

УДК 621.313.333 : 621.671 – 621.316

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ
ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК
МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

САИДОВ Р.А.

Азербайджанский Технологический Университет

В результате анализа существующих методов установлено, что наиболее приемлемым методом исследования надежности систем с защитой является метод статистического моделирования. Для определения степени влияния надежности отдельных компонентов на надежность системы в целом был использован метод планирования эксперимента. Результатами планирования эксперимента и анализом состояния надежности устройства защиты погружных электродвигателей установлено, что именно защита является наиболее слабым узлом в системе с точки зрения надежности.

Для решения различных задач надежности технических систем все более широкое применение находит метод статистического моделирования (метод Монте-Карло). Это связано с тем, что, выбирая в качестве основного аппарата метод статистического моделирования, удалось решить ряд важных задач надежности, а именно:

- приблизить математические модели к реальным физическим процессам, благодаря чему повышается достоверность результатов;
- существенно упростить вычислительные алгоритмы, что дает возможность широкому кругу инженеров быстро овладеть практическими приемами для решения конкретных задач;
- провести математический эксперимент по анализу процессов функционирования сложных систем, основанный на сочетании натуральных испытаний отдельных элементов с моделированием процесса в целом.

Сущность метода Монте-Карло состоит в том, что исследуемый сложный стохастический процесс функционирования системы с защитой (погружные электронасосные установки) представляется математической вероятностной моделью. Затем данная модель многократно испытывается на ЭВМ. Путем соответствующей обработки статистического материала, полученного в процессе этого испытания, определяются необходимые вероятностные характеристики.

Основным достоинством данного метода является то, что он позволяет полнее учесть все особенности функционирования системы при любых законах распределения случайных величин, имеет наглядную вероятностную трактовку, простую вычислительную схему и малую чувствительность к случайным сбоям машины в процессе решения. Кроме того, при любых законах распределения случайных величин этот метод позволяет получить количественную оценку надежности систем с защитой. Особенно рационально его применение при неэкспоненциальных распределениях.

Для составления моделирующего алгоритма необходимо формализовать процесс функционирования погружной электронасосной установки. Как известно, процесс функционирования погружной электронасосной установки прекращается в случае отказа-аварии электронасосного агрегата. А это возможно в следующих случаях:

- когда происходит собственная авария электронасосного агрегата;
- когда на запрос при аварийной ситуации, устройство защиты, вследствие наличия отказа типа "несрабатывание", не сможет произвести отключение агрегата.

До возникновения отказа-аварии агрегата, в нем, обычно, возникают отказы-остановки. Причины, вызвавшие их, каждый раз быстро устраняются, и агрегат вновь включается в работу. Отказы-остановки электронасосного агрегата происходят за счет:

- отказов-остановок самого агрегата;
- ложных срабатываний устройства защиты;
- перевода аварийных и нежелательных ситуаций в отказы-остановки.

Для достижения указанной цели была разработана блок-схема моделирующего алгоритма рассмотренного процесса функционирования при произвольных законах распределения исходных параметров, его краткое описание, а также программа решения задачи оценки надежности (оценка вероятностей безаварийной, безостановочной и безотказной работы) погружных электронасосных установок.

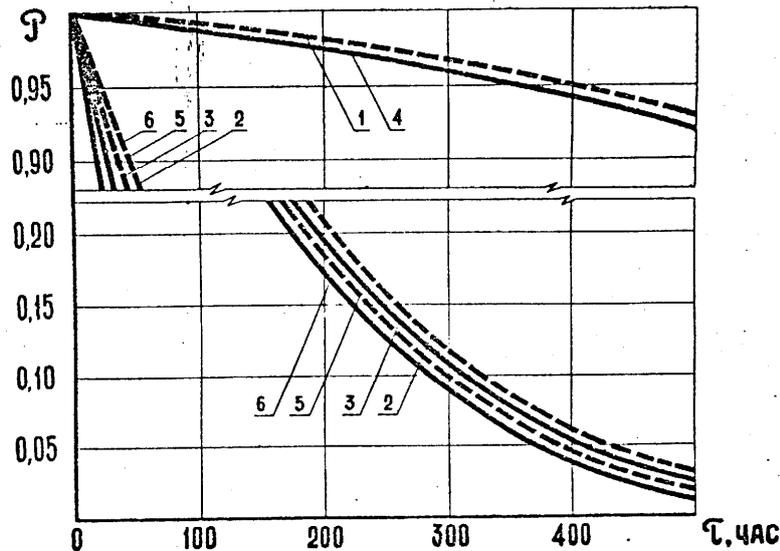


Рис. 1. Кривые изменения безаварийной (1.4), безостановочной (2.5) и безотказной (3.6) работы установок.

