

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

681.2.08:519.6

**АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДРЕЙФА ТЕМПЕРАТУР
МАСЛОСИСТЕМЫ ГЦН БЛОКА АЭС С РЕАКТОРОМ ВВЭР-1000**

© 2016 Ю.С. Сысоев, В.Г. Бекетов, Н.А. Симакова

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

При моделировании тяжелейших последствий глобального масштаба при авариях на атомных электростанциях особое внимание исследователей обращено к проблеме прогнозирования тех параметров оборудования АЭС, которые могут позволить заранее информировать приближение нештатной ситуации. Важное значение приобретает контроль параметров, влияющих на безопасность эксплуатации реакторной установки.

Одним из таких параметров является температура масла на входе в главный циркуляционный насос (ГЦН).

В настоящей работе представлена новая методика прогнозирования изменений непрерывного параметра, позволяющая предсказывать нештатные ситуации на АЭС, которые могут возникнуть из-за перегрева масла в маслосистеме ГЦН, и предупредить персонал станции о возможном времени наступлении нештатной ситуации.

Ключевые слова: восстановление параметра, интерполяция, экстраполяция, метод наименьших квадратов, прогнозирование.

Поступила в редакцию 01.09.2016 г.

При анализе поведения различных объектов важную роль играет прогнозирование изменений их технологических параметров. Прогнозирование дрейфа параметров позволяет решать целый ряд разнообразных задач: находить межповерочные интервалы средств измерений [1-4]; предсказывать нештатные ситуации на атомных электростанциях (АЭС) [5]; использовать его для сейсмического прогноза [6] и т.д. С учетом возможности тяжелейших последствий глобального масштаба при авариях на атомных электростанциях естественным является внимание исследователей к проблеме прогнозирования тех параметров оборудования АЭС, которые могут позволить заранее информировать приближение нештатной ситуации. Особенно важное значение приобретает контроль параметров, влияющих на безопасность эксплуатации реакторной установки. Нормативной документацией определено, что при выявлении отклонений параметров от допустимых пределов или появлении предупредительных, аварийных сигналов персонал должен своевременно принимать меры по восстановлению номинальных параметров. Одним из таких параметров является температура масла на входе в главный циркуляционный насос (ГЦН).

В научной литературе наряду со стохастическими [1–5] развиваются и детерминированные [6] методы прогнозирования, основанные на экстраполяции результатов измерений. Традиционно в детерминированных методах при экстраполяции значений контролируемого параметра используется метод наименьших квадратов (МНК), основанный на выборе класса экстраполирующих функций и мониторинге значений параметров на некотором временном промежутке. Например, в

работе [6] в качестве класса экстраполирующих функций предлагается использовать многочлены произвольной степени. В том случае, когда известен класс функций, описывающий процесс изменения технологических параметров, а погрешности измерений подчиняются нормальному закону распределения, выбор весовых коэффициентов в методе наименьших квадратов при равномерном и неравномерном распределении точек контроля целесообразно осуществлять по правилам, предложенным в работе [7], независимо от решаемой задачи (интерполяции или экстраполяции контролируемых параметров). Однако на практике чаще всего указанный класс функций, как правило, неизвестен, а поэтому наша задача подменяется задачей аппроксимации значений параметров с помощью функций из некоторого априори выбранного семейства функций. При этом считается (хотя это не всегда так), что указанные функции могут с достаточной точностью аппроксимировать контролируемый процесс изменений параметров. И в этом случае при решении задачи интерполяции параметров (как функций) часто имеет смысл руководствоваться рекомендациями из [7]. Если же МНК применяется для экстраполяции параметров с целью прогнозирования их дрейфа, рекомендации, предложенные в [7], не дадут желаемый эффект. Совершенно очевидно, что при прогнозировании дрейфа параметра на большие временные промежутки, например в [6], уравнивание влияния всех значений параметра, полученных измерениями, на результат прогноза посредством выбора равных весов вполне логичен. Однако прогнозирование на небольшие промежутки времени имеет свои особенности. Ясно, что последние точки временного ряда в этом случае должны оказывать большее влияние на конечный результат, чем первые, а экстраполирующая кривая (график экстраполирующей функции) должна проходить через последнюю его точку. Действительно, было бы странным ожидать адекватного результата прогнозирования, если экстраполирующая кривая не будет проходить через последнюю точку с координатами $(t_n, 40)$, определяющуюся последними значениями временного ряда, характеризующего температуру масла в маслосистеме ГЦН атомной станции (здесь t_n – момент последнего измерения, при котором температура масла достигла 40°C), при том, что при температуре, превышающей 41°C , должна происходить блокировка реактора.

