

Статистический анализ экспериментальных электромагнитных характеристик пакетов роторов погружного электродвигателя

В.З. Ковалев, Э.И. Хусаинов, О.В. Архипова

Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

Аннотация: В работе исследована одна из причин возникновения локальных перегревов погружного электродвигателя, вызванная наличием в сборке погружного электродвигателя существенного разброса электромагнитных параметров пакетов ротора (ПР). Из-за наличия в сборке ПР с активным сопротивлением, значительно меньшим, чем среднее сопротивление по сборке, в ПР с сопротивлением выше среднего возрастают электрические потери, соответственно, возрастает и их тепловыделение. С помощью методов статистического анализа проведено исследование распределения электромагнитных параметров, как двумерной случайной величины, построена «свертка» двумерного закона распределения. Анализ «свертки» двумерного закона распределения электромагнитных параметров ПР показал, что имеется высокая вероятность наличия в сборке существенного разброса параметров ПР.

Ключевые слова: погружной электродвигатель, пакет ротора, статистический анализ, локальный перегрев, межремонтный период.

Сборка погружного электродвигателя (ПЭД) представляет собой чередование на валу отдельных пакетов роторов (ПР) и разделяющих их подшипниковых узлов (рис.1.а), статор и статорная обмотка ПЭД – общая [1, 2]. При этом осуществляется электромагнитное взаимодействие и взаимовлияние ПР между собой через взаимодействие со статорной обмоткой и соответствующей частью общего магнитопровода (рис.1.б), в соответствии с представлениями об элементарных электрических машинах (ЭЭМ), развитых в работах [2-4].

Исследование партии ПР из 271 экземпляра, габарита 117 (данные приведены в [5]) показало, что активные сопротивления ПР (R_p) имеют существенный технологический разброс своих значений. В данной партии пакетов отклонения значений активных сопротивлений составили величину от +34% до -25% от среднего значения равного в относительных единицах 1 о.е. Приблизительно такой же технологический разброс в этой партии имеют и индуктивные сопротивления ротора (X_p).

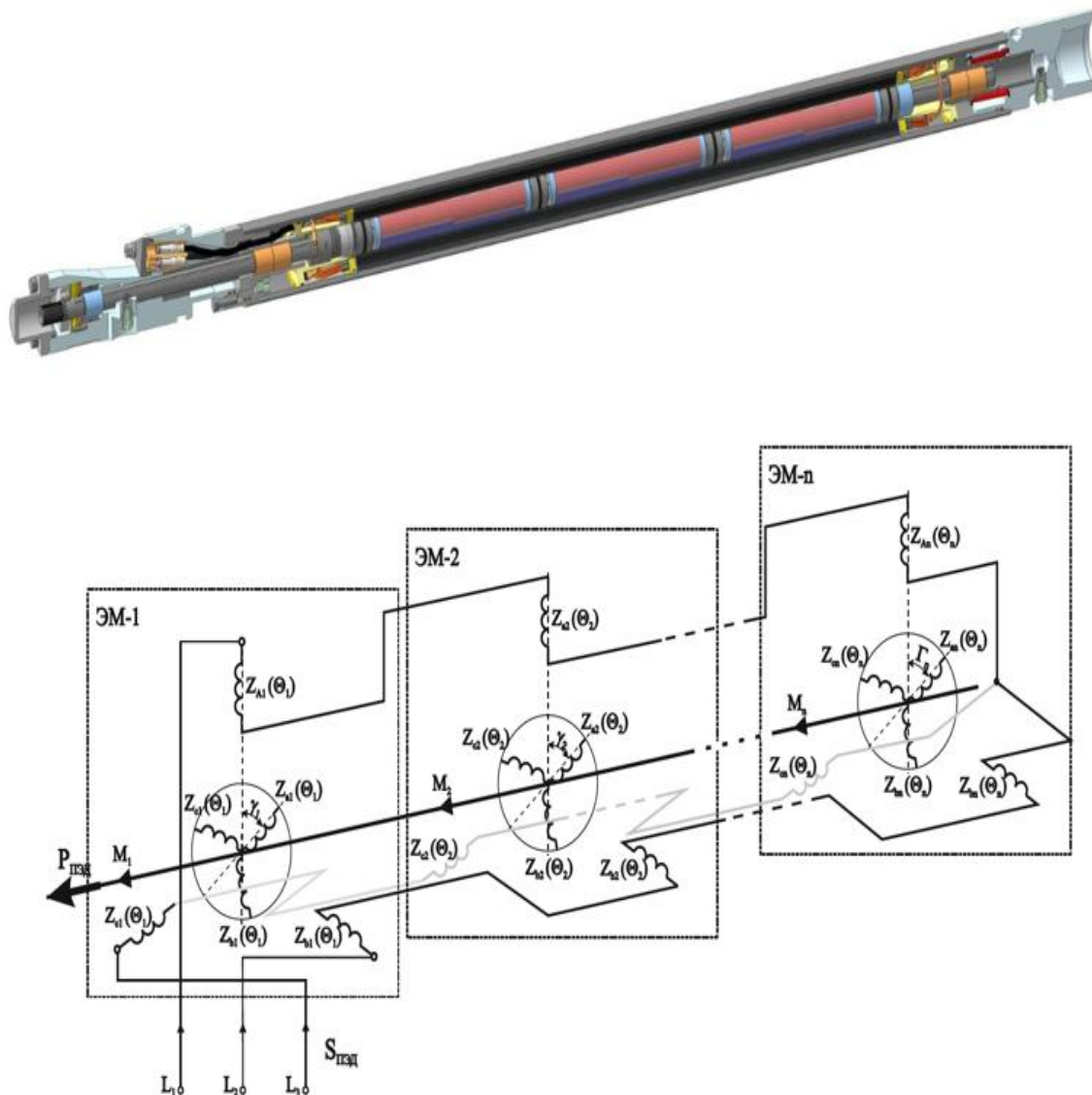


Рис. 1. а – разрез типового многопакетного погружного электродвигателя; б – фазная схема замещения погружного электродвигателя, где ЭМ-1, ЭМ-2, ..., ЭМ- n – ЭЭМ составляющие ПЭД, n – число элементарных электрических машин, в нашем случае n равно числу ПР составляющих ПЭД