При одних и тех же исходных данных (экспоненциально распределенных) результаты практического использования предложенного алгоритма (рис. 1, кривые 1...3), реализованного на ЭВМ отличаются незначительно от результатов, полученных аналитическим методом (рис. 1, кривые 4...6). Результаты сравнения по критерию Пирсона, меры расхождения между функциями распределения времени безаварийной, безостановочной и безотказной работы, полученных методом статистического моделирования и аналитическим методом, показывают, что их вероятность схождения является довольно высокой и равна $P = 0,86$.

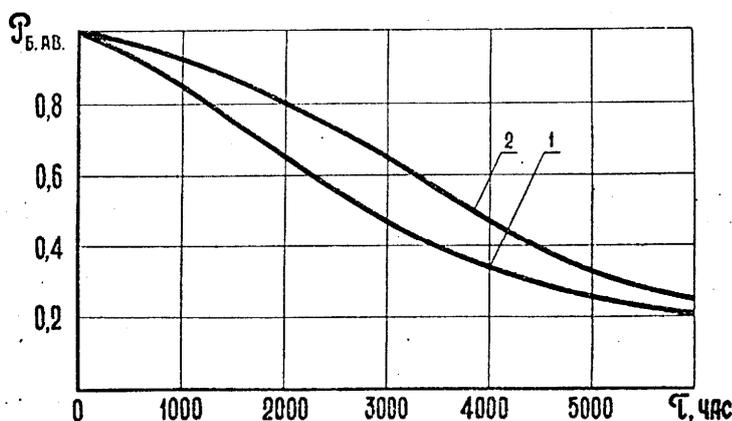


Рис. 2. Кривые изменения вероятности безаварийной работы установок.

Как было отмечено, основным показателем надежности погружных электронасосных установок, используемых в водоснабжении и орошении, является вероятность их безаварийной работы. Поэтому нами разработан сравнительно простой алгоритм, позволяющий определить только функцию распределения времени безаварийной работы системы (электронасосной установки).

На рис. 2 показаны функции распределения времени безаварийной работы погружных электронасосных установок, построенные на основе результатов, полученных аналитическим методом (кривая 1) при экспоненциально распределенных исходных данных и методом статистического моделирования (кривая 2) при исходных данных, наиболее соответствующих реальным условиям эксплуатации погружных электронасосных установок.

Необходимые исходные данные, используемые при решении аналитическим методом, а также для реализации предложенного алгоритма на ЭВМ, получены в результате математической обработки статистических данных об отказах и восстановлениях отдельных элементов погружных электронасосных установок и их электроснабжения.

С этой целью, в период с 1994 по 1999 годы, нами были собраны статистические данные в ряде хозяйствах республики, где организация эксплуатации погружных электронасосных установок поставлена лучше, чем на других участках. Эти данные полностью удовлетворяли всем требованиям ГОСТ 19490-74 "Система сбора и обработки информации".

Необходимо отметить, что определение степени влияния надежности отдельных компонентов на надежность системы в целом по аналитической формуле [1] является весьма сложными из-за ее громоздкости и применение его для реальных условий эксплуатации нерационально, так как при этих условиях законы распределений не всех величин, входящих в формулу, являются экспоненциальными.

Как известно [1], в любой момент времени τ вероятность безаварийной работы погружных электронасосных установок $P_{\bar{o}.ав.}$ зависит от нескольких величин $q_{c.ав.}$, $q_{ав.с.}^{(1)}$, $q_{ав.с.}^{(2)}$ и $q_{2несп.}$.

Для исследования влияния каждого из этих величин на $P_{\bar{o}.ав.}$ требуется построить семейство кривых $P_{\bar{o}.ав.} = F(q_i)$ при $q_i = const$ ($i = 1, 2, 3, 4; j=1, 2, 3, 4$ и $j \neq i$).

Конечно, можно построить много семейств кривых (модель исследуемого объекта) и, казалось бы, достичь цели. Однако, информация о функции четырех переменных $P_{\bar{o}.ав.}$, полученная в таком виде, практически бесполезна, так как весьма трудно извлекать нужные сведения из многочисленных, сложно связанных между собою кривых.