Отметим, что добиться устранения указанных проблем, находясь в рамках наперед выбранного экстраполирующего класса функций, чаще всего, не представляется возможным. Поэтому в предложенной методике этот класс расширяется добавлением к нему еще одной функции, которая при значениях t , удаленных от t_n ($t > t_n$), мало отличается от экстраполирующей функции из указанного класса, найденной с помощью метода наименьших квадратов, а при t , равных или близких к t_n удовлетворяет всем перечисленным выше требованиям и, следовательно, она может быть использована для прогнозирования, как на большие, так и на малые временные промежутки. Для получения указанной функции предлагается в методе наименьших квадратов использовать специальным образом построенные переменные весовые коэффициенты.

Обозначим через $x = x_0(t)$ неизвестную функцию, определяющую значение контролируемого параметра, зависящего от переменной t (чаще всего в роли t выступает время), а через x_1, x_2, \dots, x_n – упорядоченную по номерам выборку значений, полученных измерениями этого параметра в точках $t_1 < t_2 < \dots < t_n$, соответственно (то есть $x_j = x_0(t_j)$, $j = 1, 2, \dots, n$). Экстраполяция (а значит, и прогноз) на большие временные промежутки, как правило, осуществляется [6] выбором некоторого экстраполирующего семейства $\chi = \{x(t)\}$ функций и последующего применения МНК. Например, в работе

[6] для прогноза сейсмической активности в качестве класса экстраполирующих функций использовались многочлены третьей степени. Прогнозирование на небольшие промежутки времени имеет свои особенности, о которых говорилось выше.

Прежде, чем обсуждать выбор весовых коэффициентов, отметим, что в наших обозначениях традиционная задача отыскания экстраполирующей функции методом наименьших квадратов сводится к решению относительно неизвестной функции $x = x^*(t)$, аппроксимирующей функцию $x = x_0(t)$, следующего уравнения (оптимизационной задачи):

$$\sum_{k=1}^n p_k (x_k - x^*(t_k))^2 = \min_{x \in \chi} \sum_{k=1}^n p_k (x_k - x(t_k))^2, \quad (1)$$

где $p_k, k=1,2,\dots,n$ – весовые коэффициенты (или веса), удовлетворяющие условиям:

$$p_k \geq 0 \text{ и } \sum_{k=1}^n p_k = 1.$$

При прогнозировании на малые промежутки времени обычно используется линейная экстраполяция. Например, если известна производная экстраполируемой функции в точке t_n , то для указанных целей чаще всего используется касательная к кривой графика функции $x = x_0(t)$. Однако в нашем случае, когда известно только конечное число значений экстраполируемой функции, нет возможности построить уравнение касательной. Поэтому и возникает необходимость использовать метод наименьших квадратов. Поскольку в дальнейшем рассматривается простейший вариант прогнозирования, то в качестве множества χ будем использовать многочлены первой степени, то есть будем считать, что $\chi = \{at + b\}$. В этом случае задача (1) будет иметь вид:

$$\sum_{k=1}^n p_k (x_k - (a_0 t_k + b_0))^2 = \min_{a,b} \sum_{k=1}^n p_k (x_k - (at_k + b))^2, \quad (2)$$

Совершенно очевидно, что величина значения веса p_j будет определять значимость j -го слагаемого в целевой функции оптимизационной задачи (2). Чем ближе это значение к единице, тем меньше будут остальные веса $p_i, i \neq j$, поскольку $\sum_{k=1}^n p_k = 1$, и тем большее влияние будет оказывать j -е слагаемое на конечный результат. Если $p_j = 1$, то остальные весовые коэффициенты будут равны нулю, а следовательно, a и b будут выбираться с учетом равенства $at_j + b = x_j$. Другими словами, если мы хотим, чтобы экстраполирующая кривая $x = x^*(t)$ проходила через точку (t_n, x_n) при переменных весах $p_k(t)$ в уравнении:

$$\sum_{k=1}^n p_k(t) (x_k - (a_0 t_k + b_0))^2 = \min_{a,b} \sum_{k=1}^n p_k(t) (x_k - (at_k + b))^2, \quad (3)$$

то необходимо, чтобы выполнялось равенство: $\lim_{t \rightarrow t_n + 0} p_n(t) = 1$, то есть предел справа функции $p = p_n(t)$ в точке t_n равен единице.