Фрагмент исследуемой совокупности приведен в таблице № 1. Отметим, что исследуемым ПР номера присваивались в порядке, имитирующем существующий технологический процесс сборки пакетов ротора в условиях ремонтных предприятий.

Таблица № 1

Фрагмент исследования партии ПР, по данным [5]

№ пакета	Хп, о.е.	Рп, о.е.	Примечание
1	0,930	0,868	
2	0,962	0,978	
3	1,013	0,933	
...	
46	1,065	1,349	Рп – максимальное
...	
223	0,618	0,742	Рп – минимальное
...	
269	0,898	0,894	
270	0,966	0,953	
271	0,998	1,071	

Вычислительный эксперимент, проведенный на цифровой модели ПЭД, показал, что сборка ротора ПЭД, осуществленная выбранными из данной партии ПР с «минимальными активными сопротивлениями, приводит к увеличению КПД на 4% при номинальной нагрузке. Комплектация ПЭД пакетами, выбранными из той же партии, но с максимальными активными сопротивлениями, приводит КПД ПЭД к снижению на 3% при номинальной нагрузке» [2, 5]. Вместе с тем, по мнению, высказанному в некоторых работах [2], наиболее потенциально опасными для ПЭД оказываются те сборки, в которых ротор содержит пакет с сопротивлением R_p , существенно пониженным по отношению к среднему активному сопротивлению остальных пакетов. Примером такого случая является сборка из 8-ми ПР, приведенная на рис.2. Данная сборка осуществлена в соответствии с существующим регламентом из анализируемой партии в 271 пакет (таблица № 1). В данной сборке среднее активное сопротивление (в относительных

единицах) всех 8-ми пакетов сборки равно 1,00 о.е., среднее сопротивление 7-ми пакетов (без аномального №4) равно 1,03 о.е., активное сопротивление аномального пакета равно 0,76 о.е., что более чем на 26% меньше среднего сопротивления оставшихся пакетов. Тогда, при прочих равных условиях, в ЭЭМ с наибольшим активным сопротивлением (пакет №6), и в соответствующей части обмотки и «железа» статора (рис.2), электрические потери будут существенно больше, чем средние потери в остальных пакетах.

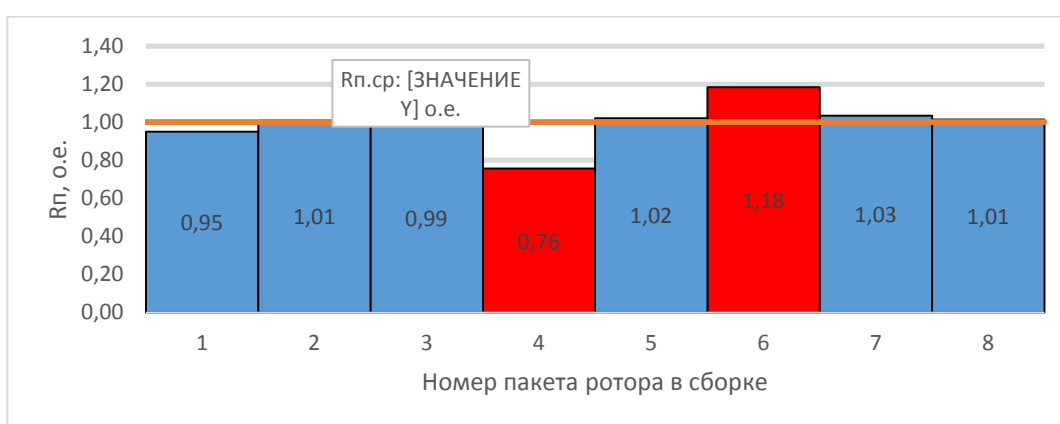


Рис. 2. – Сборка ПЭД из 8-ми пакетов роторов $R_{п.сп}$ – среднее активное сопротивление по пакетам в сборке, номер пакета соответствует номеру элементарной электрической машины

Следовательно, возрастает тепловой поток от этого пакета. При этом возникают условия для перегрева и ускоренной деградации [6-8] соответствующей части статорной обмотки ПЭД, соответствующей ЭЭМ №6 (рис.2) и, как следствие, преждевременный выход из строя всего ПЭД.

Отказ ПЭД приводит к большим экономическим [9, 10] и экологическим издержкам, связанными с подъемом погружного оборудования на поверхность сопровождающимся временной потерей герметичности скважины, его ремонтом и наладкой, а также простоем скважины [1, 11]. Понятие межремонтный период (МРП) ПЭД характеризует продолжительность работы скважины между датой вывода скважины на режим и датой ее остановки, по причине отказа.

Одновременно МРП ПЭД определяет существенную часть затрат в себестоимости добычи нефти. Соответственно, повышение МРП ПЭД позволяет решить основные экономические и экологические проблемы в процессе нефтедобычи [12, 13] и становится актуальной задачей.