Здесь можно рассматривать не саму функцию, а ее разложение в степенной ряд вида

$$P_{\bar{o}.ав.} = B_0 + B_1 q_1 + B_2 q_2 + B_3 q_3 + B_{12} q_1 q_2 + B_{13} q_1 q_3 + B_{23} q_2 q_3 + \dots \quad (1)$$

Где $q_1 = q_{ав.с.}^{(1)}$; $q_2 = q_{ав.с.}^{(2)}$; $q_3 = q_{2несп.}$; а B_0, B_1 и т.д. коэффициенты, подлежащие определению.

Подобная аппроксимация имеет смысл, так как функция $P_{\bar{o}.ав.} = F(q_1, q_2, q_3)$ является непрерывной и достаточно "гладкой", что допускает представление ее в вышеуказанном виде (1).

Здесь величина $q_{c.ав.}$ исключена из числа факторов, так как она является постоянной составляющей вероятности аварийной работы погружных электронасосных установок, поэтому и не влияет на изменчивость $Q_{ав.}$ а также на $P_{\bar{o}.ав.}$ [2]. Постоянство $q_{c.ав.}$ связано с тем, что она подчиняется экспоненциальному закону распределения, где интенсивность отказов $\lambda_{c.ав.}$ в течение достаточно большого периода эксплуатации агрегата практически постоянна и имеет сравнительно малое значение. Также следует отметить, что эксплуатационник не может управлять этим фактором, имеющим чисто случайный характер. Таким образом, исключая $q_{c.ав.}$ из числа факторов, мы имеем возможность проводить активное планирование эксперимента.

Итак, для определения степени влияния надежности электронасосного агрегата ($q_{ав.с.}^{(1)}$), устройства защиты ($q_{2несп}$) и электрической сети ($q_{ав.с.}^{(2)}$) на надежность электронасосной установки в целом ($P_{б.ав.}$), сначала отыскиваем математическую модель (уравнение регрессии) (1), а затем делаем заключение о существенности влияния каждого из рассматриваемых факторов или их взаимодействия на $P_{б.ав.}$.

Поэтому, для определения степени влияния надежности отдельных компонентов на надежность системы в целом нами был использован метод планирования эксперимента.

Для решения этой задачи составлен план эксперимента, установлены уровни и интервалы варьирования факторов в зависимости от законов распределений и доверительных интервалов, входящих в них параметров.

Уровни факторов вычислялись при $\tau = 4000$ часов, что соответствует средней наработке на отказ погружных электродвигателей.

Уровни и интервалы варьирования приведены в таблице 1.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Размерность	Уровни факторов			Интервалы варьирования
		-1	0	+1	
$q_{ав.с.}^{(1)} - x_1$	-	0,0065	0,0128	0,0191	0,0063
$q_{ав.с.}^{(2)} - x_2$	-	0,9962	0,9998	0,9998	0,0018
$q_{2несп.} - x_3$	-	0,4355	0,4680	0,5005	0,0325

В данном опыте был реализован полный факторный эксперимент типа 2^3 , матрица планирования и результаты опытов которого приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Матрица планирования и результаты опытов

№ опыта	x_1	x_2	x_3	$\bar{y} - \bar{P}_{б.ав.}$
1	- 1	- 1	- 1	0,45331
2	+ 1	- 1	- 1	0,44277
3	- 1	+ 1	- 1	0,43818
4	+ 1	+ 1	- 1	0,43263
5	- 1	- 1	+ 1	0,40490
6	+ 1	- 1	+ 1	0,39075
7	- 1	+ 1	+ 1	0,38566
8	+ 1	+ 1	+ 1	0,37876

Перед началом эксперимента факторы кодировались. При составлении матрицы планирования кодированные значения факторов определялись по формуле.

$$x_j = \frac{\tilde{x}_j - \tilde{x}_{j0}}{\Delta x_j} \quad (2)$$

- где x_j - кодированное значение фактора;
 \tilde{x}_j - натуральное значение фактора;
 \tilde{x}_{j0} - натуральное значение основного уровня;
 Δx_j - интервал варьирования;
 j - номер фактора.

Уравнение регрессии (1) при использовании кодированных факторов записывается в виде

$$\hat{y} = \epsilon_0 + \epsilon_1 x_1 + \epsilon_2 x_2 + \epsilon_3 x_3 + \epsilon_{12} x_1 x_2 + \epsilon_{13} x_1 x_3 + \epsilon_{23} x_2 x_3, \quad (3)$$

где v_i - коэффициенты регрессии, определяемые по известной методике.

В рассматриваемой нами матрице планирования эксперимента каждое значение выходного параметра определялось в результате реализации алгоритма при соответствующих исходных данных (значения выходного параметра \bar{y} определялись по трем параллельным реализациям данного алгоритма). Иными словами, опытные значения ($\bar{y} - \bar{P}_{\sigma_{ав.}}$) получены методом Монте-Карло с помощью алгоритма безаварийной работы погружных электронасосных установок. При этом рандомизация опытов осуществлялась с помощью таблиц случайных чисел [3].

