

## **АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ШЛАМОВЫХ НАСОСОВ**

У статті наведено результати експериментальних досліджень та їх статистичний та кореляційний аналіз. Приведено розраховані залежності та висновки щодо використання цих залежностей.

### **INDUSTRIAL TESTS RESULTS ANALYSIS OF SLURRY PUMP ENGINES**

Results of experimental tests are described in article. Statistical and correlation analysis are makes and shown. Calculated statistical and correlation dependencies are described.

Согласно прогнозам современных исследователей, разведанные запасы нефти и газа будут полностью исчерпаны через 50-70 лет. Есть шанс, что будут открыты новые месторождения, но и себестоимость добычи во вновь обнаруженных месторождениях с большой долей вероятности станет заметно выше. Кроме того, разведка и освоение новых месторождений потребует значительных капитальных затрат, что не замедлит сказаться на цене энергоносителей. Те же проблемы связаны с будущим развития атомной энергетики и угольной промышленности, разведанные запасы которых пока еще велики. При этом, население Земли неуклонно растет, что влечет за собой увеличение скорости потребления всех ресурсов, что еще больше взвинчивает цену на энергетические запасы и ресурсы. В таких условиях на первый план выходит задача энергосбережения.

Как показано в работе [1], в Украине такая проблема особенно актуальна, ввиду высокого процента энергопотребления предприятиями горнометаллургического комплекса. Также в работе [1] указано, что мониторинг и адаптивное управление автоматизированным процессом гидротранспортирования способны дать экономию от 9 до 21% потребляемой электроэнергии.

Для построения системы автоматического управления каким-либо агрегатом необходимо всестороннее изучение свойств этого агрегата, режимов его работы и режимов взаимодействия с соседними по производственному циклу агрегатами. Для подобного рода исследований необходимо иметь соответственно приспособленную аппаратуру и методику исследований.

Мощность, потребляемая насосом, не полностью реализуется в машине на полезную работу, но также теряется на преодоление гидравлических сопротивлений, протекание части расхода через уплотнения, механические потери (определяемые трением в сальниках, подшипниках и др.). По сравнению с обычными насосами в шламовых возникают дополнительные сопротивления вследствие взаимодействия твердых частиц с потоком, деградации частиц и других явлений. Наличие дополнительных потерь в насосах для гидросмесей уменьшает их КПД примерно на 10-20% по сравнению с насосами для воды; КПД уменьшается и по мере износа деталей машин. Полное представление об

эксплуатационных свойствах насосов для гидросмеси дает их рабочая характеристика. Ее определяют по результатам испытаний машины на воде и гидросмеси.

Отсюда, а также из работ [1,2], следует, что для диагностики состояния системы гидротранспорта будет достаточно контроля таких параметров, как показаний в реальном времени потребляемой насосом мощности, показаний датчика плотности пульпы и состояния заслонки насоса. Кроме того, нужно знать механические параметры насоса в идеальном состоянии. Для измерения подобных показаний и предназначена система сбора и обработки диагностических данных горных агрегатов [3].

Для уточненного построения математической модели данного технологического процесса необходимо проведение эксперимента, способного подтвердить теоретические предпосылки и отсеять малозначимые параметры, которыми в дальнейшем возможно будет пренебречь. Основной целью научного исследования такого рода состоит в том, чтобы выявить эффект воздействия определенного фактора на изучаемую зависимую переменную [4]. В нашем случае желательно получить зависимость частот в спектре потребляемой мощности от независимых параметров, таких как плотность пульпы, положение заслонки и изношенность механизмов и систем гидротранспорта.

В условиях промышленного эксперимента основная цель заключается в извлечении максимального количества объективной информации о влиянии изучаемых факторов на производственный процесс с помощью наименьшего числа дорогостоящих наблюдений. Если в научных приложениях методы дисперсионного анализа используются для выяснения реальной природы взаимодействий, проявляющейся во взаимодействии факторов высших порядков, то в промышленности учет эффектов взаимодействия факторов часто считается излишним в ходе выявления существенно влияющих факторов.