Существующая практика сборки ротора ПЭД (рис.2), при которой электромагнитные свойства отдельных пакетов не учитываются, по сути носит стохастический характер, а разброс свойств комплектующих ПР нивелируется их большим количеством и соответствующим усреднением, что показано на примере активных сопротивлений короткозамкнутых обмоток ПР (рис.2). При этом постоянно сохраняется высокая вероятность возникновения локального перегрева обмотки статора и преждевременного выхода из строя всего УЭЦН.

Возникает задача оптимальной выборки комплекта ПР для сборки одного ПЭД или одновременно для нескольких ПЭД, входящих в сборки СЭС ПЭД [14]. В данной работе под СЭС ПЭД понимается – сложная энергетическая система взаимодействующих ПЭД. Такая СЭС ПЭД может возникнуть, например, при формировании куста скважин.

Решение данной задачи возможно путем управления сборкой ПЭД или СЭС ПЭД на базе методов оптимизации.

Для конструирования эвристического алгоритма оптимального выбора ПР при сборке ПЭД необходимо провести предварительный анализ статистических характеристик двумерной генеральной совокупности активных и индуктивных сопротивлений ПР (таблица № 1).

При проведении эксперимента, в каждом опыте определяли два параметра ПР – индуктивное и активное сопротивления, (\bar{X}_n, \bar{R}_n) [1, 5]. Отметим, что существует множество методик идентификации электромагнитных параметров ПЭД, как по паспортным, так и по экспериментальным данным ПЭД [15,16]. Пара случайных значений (\bar{X}_n, \bar{R}_n)

образуют двумерную совокупность с экспериментальных данных или двумерную случайную величину (X_n, R_n) . Случайные величины X_n и R_n называются составляющими двумерной случайной величины.

Воспользуемся данными из таблицы № 1. Исследуем двумерный ряд (X_n, R_n) . Построим k групп данных $[a_0; a_1], [a_1; a_2], [a_2; a_3], \dots, [a_{k-1}; a_k]$ по X_n и l групп данных $[b_0; b_1], [b_1; b_2], [b_2; b_3], \dots, [b_{l-1}; b_l]$ по R_n [16].

Введем в рассмотрение двумерный интервальный вариационный ряд – который имеет вид таблицы [17].

Таблица № 2

Общий вид двумерного интервального вариационного ряда

	$[b_{l-1}; b_l]$	$[b_{l-1}; b_l]$...	$[b_{l-1}; b_l]$
$[a_{k-1}; a_k]$	m_{11}	m_{12}		m_{1l}
$[a_{k-1}; a_k]$	m_{21}	m_{22}	...	m_{2l}
...
$[a_{k-1}; a_k]$	m_{k1}	m_{k2}	...	m_{kl}

В таблице № 2 символами m_{ij} , $i = 1, 2, \dots, l$, $j = 1, 2, \dots, k$ обозначены частоты, показывающие, сколько пар данных из генеральной двумерной совокупности (X_n, R_n) при группировке попали, соответственно, в прямоугольники $[a_{i-1}; a_i] \times [b_{j-1}; b_j]$.

Интервалы формируются следующим образом. Для составляющих X_n и R_n случайной величины, вычисляем размах R варьирования значений как разность между наибольшим и наименьшим значениями:

$$R(X_n) = \bar{X}_{n.\max} - \bar{X}_{n.\min} = 1,317 - 0,594 = 0,724 \text{ о.е.} \quad (1)$$

$$R(R_n) = \bar{R}_{n.\max} - \bar{R}_{n.\min} = 1,349 - 0,742 = 0,607 \text{ о.е.} \quad (2)$$

Размах R варьирования величин делят на k равных частей и таким образом определяют число интервалов. Число k частичных интервалов

найдем по формуле: $k \approx \sqrt{n}$, где n – объем генеральной совокупности. Тогда $k \approx \sqrt{271} \approx 16$ [17, 18].

Отметим, что число интервалов k и l для составляющих X_n и R_n случайной величины (X_n, R_n) одинаково, т.е. $k = l$.

Длину частичного интервала определим по формуле:

$$h = \frac{R}{k} \quad (3)$$

Для нашего случая имеем:

$$h(X_n) = \frac{0,724}{16} = 0,045 \text{ о.е.} \quad (4)$$

$$h(R_n) = \frac{0,607}{16} = 0,038 \text{ о.е.} \quad (5)$$

В настоящей работе, в целях симметрирования, целесообразно принять длины интервалов равными 0,05 о.е.: $h(X_n) = h(R_n) = 0,05$ о.е.

Таким образом, принимаем интервалы составляющих X_n и R_n равными: $[a_{i-1}; a_i] = [b_{j-1}; b_j]$.

Соответственно, при выборе границ интервалов, необходимо обеспечить вхождение в данные интервалы всех двумерных случайных величин (X_n, R_n) . Для этого найдем крайние значения сопротивлений, составляющих X_n и R_n случайной величины (X_n, R_n) .

Наименьшим значением сопротивления в двух составляющих X_n и R_n случайной величины (X_n, R_n) является – $\bar{X}_{n,\min} = 0,594$ о.е. Тогда, за начало a_0 и b_0 первых интервалов, интервального вариационного ряда, примем $\bar{X}_{n,\min}$, округленное до ближайшего меньшего значения кратного длине интервала $h(X_n)$: $a_0 = b_0 = 0,550$ о.е.

Максимальным значением сопротивления в двух составляющих X_n и R_n случайной величины (X_n, R_n) является – $\bar{R}_{n,\max} = 1,349$ о.е. Тогда, конец a_{16} и b_{16}

последних интервалов, принимаем $\bar{R}_{n,\max}$, округленное до ближайшего максимального значения кратного длине интервала $h(R_n)$: $a_{16} = b_{16} = 1,350$ о.е.