В результате статистической обработки результатов эксперимента на ЭВМ получены уравнения регрессии в кодированных единицах

$$\hat{y} = 0,41587 - 0,00464x_1 - 0,00706x_2 - 0,02585x_3 + 0,00153x_1x_2 - 0,00062x_1x_3 - 0,00075x_2x_3 \quad (4)$$

На следующем этапе оценивалась однородность дисперсий по G - критерию Кохрена. При уровне значимости $p = 0,05$, числа степеней свободы $f = 8 - 1 = 7$ и кратности каждого опыта $k = 3$ табличное значение критерия $G_T = 0,6530$.

Расчетное значение критерия получено равным $G_p = 0,2910$. $G_p < G_T$, следовательно, гипотеза об однородности дисперсий подтверждается.

Важным этапом решения поставленной задачи, т.е. определения степени влияния надежности отдельных компонентов на надежность системы в целом, является анализ коэффициентов полученной модели.

Анализ коэффициентов проводился с помощью t - критерия Стьюдента по уравнению [3].

$$t_p = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}} \quad (5)$$

где t_p - расчетное значение t - критерия Стьюдента;
 $S\{b_i\}$ - средняя квадратичная ошибка в определении
 коэффициента ($S\{b_i\} = 0,00106$).

Коэффициент значим, если $t_p > t_T$. t_T - табличное значение t - критерия Стьюдента (при уровне значимости $p = 0,05$ и числе степеней свободы $f = 8 \cdot 2 = 16$, $t_T = 2,12$).

Такую проверку проводим последовательно, начиная с коэффициента b_0 :

$$\begin{aligned} t_{pb0} &= 392,33 > t_T; & t_{pb1} &= 4,38 > t_T; \\ t_{pb2} &= 6,66 > t_T; & t_{pb3} &= 24,39 > t_T; \\ t_{pb12} &= 1,44 < t_T; & t_{pb13} &= 0,58 < t_T; \\ t_{pb23} &= 0,71 < t_T. \end{aligned}$$

Как следует из проведенного анализа, все коэффициенты при квадратичных членах незначимы, а коэффициенты при линейных членах значимы.

Из анализа также следует, что фактор x_3 , (величина $q_{2несп.}$, позволяющая характеризовать надежность устройства защиты) оказывает более существенное влияние ($t_{pb3} = 24,39$) на надежность системы в целом по сравнению с факторами x_1 (величина $q_{ав.с.}^{(1)}$, позволяющая характеризовать надежность электронасосного агрегата) и x_2 (величина $q_{ав.с.}^{(2)}$, позволяющая характеризовать надежность электрической сети, питающей электронасосную установку), хотя оба фактора являются значимыми.

Исключив из выражения (1) незначимые коэффициенты, окончательно имеем

$$\hat{y} = 0,41587 - 0,00464x_1 - 0,00706x_2 - 0,02585x_3 \quad (6)$$

Затем оценивалась адекватность полученного линейного приближения. При этом использовался F - критерий Фишера, исчисляемый по формуле [3].

$$F_p = \frac{S_{ад.}^2}{S_{\sigma}^2} \quad (7)$$

где F_p - расчетное значение F - критерия Фишера;

$S_{ад.}^2$ - дисперсия адекватности;

$S_{ε.}^2$ - дисперсия воспроизводимости.

Дисперсия, связанная с адекватностью уравнения, и дисперсия, характеризующая ошибку эксперимента, исчислялись по методике, указанной в [3]. В результате вычисления получено, что $S_{ад.}^2 = 20,16 \cdot 10^{-6}$; $S_{ε.}^2 = 8,99 \cdot 10^{-6}$ и расчетное значение критерия Фишера $F_p = 2,243$. Табличное значение критерия Фишера при уровне значимости $p = 0,05$ и степеней свободы $f_{ад.} = 4$ и $f_{ε.} = 16$ будет $F_T = 3,05$. Следовательно, $F_p < F_T$ и при уровне значимости $p = 0,05$ модель адекватна.

Таким образом, методом планирования эксперимента выявлено, что на надежность погружных электронасосных установок наибольшее влияние оказывает надежность устройства защиты. Поэтому надежность устройства защиты должна быть высокой.