Приведенные рассуждения с необходимостью приводят к следующему алгоритму построения весовых коэффициентов.

Определим сначала функции $q = q_k(t)$, положив $q_k(t) = \frac{1}{|t-t_k|^\tau}$, где $\tau > 0$ – некоторое число. Очевидно, что $q_k(t) \rightarrow \infty$ при $t \rightarrow t_k$. Теперь положим при $k \neq n$:

$$p_k(t) = \frac{q_k(t)}{\sum_{i=1}^n q_i(t)} \quad \text{при } t \geq t_n \quad (4)$$

и

$$p_n(t) = \begin{cases} \frac{q_n(t)}{\sum_{i=1}^n q_i(t)} & \text{при } t > t_n \\ 1 & \text{при } t = t_n \end{cases} \quad (5)$$

Легко убедиться в том, что если в оптимизационной задаче (3) использовать весовые коэффициенты, определенные равенствами (4) и (5), экстраполирующая функция, являющаяся решением уравнения (3), удовлетворяет всем предъявляемым к ней требованиям.

Необходимо также заметить, что решение $x = x^*(t)$ уравнения (3), в общем случае, не будет представляться в виде $x = at + b$, а, значит, не будет принадлежать множеству χ , поскольку график этого решения чаще всего не является прямой линией. Более того, функцию $x = x^*(t)$, за исключением редких случаев, нельзя представить аналитически. Однако значения этой функции легко вычисляются в произвольной точке $t \geq t_n$.

Действительно, по наперед выбранному числу t вычисляются веса $p_k(t), k = 1, 2, \dots, n$, и строится оптимизационная задача (3). Находя частные производные целевой функции этой задачи по a и b и, приравнявая эти производные к нулю, получим систему двух линейных уравнений с постоянными коэффициентами с двумя неизвестными a и b :

$$\begin{cases} (\sum_{k=1}^n p_k(t)t_k^2)a + (\sum_{k=1}^n p_k(t)t_k)b = \sum_{k=1}^n p_k(t)x_k t_k \\ (\sum_{k=1}^n p_k(t)t_k)a + (\sum_{k=1}^n p_k(t))b = \sum_{k=1}^n p_k(t)x_k \end{cases},$$

решая которую найдем те параметры (a, b) , с помощью которых вычисляется значение функции $x = x^*(t)$ в выбранной точке t , а именно, положим $x^*(t) = at + b$.

Построенную функцию $x = x^*(t)$ предлагается использовать для прогнозирования дрейфа контролируемого параметра. Например, если у параметра X существуют ограничения сверху, а значение x_{np} является предельно допустимым для x , то для прогноза времени достижения этим параметром своего предельно допустимого значения достаточно найти наименьшее решение уравнения:

$$x^*(t) = x_{np} \quad (6)$$

относительно t . Это решение и определит искомое прогнозируемое время.

Отметим, что решать уравнение (6) можно различными способами, например, методом бисекций [8], или последовательным вычислением значений функции $x = x^*(t)$ с некоторым шагом, начиная с точки t_n .

Выбор числа τ осуществляется в зависимости от типа решаемой практической задачи путем его подбора на основе имеющихся экспериментальных или натуральных данных. В нашем случае допустимые результаты были получены при $\tau = 0.5$.

В качестве объекта анализа с использованием предложенной методики выступала маслосистема ГЦН Ростовской АЭС. На основе архивных данных АЭС осуществлялся контроль и прогнозирование изменений температуры масла на входе в ГЦН. На рисунке 1 приведен график температуры масла на входе в ГЦН, а на рисунке 2 приведены графики времени достижения температурой масла предельно допустимого значения, в качестве которого была выбрана температура 39.1°C (для одного из рассмотренных эпизодов работы ГЦН). Как уже отмечалось, фактическая блокировка ГЦН происходит при температуре 41°C , однако в архиве АЭС отсутствуют файлы, в которых существовал бы эпизод достижения предельно допустимой температуры, поэтому авторы искусственно ввели указанное ограничение для температуры. Это позволило проверить действенность построенного алгоритма, поскольку введенное ограничение не влияет на оценку эффективности методики.