Полученный двумерный интервальный вариационный ряд случайной величины (X_n, R_n) представлен в таблице № 3.

Таблица № 3

Двумерный интервальный вариационный ряд случайной величины (X_n, R_n)

X_n , о.е. R_n , о.е.	0,55-0,6	0,6-0,65	0,65-0,7	0,7-0,75	0,75-0,8	0,8-0,85	0,85-0,9	0,9-0,95	0,95-1	1-1,05	1,05-1,1	1,1-1,15	1,15-1,2	1,2-1,25	1,25-1,3	1,3-1,35	Номер интервала R_n
0,55-0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0,6-0,65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
0,65-0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
0,7-0,75	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
0,75-0,8	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
0,8-0,85	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
0,85-0,9	1	0	0	0	0	2	4	7	4	2	0	0	0	0	0	0	7
0,9-0,95	0	0	0	0	2	2	10	22	11	9	2	3	0	0	0	0	8
0,95-1	0	0	0	0	0	1	2	8	32	14	5	1	0	0	0	0	9
1-1,05	0	0	0	0	0	0	1	2	23	19	10	2	3	0	0	0	10
1,05-1,1	0	1	0	0	0	0	0	1	3	19	4	3	1	1	0	1	11
1,1-1,15	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9	3	1	2	3	0	0	12
1,15-1,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	1	13
1,2-1,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	14
1,25-1,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
1,3-1,35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	16
Номер интервала X_n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	

Для интегрированного представления двумерного интервального вариационного ряда случайной величины (X_n, R_n) (таблица № 3) разработана таблица № 4, являющаяся «сверткой» таблицы № 3 относительно принятого центра в 1 о.е., или 100%, по обеим осям.

Таблица № 4

«Свертка» двумерного интервального вариационного ряда (X_n, R_n) в штуках

		Диапазон по X_p				Номер диапазона по R_p
		$> \pm 15\%$	$\pm 10-15\%$	$\pm 5-10\%$	$\pm 5\%$	
Диапазон по R_p	$> \pm 15\%$	6	1	2	5	1
	$\pm 10-15\%$	8	5	10	16	2
	$\pm 5-10\%$	8	16	29	42	3
	$\pm 5\%$	4	6	25	88	4
Номер диапазона по X_p		1	2	3	4	

Для предварительного анализа «свертки» двумерного интервального вариационного ряда (таблица № 4) строим гистограмму, представленную на рис.3.

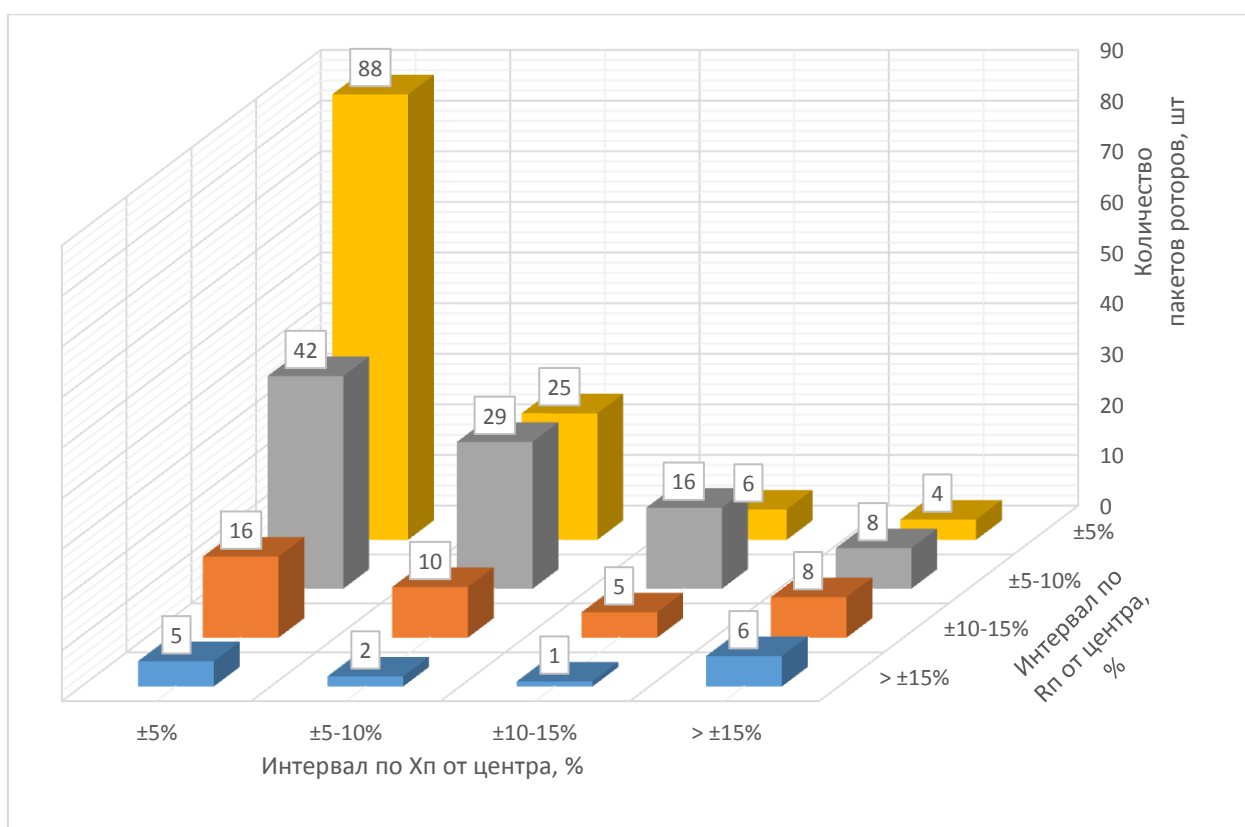


Рис. 3. – Гистограмма «свертки» двумерного интервального вариационного ряда частот