Установлено, что [4] применяемые в настоящее время системы защиты погружных электродвигателей имеют ряд существенных недостатков:

- чувствительность отдельных элементов схемы к колебаниям параметров окружающей среды (влажности, температуры, солнечной радиации);
- потребность частых настроек;
- ремонтонепригодность блока управления и защиты в условиях эксплуатации;
- недостаток запасных блоков управления и защиты;
- потребность в высококвалифицированном обслуживании;
- сравнительно большая стоимость.

Кроме того, следует отметить, что, несмотря на относительную сложность схемы защиты погружных электродвигателей, применяемых в указанных системах управления, они не обладают достаточной фазочувствительностью. При обрыве фазы напряжение на выходе выпрямителя мало увеличивается. Хотя в исправных фазах ток увеличивается, но отсутствие напряжения в сигнальной обмотке соответствующего трансформатора тока снижает значение общего выходного сигнала выпрямителя. Поэтому особенно станции типа ШЭТ (ШЭП) редко отключают погружные электродвигатели при обрыве фазы.

Из-за отсутствия схемы, выполняющей фазочувствительные принципы выявления аварийных режимов, эти системы абсолютно неэффективны. Указанные недостатки значительно уменьшают надежность применяемых систем защиты погружных электродвигателей.

Таким образом, из результатов планирования эксперимента видно, что на надежность погружных электронасосных установок наибольшее влияние оказывает надежность устройства защиты, в то же время анализ состояния надежности применяемых систем защиты этих установок показывает, что они имеют низкую надежность. Следовательно, устройство защиты является наиболее слабым узлом в системе с точки зрения надежности.

Поэтому следует разработать более надежную защиту.

Выводы

1. Анализом существующих методов установлено, что наиболее приемлемым методом исследования надежности систем с защитой является метод статистического моделирования, позволяющий свести многообразие задач надежности к сравнительно небольшому числу универсальных вычислительных схем, отличающихся простотой и легкостью реализации на ЭВМ.

2. Разработанные алгоритмы позволяют определить надежность системы методом статистического моделирования, а также дают возможность провести планирование эксперимента по выявлению основных факторов, влияющих на ее надежность.

3. Резултатами планирования эксперимента и анализом состояния надежности устройства защиты погружных электродвигателей установлено, что именно защита является наиболее слабым узлом в системе с точки зрения надежности. Это положение требует разработки наиболее надежной защиты.

1. Саидов Р.А. Исследование вероятности безаварийной работы погружных электронасосных установок. Баку, Проблемы энергетики, №4, 2001. с.32...36.
2. Саидов Р.А. Основные определения и задачи исследования надежности погружных электронасосных установок. Материалы первой международной конференции по техническим и физическим проблемам энергетики (ТРЕ – 2002). Баку, 23 –25 апреля, 2002, с. 44...49.
3. Маркова Е.В., Грановский О.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976, - 280 с.
4. Саидов Р.А., Мамедов О.Г. Стенд для настройки блока логики системы автоматического управления погружными насосами: Информационный листок ЦНТИ № 249-82.- Челябинск, 1982. – 3 с.

DƏRİNLİK ELEKTRONAS QURĞULARININ İSTİSMAR ETİBARLILIĞININ STATİSTİK MODELLEŞDİRMƏ METODU İLƏ TƏDQIQI

SƏİDOV R.A.

Mövcud metodların analizi nəticəsində müəyyən olunmuşdur ki, mühafizəli sistemin etibarlılığını tədqiq etmək üçün statistik modelləşdirmə metodu ən əlverişlidir. Ayrı-ayrı komponentlərin etibarlılığının sistemin bütövlükdə etibarlılığına təsir dərəcəsini təyin etmək üçün təcrübənin planlaşdırılması metodundan istifadə edilmişdir. Dərinlik elektrik mühərriklərinin mühavizə qurğularının etibarlılığının vəziyyətinin analizi və planlaşdırılmış təcrübənin nəticələri əsasında müəyyən olunmuşdur ki, bu sistemlərdə məhz mühafizə, etibarlılıq nöqtəyi nəzərdən zəif bənddir.

RESEARCH OF OPERATIONAL RELIABILITY OF SUBMERSIBLE ELECTRIC PUMP INSTALLATIONS BY THE METHOD OF STATISTICAL MODELING

SAIDOV R.A.

As a result of the analysis of existing methods it is established, that the most comprehensible method of research of the systems reliability with protection is a method of statistical modeling. As a whole the method of the experiment planning has been used for definition of a degree influence of reliability from separate components on reliability of system. By results of the experiment planning and the analysis of a condition of device reliability of the protection submersible motors it is established that exactly protection is the weakest unit in system from the point of view of reliability.