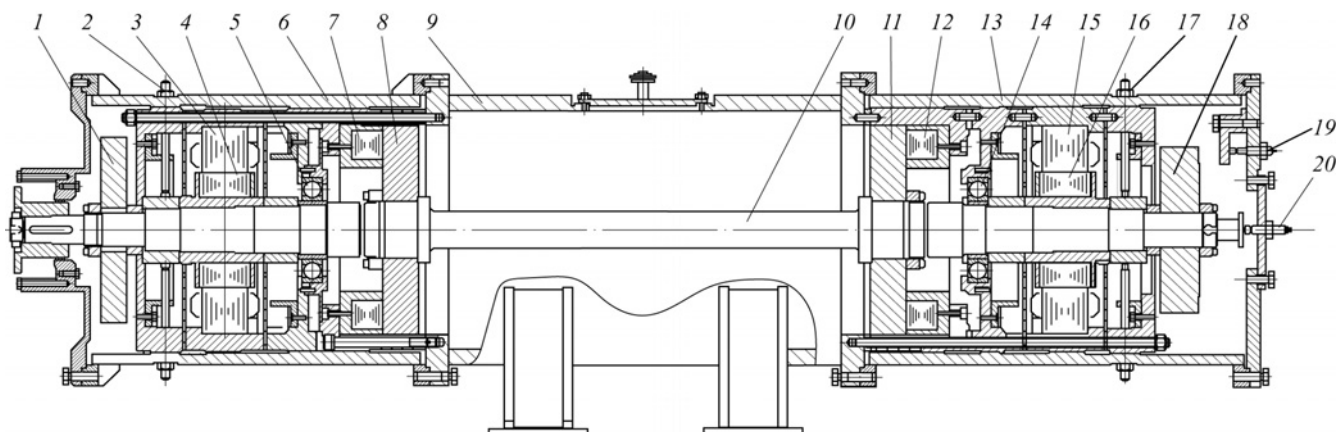


Рис. 2. Компоновка имитатора ЦК с «гибким ротором»:
1, 18 – корректирующие диски; 2, 17 – датчики радиального положения ротора; 3, 15 – радиальные электромагниты;
4, 16 – роторы радиальных электромагнитов; 5, 14 – радиальный и радиально-осевой страховочные подшипники;
6, 9, 13 – корпуса имитатора; 7, 12 – осевые электромагниты; 8, 11 – роторы осевых электромагнитов;
10 – ротор имитатора; 19 – датчик осевого положения ротора; 20 – датчик частоты вращения ротора

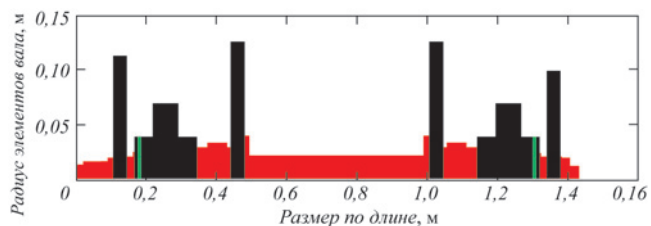


Рис. 3. Расчетная схема ротора имитатора

Расчеты динамических характеристик роторной системы стенда-имитатора осуществлялись по алгоритмам и программам, разработанным в АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа».

Эскиз расчетной модели роторной системы приведен на рис. 3.

Собственные формы ротора имитатора с недемпфированными опорами и жесткостью в опорах 1 Н/мкм приведены на рис. 4, где треугольниками показано расположение центров радиальных опор, а стрелками – расположение датчиков магнитного подвеса.