Относительная частота случайной величины, определяется по формуле:

$$w_{ij} = \frac{m_{ij}}{n} \quad (6)$$

Таблица № 5

Двумерный интервальный вариационный ряд относительных частот,
 выраженных в процентах

X_n , о.е. R_n , о.е.	0,55-0,6	0,6-0,65	0,65-0,7	0,7-0,75	0,75-0,8	0,8-0,85	0,85-0,9	0,9-0,95	0,95-1	1-1,05	1,05-1,1	1,1-1,15	1,15-1,2	1,2-1,25	1,25-1,3	1,3-1,35	Номер интервала R_n
0,55-0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
0,6-0,65	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2
0,65-0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3
0,7-0,75	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4
0,75-0,8	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5
0,8-0,85	0,4	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6
0,85-0,9	0,4	0,0	0,0	0,0	0,4	1,1	1,5	1,8	1,5	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7
0,9-0,95	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	1,5	3,7	8,5	3,0	3,0	1,1	0,7	0,4	0,0	0,0	0,0	8
0,95-1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,7	3,3	11,1	4,8	1,8	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	9
1-1,05	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	1,1	8,5	5,9	4,1	1,1	0,7	0,4	0,0	0,0	10
1,05-1,1	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	1,1	7,0	1,5	1,1	0,4	0,4	0,0	0,4	11
1,1-1,15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	3,0	1,1	0,7	0,7	0,4	0,7	0,0	12
1,15-1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	13
1,2-1,25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	14
1,25-1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15
1,3-1,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16
Номер интервала X_n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	

Представим «свертку» двумерного интервального частотного вариационного ряда относительных частот (таблица № 5) в таблице № 6.

Гистограмма относительных частот является аналогом закона распределения случайной величины (X_n, R_n) , играет роль эмпирического закона распределения [17]: $p_{ij} = w_{ij}$.

Таблица № 6

«Свертка» двумерного вариационного ряда относительных частот, в процентах

		Диапазон по Хп				Номер диапазона по Rp
		> ±15%	±10-15%	±5-10%	±5%	
Диапазон по Rp	> ±15%	2,2%	0,4%	0,7%	1,8%	1
	±10-15%	3,0%	1,8%	3,7%	5,9%	2
	±5-10%	3,0%	5,9%	10,7%	15,5%	3
	±5%	1,5%	2,2%	9,2%	32,5%	4
Номер диапазона по Хп		1	2	3	4	

Гистограмма, отражающая данные таблицы № 6, приведена на рис.4.

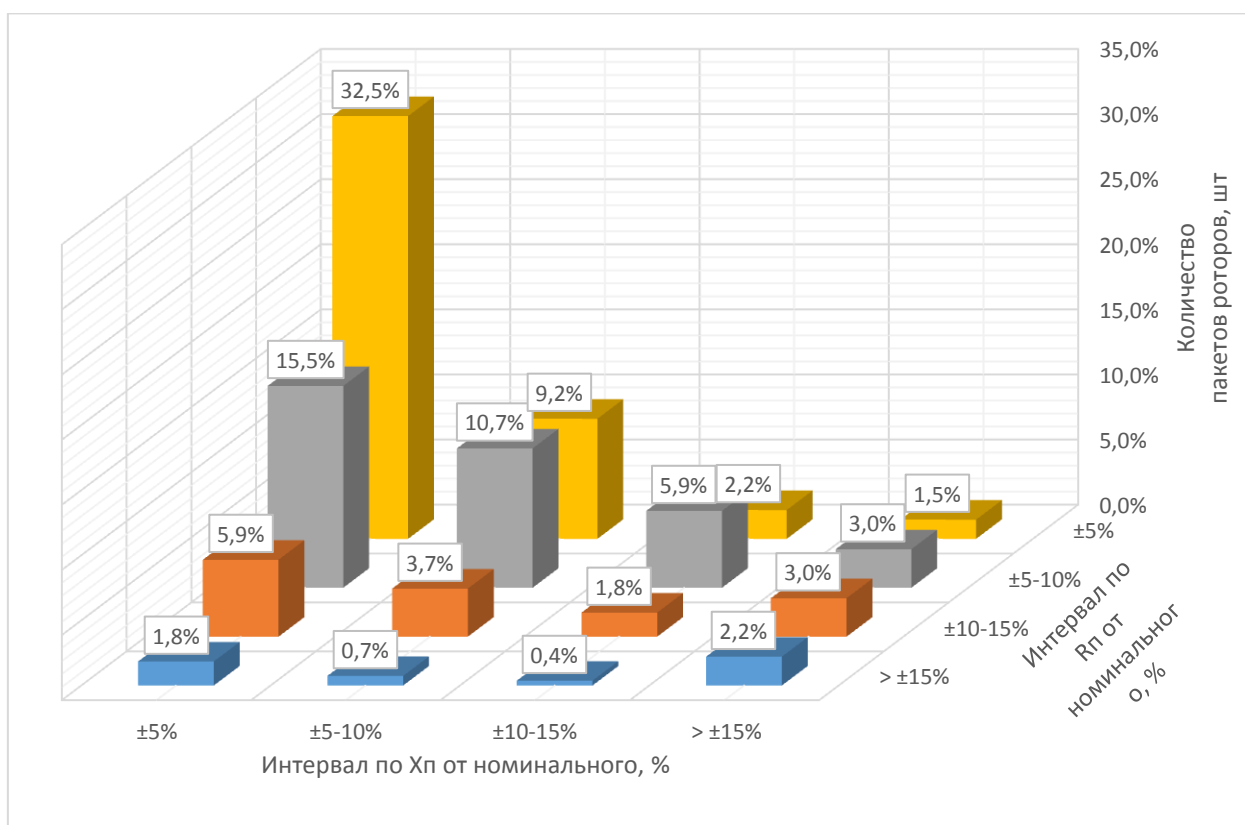


Рис. 4. – Гистограмма «Свертки» двумерного интервального вариационного ряда относительных частот