Превышение предельной температуры происходит на 680-й минуте со времени начала ее измерения (рисунок 1). При использовании предложенного метода прогнозирования на 630-й минуте произошло (рисунок 2) практически полное совпадение прогноза и времени наступления критической ситуации (за 50 минут до реального события).

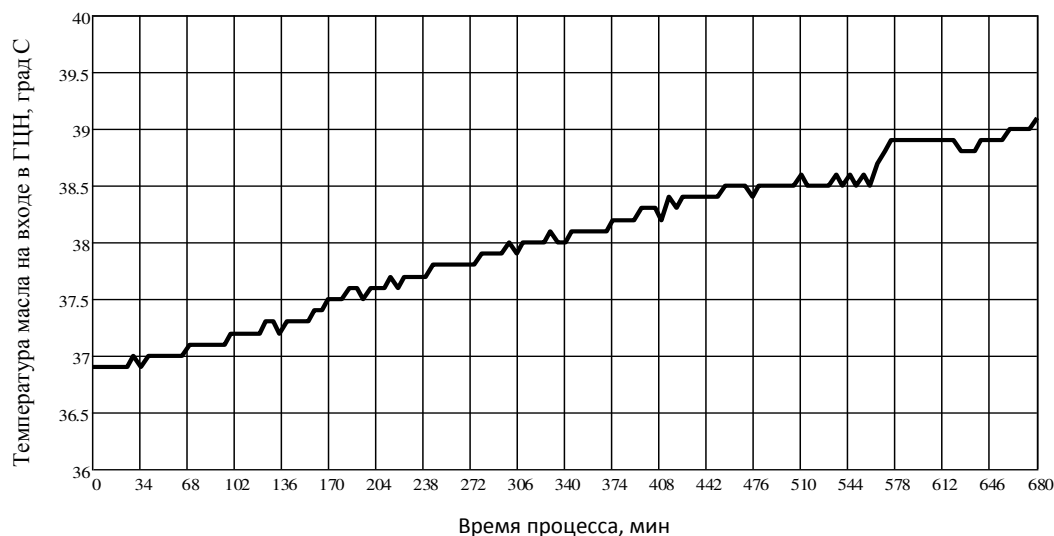


Рис. 1. – График температуры масла на входе в ГЦН

Таким образом, представлена методика прогнозирования изменений непрерывного параметра, позволяющая предсказывать нештатные ситуации на АЭС, которые могут возникнуть из-за перегрева масла в маслосистеме ГЦН, и предупредить персонал станции о возможном времени наступлении нештатной ситуации.