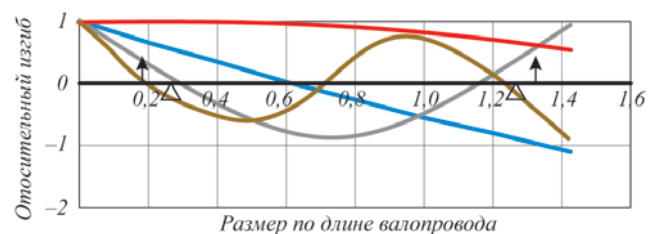


Рис. 4. Собственные формы ротора имитатора ЦК

Собственные частоты ротора имитатора ЦК и нагнетателя НЦ16-76/1,44 приведены в таблице.

Сравнение собственных частот изгибных форм колебаний имитатора ЦК и нагнетателя НЦ16-76/1,44 показывает их отличие по первой изгибной форме на 5,8%, а по второй – на 3%.

В рамках данного проекта для стенда-имитатора были разработаны и изготовлены радиальные и осевые электромагнитные подшипники.

Основные характеристики электромагнитов

Электромагнит	Радиальный	Осевой
Число полюсов статора	8	2
Наружный диаметр, мм	295	250
Внутренний диаметр статора, мм	140	150
Осевая длина корпуса статора, мм	90	50

Число катушек	8	1
Число катушек зоны	2	1
Соединение катушек зоны	После-	дователь-
	ное	–
Число витков в катушке	60	145
Индуктивность зоны при центральном положении ротора, Гн	0,025	0,094
Сопротивление катушек зоны, Ом	0,185	0,4
Односторонний воздушный зазор, мм	0,5	0,8
Наружный диаметр ротора, мм	139	250
Активная длина пакета стали ротора и статора, мм	50	–
Максимальный ток электромагнитов, А	15	15
Максимальная тяговая сила зоны, Н	2 300	10 000

Для управления стендом-имитатором (рис. 5) поставлена серийная САУ ЭМП «Неман-100» в конфигурации, использовавшейся на КС «Помарская» (ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород»).



Рис. 5. Стенд-имитатор с САУ ЭМП «Неман-100»

Состав системы САУ ЭМП «Неман-100»:

- шкаф управления электромагнитными подшипниками (ШУ ЭМП);
- шкаф приборный измерения положения ротора;
- шкаф драйверов первичных датчиков положения ротора.

Шкаф управления предназначен для отработки алгоритмов регулирования положения ротора (удержание ротора в равновесном состоянии относительно геометрического центра по страховочным подшипникам). В шкафу выполнено секционирование силовой и контроллерной части управления ЭМП.

Шкаф драйверов предназначен для питания и обработки сигналов с вихретоковых датчиков.

Изделие	Собственные частоты ротора с жесткостью в опорах 1 Н/мкм, с ⁻¹ (Гц)			
	Параллельная форма	Коническая форма	1-я изгибная форма	2-я изгибная форма
Нагнетатель НЦ16 (с учетом гироскопических моментов)	41,8 (6,65)	66,8 (10,63)	378,9 (60,3)	982,8 (156,4)
Имитатор ЦК (с учетом гироскопических моментов)	141,4 (22,5)	153 (24,3)	358 (57)	1013 (161,2)

В приборном шкафу установлены нормализаторы сигналов датчиков положения ротора и напряжения 0..10 В для передачи в шкаф управления ЭМП.



Рис. 6. Панель оператора ШУ ЭМП

САУ ЭМП «Неман-100» позволяет контролировать следующие параметры:

- амплитуду виброперемещения и величину смещения (сдвига) по двум осям в каждом из радиальных подшипников и осевом подшипнике, мкм;
- величину тока в каждой обмотке электромагнитных подшипников, А;
- напряжение питания электромагнитов, В;
- температуру силовых сборок в шкафу управления, °С.

ШУ ЭМП имеет встроенную графическую панель оператора (рис. 6), с помощью которой можно изучать:

- спектрограммы и осциллограммы сигналов вибрации ротора;
- амплитудно-частотные характеристики контура регулирования;
- орбиты движения ротора;
- расчет центральной точки положения ротора;
- методику настройки параметров регуляторов и цифровых фильтров;
- методику калибровки измерительных каналов;
- алгоритмы аварийных защит.