Тогда, имея закон распределения двумерной случайной величины построим функцию распределения вероятности $F(x, y)$ двумерной случайной величины (X_n, R_n) , которая определяет для каждой пары чисел (X_n, R_n) совместную вероятность того, что X_n примет значение, меньше x , и R_n примет значение, меньшее y [17]:

$$F(x, y) = P(X_n < x, R_n < y) \quad (7)$$

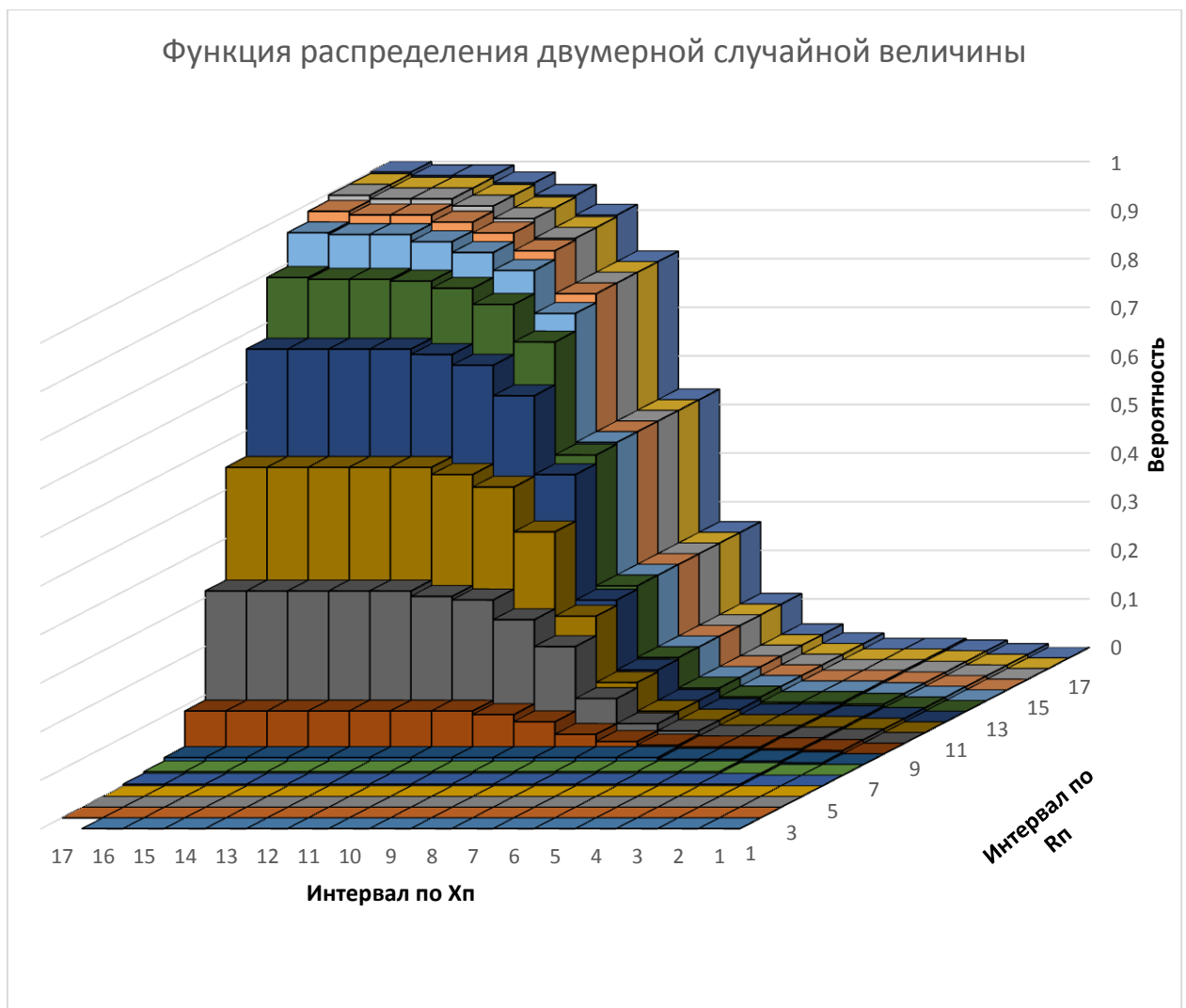


Рис. 5. – Двумерная функция распределения вероятностей случайной величины

Зная $F(x, y)$ представленную на рис.5, можно найти вероятность попадания случайной точки (X_n, R_n) в пределы прямоугольника ABCD (рис. 6).