На рисунке 1 приведена часть таблицы исходных данных, поскольку по причине размеров таблицы 94x20 ячеек, привести ее в полном объеме не представляется технически возможным.

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Название	Var1	Var2	Var3	Var4	Var5	Var6	Var7
1	11-18-29-	0,274399	0,374094	0,251007	0,139975	0,214262	0,021215	0,166414
2	11-18-29-	0,274381	0,373768	0,251157	0,139364	0,214673	0,020943	0,166264
3	11-19-15-	0,265581	0,376715	0,245229	0,149437	0,210964	0,034103	0,169687
4	11-19-15-	0,267677	0,37749	0,247095	0,149227	0,211966	0,032882	0,169937
5	11-27-23-	0,075738	0,088352	0,06749	0,028391	0,056764	0,010792	0,034114
6	11-27-23-	0,075229	0,091049	0,063766	0,025544	0,059402	0,015441	0,036295
7	11-27-23-	0,060718	0,100614	0,057156	0,045745	0,052489	0,021251	0,047203
8	11-27-23-	0,059665	0,101795	0,056542	0,047484	0,052128	0,022914	0,047728
9	11-32-07-	0,038977	0,084948	0,039141	0,045455	0,039277	0,027045	0,040481
10	11-32-07-	0,040462	0,084568	0,039992	0,044122	0,039641	0,025305	0,040323
11	14-07-49	0,02081	0,017004	0,02217	0,007066	0,016603	0,001467	0,006006
12	14-07-49-	0,018712	0,017022	0,025104	0,008531	0,017006	0,008937	0,015652
13	воздух1	0,102498	0,09277	0,093401	0,076577	0,08152	0,061242	0,071336
14	воздух2	0,13132	0,116893	0,093698	0,083744	0,074726	0,065494	0,067989
15	воздух3	0,021281	0,039547	0,019377	0,015613	0,017241	0,004916	0,013323

Рис. 1 – Фрагмент таблицы исходных данных

Таблица исходных данных состоит из 20 наблюдений и 92 переменных: 88 - зависимых непрерывных переменных (показания спектра Фурье сигнала потребляемой приводным двигателем 5AM31563 мгновенной мощности), и 5 - независимых непрерывных переменных (плотность пульпы, уровень поворота заслонки насоса и три частоты основных колебаний двигателя).

Разведочный анализ является прелюдией к основной части анализа и позволяет исследователю лучше представить природу исследуемого объекта или процесса. Данный элемент анализа состоит в основном из стандартных методов анализа и визуализации. В данной части исследования необходимо провести анализ распределений переменных для более точного и правильного дальнейшего анализа. Так, на рис. 2 показан анализ распределения мощности одной из частот, составляющих спектр потребляемой мощности двигателя насоса.