Включение электромагнитного подвеса происходит нажатием кнопки на лицевой панели шкафа управления. После «вывешивания» ротора по команде с верхнего уровня частотный преобразователь в ШУД начинает разгонять электродвигатель с ротором имитатора ЦК до номинальной частоты вращения. В частотном преобразователе можно задать алгоритм роста частоты вращения вала привода, полностью имитирующий разгонную характеристику штатного ГПА с ЦК на электромагнитных подшипниках. При разгоне ротор проходит критические частоты вращения, на которых наблюдается рост вибрации. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) замкнутого контура регулирования положения ротора стенда-имитатора, снятые в диапазоне частот 0...200 Гц

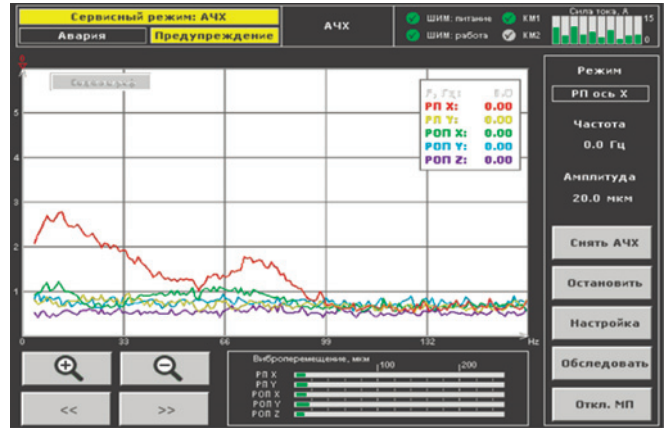


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика замкнутого контура регулирования САУ ЭМП ротора нагнетателя

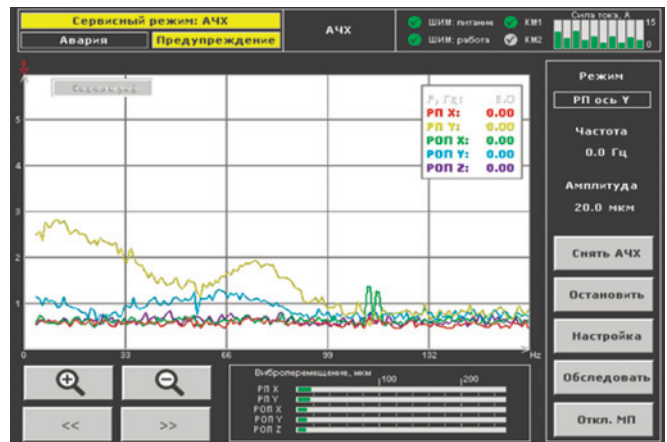


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика замкнутого контура регулирования САУ ЭМП ротора стенда-имитатора

близки к АЧХ системы регулирования ЭМП нагнетателя НЦ-16. Например, подъем амплитуды виброперемещения на передней опоре нагнетателя наблюдается на частоте 75 Гц при минимальной жесткости системы ЭМП, равной 1,5 Н/мкм (рис. 7). Отстройка жесткости ЭМП стенда-имитатора также вызывает подъем уровня вибрации на частоте 75 Гц, что соответствует характеристике «гибкого» ротора при прохождении собственной частоты 1-й изгибной формы колебаний (рис. 8).

В августе 2015 г. в обучающем центре ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» была проведена проверка работоспособности стенда-имитатора с электромагнитным подвесом ротора. Частота вращения ротора регулировалась в пределах 0...5 500 об/мин. Амплитуда виброперемещений ротора не превышала 60 мкм.

Для работы со стендом-имитатором также была разработана программа по обучению инженерно-технического персонала ПАО «Газпром» принципам работы, настройке и техническому обслуживанию системы электромагнитного подвеса САУ ЭМП «Неман-100».