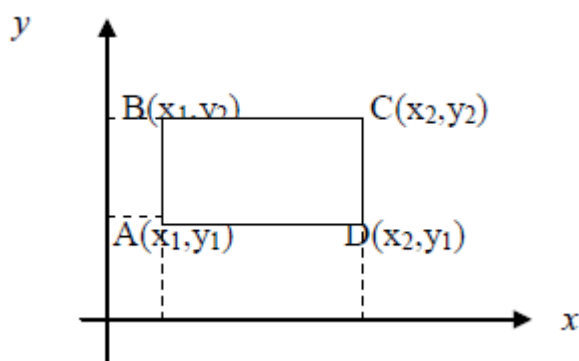


Рис. 6. – Вероятность попадания случайной величины в заданные пределы

$$P[(x_1 \leq X_n < x_2)(y_1 \leq R_n < y_2)] = F(x_2, y_2) - F(x_1, y_2) - F(x_2, y_1) + F(x_1, y_1) \quad (8)$$

Выводы

1. На примере применения существующего регламента комплектации ПР для сборки ПЭД, показана вероятная причина локального перегрева обмотки статора. А именно: наличие в комплекте пакетов с общим средним сопротивлением, близким к 1 о.е. одного пакета с аномально низким сопротивлением.
2. Из анализа двумерного интервального вариационного ряда относительных частот и его свертки следует, что с вероятностью 35,2 % в сборке будет присутствовать ПР, у которого одно или оба (индуктивное и/или активное) сопротивление окажется в диапазоне до $\pm 10\%$ относительно среднего равного 1 о.е. При этом, вероятность того, что в сборке будет присутствовать пакет ротора, у которого оба сопротивления не превышают $\pm 5\%$ относительно среднего, составляет 32,5%. Соответственно, при сборке ПЭД по существующему «стохастическому» регламенту, появляется высокая вероятность укомплектовать ротор таким образом, что будут присутствовать предпосылки для локальных перегревов.
3. Из анализа двумерного интервального вариационного ряда относительных частот и его свертки следует что 12,6% ПР одновременно и по индуктивному, и по активному сопротивлениям выходят за $\pm 15\%$ относительно среднего равного 1 о.е. При существующем «стохастическом» регламенте сборки

ПЭД, и при большом числе пакетов в сборке, появляется практически неизбежная вероятность возникновения локальных перегревов обмотки статора ПЭД, ведущих к снижению МРП.

4. Становится актуальной задача разработки методики сборки ПЭД минимизирующей вероятность локального перегрева обмотки статора, по причине аномального сочетания параметров используемых в сборке пакетов роторов.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FENG-2023-0001 «Предиктивное управление потоками энергии электрогенерирующих комплексов Арктики и Крайнего Севера, при стохастических характерах потребления и генерации электрической энергии: теория, синтез, эксперимент»).

Литература

1. Ковалев А.Ю. Моделирование погружных асинхронных электрических двигателей в составе установок электроцентробежных насосов. Омск. ОмГТУ 2010. 157 с. EDN: OONNRZ.
2. Кузнецов Е.М., Ковалев А.Ю., Аникин В.В. Энергетические показатели погружного асинхронного электродвигателя при вариациях электромагнитных параметров пакета ротора // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. Т. 5, № 3. С. 58-62. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-58-62. EDN: ZTSROL.
3. Архипова О.В., Чертов Р.А., Денисенко А.В., Крохалев М.А., Хусаинов Э.И., Балыклов Е.С. Математическая модель погружного асинхронного двигателя как электротехнического комплекса // Инженерный вестник Дона. 2020. № 12. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6702.

4. Архипова О.В., Хусаинов Э.И., Ковалев В.З. Сравнительный анализ подходов построения математической модели погружного электродвигателя на основе методов планирования эксперимента // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков: Сборник материалов XXIV Международной научно-практической конференции, Москва, 27 декабря 2023 года. Москва: ООО "Издательство АЛЕФ", 2023. С. 340-349. DOI: 10.34755/IROK.2023.98.58.005. EDN: EMXGZE.
 5. Ковалев Ю.З., Ковалев В.З., Ковалев А.Ю., Ковалева Н.А., Кузнецов Е.М., Щербаков А.Г. Способ сборки электрической машины. Патент на изобретение № 2320063 С2. Бюллетень № 8. 2008. Номер заявки: 2005109602/09. URL: elibrary.ru/item.asp?id=37669819.
 6. Jankowski T.A., Prenger F.C., Hill D.D., O'bryan S.R., Sheth K.K., Brookbank E.B., Hunt D.F.A., Orrego Y.A. Development and validation of a thermal model for electric induction motors // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. V. 57, No. 12. pp. 4043-4054. DOI: 10.1109/TIE.2010.2043044. EDN: OCNCFX.
 7. Зюзев А.М., Метельков В.П. О проблеме перегрева обмотки ротора асинхронных двигателей в пусковых режимах высокоинерционных электроприводов нефтегазовой и горной промышленности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 7. С. 96-103. EDN: UWLDUZ.
 8. Зюзев А.М., Крюков О.В., Метельков В.П., Михальченко С.Г. Оценка теплового состояния электродвигателей переменного тока компрессорных станций магистральных газопроводов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 1. С. 88-96. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3002. EDN: EFKZBA.
 9. Хакимьянов М.И., Сираев Р.М., Крылов А.О. Исследование влияния на энергопотребление скважинных насосов технологических и
-