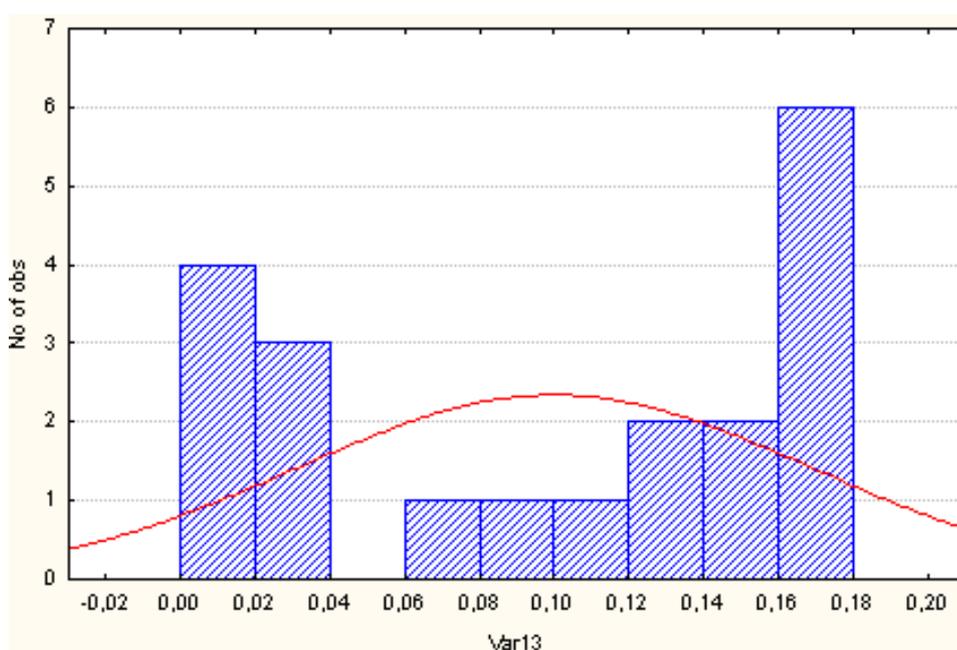


Рис. 2 – Гистограмма распределения частоты 12 Гц.

Следующим этапом анализа является - анализ линейных взаимосвязей независимых и зависимых переменных, корреляционный анализ. По итогам данного этапа возможно будет наглядно получить степени зависимости переменных друг от друга, что особенно важно для доказательства зависимостей частот составляющих спектр мощности от независимых переменных. В нашем случае будут использованы частные коэффициенты корреляции, описывающие линейную взаимосвязь между двумя переменными, без учета влияния других переменных.

Если приведенный корреляционный анализ укажет на наличие линейной зависимости между зависимой и независимой переменными, то уточнить форму такой зависимости будет возможно при помощи регрессионного анализа.

Correlations (Spreadsheet1.sta)								
Marked correlations are significant at $p < .05000$								
N=20 (Casewise deletion of missing data)								
Variable	Var75	Var76	Var77	Var78	Var79	Var80	Var81	Var82
Var67	0,80	0,85	0,83	0,87	0,39	0,83	0,64	0,87
Var68	0,83	0,87	0,77	0,94	0,21	0,95	0,59	0,97
Var69	0,84	0,89	0,75	0,91	0,40	0,82	0,78	0,92
Var70	0,75	0,79	0,44	0,82	0,21	0,63	0,64	0,76
Var71	0,88	0,87	0,82	0,91	0,43	0,89	0,71	0,93
Var72	0,24	0,44	0,25	0,43	-0,08	0,51	0,35	0,56
Var73	0,17	0,37	0,31	0,22	0,55	0,14	0,57	0,20
Var74	0,73	0,82	0,72	0,78	0,48	0,75	0,68	0,76
Var75	1,00	0,91	0,80	0,94	0,55	0,79	0,75	0,83
Var76	0,91	1,00	0,84	0,97	0,56	0,83	0,84	0,87
Var77	0,80	0,84	1,00	0,82	0,62	0,80	0,67	0,75
Var78	0,94	0,97	0,82	1,00	0,42	0,91	0,74	0,93
Var79	0,55	0,56	0,62	0,42	1,00	0,16	0,77	0,22
Var80	0,79	0,83	0,80	0,91	0,16	1,00	0,53	0,96
Var81	0,75	0,84	0,67	0,74	0,77	0,53	1,00	0,66
Var82	0,83	0,87	0,75	0,93	0,22	0,96	0,66	1,00
Var83	0,81	0,83	0,76	0,89	0,22	0,95	0,62	0,97
Var84	0,83	0,86	0,76	0,92	0,28	0,93	0,66	0,97
Var85	0,84	0,89	0,81	0,94	0,28	0,94	0,64	0,97
Var86	0,77	0,78	0,87	0,79	0,49	0,74	0,58	0,74
Var87	0,84	0,84	0,81	0,91	0,22	0,95	0,53	0,95
Var88	0,30	0,31	0,40	0,19	0,61	-0,05	0,32	-0,01
Плотность	-0,54	-0,73	-0,48	-0,66	-0,37	-0,55	-0,73	-0,66
Заслонка	0,08	-0,16	0,08	0,00	-0,27	0,12	-0,39	0,03

Рис. 3 – Часть таблицы корреляционных зависимостей

Как видно из рисунка 3, практически все зависимые сильно коррелируют между собой, частично это связано с неоптимально проведенным экспериментом, частично с сильной зависимостью элементов спектра друг от друга.

Из исследования корреляционной матрицы можно сделать вывод, что плотность пульпы обратно пропорциональна подавляющему большинству элементов спектра потребляемой мощности, а положение заслонки обратно пропорционально влияет на такие частоты в спектре как 125 Гц, 44 Гц, 38 Гц и 32 Гц. Кроме этого, можно заметить взаимозависимости между частотами самого спектра, что может быть обусловлено как характерными особенностями процесса, так и – что особенно важно для эксперимента – зависимостью спектральных характеристик от параметров механизма.

Как показано в работе [1], механические колебания двигателя отображаются в спектрах потребляемой мощности двигателей. Соответственно, одним из приоритетов исследования является выявление корреляционной зависимости между спектром потребляемой мощности двигателя шламowego насоса и механическими колебаниями системы гидротранспорта.

В исследуемом насосе 5-ГРк8 есть такие движущиеся детали, как рабочее колесо насоса, соединительный вал, ротор двигателя и подшипники. Частота вращения ротора, соединительного вала и рабочего колеса совпадает и составляет 12,1 Гц. В подшипниках стандарта 3536 находятся ролики диаметром 35 мм, что составляет 7/60 от диаметра вала, с которым подшипник непосредственно контактирует. Отсюда следует, что частота вращения роликов данных подшипников составляет 103 Гц. При этом необходимо учитывать тот факт, что все движущиеся детали привода гидротранспортной системы могут создать колебания не основной частоты, что может являться как следствием неточной установки, так и следствием износа данной детали.

Таким образом, следующим этапом исследования должен быть статистический анализ, направленный на поиск в спектре потребляемой приводным двигателем мгновенной мощности пиков частот, ответственных за колебания вышеописанных элементов конструкции.

Для данной задачи возьмем спектр потребляемой мощности, полученный на работающем в оптимальном режиме насосе по пульпе с плотностью  $1090 \text{ кг/м}^3$ . График, иллюстрирующий данный спектр приведен на рис. 4.

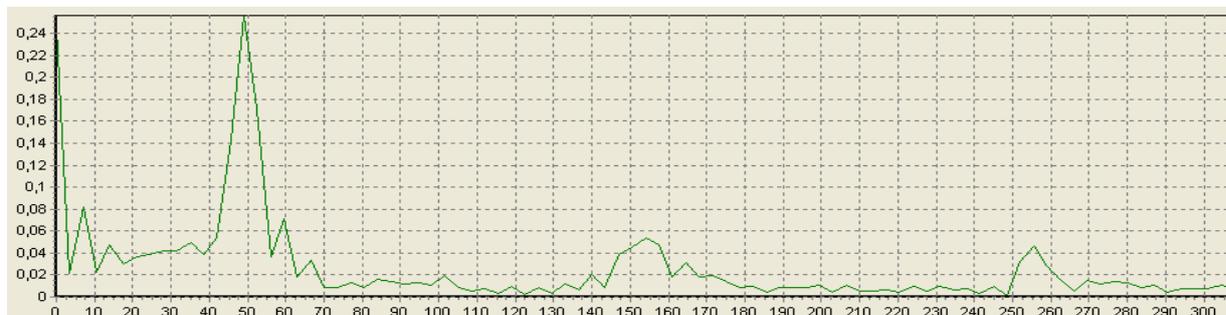


Рис. 4. Спектр потребляемой мощности насоса 5-ГРк8 при оптимальном режиме и плотности  $1090 \text{ кг/м}^3$