- эксплуатационных параметров // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. Т. 11, № 1. С. 15-20. EDN: TXQYLV.
10. Копырин В.А., Портнягин А.Л., Хамитов Р.Н. Пути повышения эффективности установок электроцентробежных насосов добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 11. С. 155-162. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2361. EDN: AXOUUK.
11. Романов В.С., Гольдштейн В.Г., Васильева Н.С. Статистический анализ технологических нарушений в эксплуатации погружных электродвигателей // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9, № 3-16. С. 114-121. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.16.3.114-121. EDN: VMSRLK.
12. Abulfaz H.I., Malik A.S. Evaluation of the inter-repair operation period of electric submersible pump units // Eureka: Physics and Engineering. 2020. No. 1. pp. 79-86. DOI: 10.21303/2461-4262.2020.001105. EDN: UBYSYK.
13. Шабонас А. Р. Оптимизация работы электроцентробежного насоса для повышения наработки на отказ // Нефтепромышленное дело. 2021. № 8(632). С. 30-36. DOI: 10.33285/0207-2351-2021-8(632)-30-36. EDN: QXQQPC.
14. Сушков В. В., Велиев М.К. Методика определения оптимального состава работающих насосных агрегатов кустовых насосных станций / В. В. Сушков, М. К. Велиев // Нефтяное хозяйство. 2013. № 12. С. 125-127. EDN: RQVBKT.
15. Ковалев В.З., Крохалев М.А., Архипова О.В. Идентификация электромагнитных параметров схемы замещения пакетов ротора погружного электродвигателя. Определение рациональных схем // Инженерный вестник Дона. 2023. № 4. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8334.
16. Боловин Е.В., Глазырин А.С. Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти // Известия Томского
-

политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 1. С. 123-131. EDN: YGSRYP.

17. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 10-е издание, стереотипное. М.: Высшая школа, 2006. 575 с.

18. Ллойд Э., Ледерман У. Справочник по прикладной статистике, [В 2 т.] Пер. с англ. под ред. Ю. Н. Тюрина. М.: Финансы и статистика, 1989. 510 с.

References

1. Kovalev A.YU. Modelirovaniye pogruzhnykh asinkhronnykh elektricheskikh dvigateley v sostave ustanovok elektrosentrobezhnykh nasosov [Modeling of submersible asynchronous electric motors as part of electric submersible pump units]. Omsk. OmGTU 2010. 157 p. EDN: OONNRZ.

2. Kuznetsov E.M., Kovalev A.YU., Anikin V.V. Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. 2017. V. 5, № 3. pp. 58-62. DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-58-62. EDN: ZTSROL.

3. Arkhipova O.V., Chertov R.A., Denisenko A.V., Krokhaev M.A., Khusainov E.I., Balyklov E.S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. № 12. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6702.

4. Arkhipova O.V., Khusainov E.I., Kovalev V.Z. Razvitiye nauki i praktiki v global'no menyayushchemsya mire v usloviyakh riskov: Sbornik materialov XXIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 27 dekabrya 2023 goda. Moskva: OOO "Izdatel'stvo ALEF", 2023. pp. 340-349. DOI: 10.34755/IROK.2023.98.58.005. EDN: EMXGZE.

5. Kovalev YU.Z., Kovalev V.Z., Kovalev A.YU., Kovaleva N.A., Kuznetsov E.M., Shcherbakov A.G. Sposob sborki elektricheskoy mashiny. [The method of assembling an electric machine]. Patent na izobreteniyе № 2320063 C2. Byulleten' № 8. 2008. Nomer zayavki: 2005109602/09. URL: elibrary.ru/item.asp?id=37669819.

6. Jankowski T.A., Prenger F.C., Hill D.D., O'bryan S.R., Sheth K.K., Brookbank E.B., Hunt D.F.A., Orrego Y.A. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. V. 57, No. 12. pp. 4043-4054. DOI: 10.1109/TIE.2010.2043044. EDN: OCNCFX.
 7. Zyuzev A.M., Metel'kov V.P. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov. 2018. V. 329, № 7. pp. 96-103. EDN: UWLDUZ.
 8. Zyuzev A.M., Kryukov O.V., Metel'kov V.P., Mikhal'chenko S.G. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov. 2021. V. 332, № 1. pp. 88-96. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3002. EDN: EFKZBA.
 9. Khakim'yanov M.I., Sirayev R.M., Krylov A.O. Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy. 2015. V. 11, № 1. pp. 15-20. EDN: TXQYLV.
 10. Kopyrin V.A., Portnyagin A.L., Khamitov R.N. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov. 2019. V. 330, № 11. pp. 155-162. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2361. EDN: AXOUUK.
 11. Romanov V.S., Gol'dshteyn V.G., Vasil'yeva N.S. Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. 2018. V. 9, № 3-16. pp. 114-121. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.16.3.114-121. EDN: VMSRLK.
 12. Abulfaz H.I., Malik A.S. Eureka: Physics and Engineering. 2020. No. 1. pp. 79-86. DOI: 10.21303/2461-4262.2020.001105. EDN: UBYSYK.
 13. Shabonas A. R. Neftepromyslovoye delo. 2021. № 8(632). pp. 30-36. DOI: 10.33285/0207-2351-2021-8(632)-30-36. EDN: QXQQPC.
 14. Sushkov V. V., Veliyev M.K. Neftyanoye khozyaystvo. 2013. № 12. pp. 125-127. EDN: RQBBKT.
 15. Kovalev V. Z., Krokhaliev M.A., Arkhipova O.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. № 4. ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8334.
-



16. Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov. 2017. V. 328, № 1. pp. 123-131. EDN: YGSRYP.
17. Venttsel' YE.S. Teoriya veroyatnostey [Probability theory]. 10-e izdaniye, stereotipnoye. M.: Vysshaya shkola, 2006. 575 p.
18. Lloyd E., Lederman U. Spravochnik po prikladnoy statistike [Handbook of Applied Statistics]. V 2 t. Per. s angl. pod red. YU. N. Tyurina. M.: Finansy i statistika, 1989. 510 p.

Дата поступления: 8.07.2024

Дата публикации: 25.08.2024