На данном примере наглядно видны теоретически предсказанные пики частоты в 12, и 103-105 Гц. При этом ярко выделяется пик с частотой 50 Гц, происхождение которого легко объяснимо: эта частота питающего переменного тока. То же происхождение имеют пики, кратные 50 Гц. Кроме вышеописанных пиков имеют место пики частот менее 3 Гц, и в диапазоне частот от 4 до 10 Гц. Их происхождение можно объяснить влиянием системы трубопроводов на насос и, как следствие, его двигатель. Для подтверждения данных утверждений проведен многофакторный дисперсионный анализ спектра потребляемой приводным двигателем насоса мгновенной мощности.

Многофакторный дисперсионный анализ позволяет оценивать влияние на наблюдаемую переменную (в нашем случае – на частоту в спектре) произвольного числа независимых факторов. Решение задачи дисперсионного анализа заключается в проверке гипотез о независимости результатов измерений от независимых факторов.

В конечном итоге необходимо произвести регрессионный анализ, уточняющий результаты корреляционного, и позволяющий установить наличие причинной связи между переменными, и предсказывать значения зависимых переменных по показаниям независимых переменных.

Таблица 1 – Корреляционный анализ частоты 2 Гц с плотностью пульпы и положением заслонки насоса

	Var2	Плотность	Заслонка
Var2	1,00	-0,68	-0,01
Плотность	-0,68	1,00	0,69
Заслонка	-0,01	0,69	1,00

Таблица 2 – Регрессионный анализ для зависимой переменной (Частота 2 Гц) от независимых переменных.

	$\beta$	Ст. Погр. $\beta$	B	Ст. погр. B	t(17)	p-уровень
Intercept			1,19803	0,140724	8,5133	0,000000
Плотность	-1,27909	0,124664	-1,66618	0,162392	-10,2602	0,000000
Заслонка	0,86782	0,124664	0,99243	0,142566	6,9612	0,000002

В таблицах 1 и 2 представлены результаты корреляционного и регрессионного анализа зависимой переменной - частоты 2 Гц от двух независимых переменных – плотности пульпы и положения заслонки. Такие анализы были проделаны со всеми частотами спектра.

В результате статистического и корреляционного анализа результатов промышленных испытаний систем гидротранспорта в процессе работы были выявлены следующие зависимости:

1. Большинство частот спектра потребляемой мощности приводного двигателя насоса 5-ГРк8 системы гидротранспортирования пульпы обратно пропорциональны плотности, а частоты от 0 до 3 Гц прямо пропорциональны плотности транспортируемой пульпы;

2. Спектр потребляемой мощности отчетливо фиксирует механические колебания системы гидротранспортирования, что дает возможность контроля механических характеристик системы гидротранспорта по показаниям мощности;

3. Положение заслонки отчетливо выделяется в изменении ряда характерных частот, что дает возможность контроля и управления и по этому фактору.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приходченко С.Д. Зависимость спектра потребляемой мощности электродвигателя от физических параметров механизма. // Геотехническая механика. Межвед. сб. науч. работ. Институт геотехнической механики им. М.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2006. – Вып. 64. – с. 123-129.
2. Звягильский Е.Л., Блюсс Б.А., Назимко Е.И. Семененко Е.В. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения. – Севастополь: «Вебер», 2002., - 247 с.
3. Приходченко С.Д. Создание переносной системы сбора и обработки диагностических данных горных агрегатов. // Геотехническая механика. Межвед. сб. науч. работ. Институт геотехнической механики им. М.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2006. – Вып. 61. – с. 297-303
4. Гуляев А. Визуальное моделирование в среде MatLab: учебный курс. – СПб: Питер, 2000. – 432 с.

Приходченко С.Д. Анализ результатов промышленных испытаний двигателей шламовых насосов. // Геотехническая механика. Межвед. сб. науч. работ. Институт геотехнической механики им. М.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2007. – Вып. 69. – с. 84-90