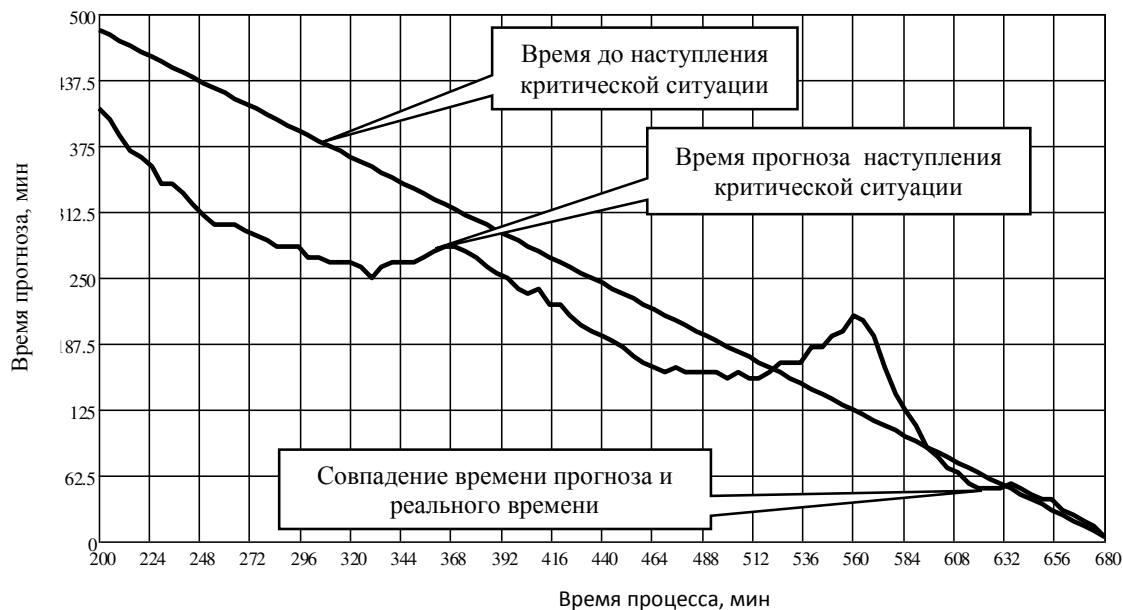


Рис. 2. – График прогноза времени наступления критической ситуации

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сысоев, Ю.С. Анализ дрейфа метрологических характеристик измерительных устройств с помощью цепей Маркова [Текст] / Ю.С. Сысоев // Измерительная техника. – 2012. – №1. – С. 14–19.
2. Сысоев, Ю.С. и др. Анализ стабильности работы измерительных приборов посредством стохастического прогнозирования дрейфа их метрологических характеристик [Текст] / Ю.С. Сысоев, А.И. Тихомирова // Измерительная техника. – 2012. – №6. – С.14–20.
3. Сысоев, Ю.С. и др. Оценка длительности межповерочных интервалов измерительных устройств методами теории массового обслуживания [Текст] / Ю.С. Сысоев, Н.А. Симакова // Измерительная техника. – 2014. – №12. – С. 10–15.
4. Сысоев, Ю.С. Использование геометрического и показательного распределений для прогнозирования дрейфа параметров технических объектов [Текст] / Ю.С. Сысоев // Измерительная техника. – 2015. – №12. – С. 17–19.
5. Сысоев, Ю.С. и др. Прогнозирование состояния технологических объектов на основе текущего мониторинга значений их параметров [Текст] / Ю.С. Сысоев, А.А. Сальников, В.Г. Бекетов, А.В. Чернов // Измерительная техника. – 2016. – №4.– С. 3–7.
6. Новоселов, О.Н. и др. Прогнозирование состояния динамической системы по результатам измерений [Текст] / О.Н. Новоселов, И.Л. Гуфельд // Измерительная техника. – 2015. – №10. – С. 11–15.
7. Сысоев, Ю.С. Алгоритмы выбора весовых характеристик при аппроксимации функций по методу наименьших квадратов [Текст] / Ю.С. Сысоев // Измерительная техника. – 1996. – №8. – С. 5–10.
8. Плис, А.И. и др. Лабораторный практикум по высшей математике [Текст] / А.И. Плис, И.А. Сливина. – М.: Высш. шк., 1983. – 208 с.

REFERENCES

- [1] Sysoev Yu.S. Analysis of the drift of the metrological characteristics of measuring devices by means of Markov chains. Measurement Techniques, 2012, Vol. 55, №1, ISSN 0543-1972, DOI: 10.1007/s11018-012-9910-5, pp. 14–19. (in English)
- [2] Sysoev Yu.S., Tikhomirova A.I. Analysis of the operational stability of measurement instruments by stochastic prediction of drift in their metrological characteristics. Measurement Techniques, 2012, Vol. 55, №6, ISSN 0543-1972, DOI: 10.1007/s11018-012-0010-3, pp. 613–621. (in English)
- [3] Sysoev Yu.S., Simakova N.A. Otsenka dlitelnosti mezhpoverochnykh intervalov izmeritelnykh ustroystv metodami teorii massovogo obsluzhivaniya [Assessment of duration of measuring devices intertesting intervals by methods of the theory of mass service]. Izmeritelnaya tekhnika

- [Measurement Techniques], 2014, №6, ISSN 0368-1025, pp. 10–15. (in Russian)
- [4] Sysoev Yu.S. Ispolzovanie geometricheskogo i pokazatel'nogo raspredeleniy dlya prognozirovaniya dreyfa parametrov tekhnicheskikh obektov [Use of geometrical and indicative distributions for forecasting of drift of technical object parameters]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 2015, №12, ISSN 0368-1025, pp. 17–19. (in Russian)
- [5] Sysoev Yu.S., Salnikov A.A., Beketov V.G., Chernov A.V. Prognozirovaniye sostoyaniya tekhnologicheskikh obektov na osnove tekushchego monitoringa znacheniy ikh parametrov [Forecasting of technological object condition on the basis of the current monitoring of their parameter values]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 2016, №4, ISSN 0368-1025, pp. 3–7. (in Russian)
- [6] Novoselov O.N., Gufeld I.L. Prognozirovaniye sostoyaniya dinamicheskoy sistemy po rezul'tatam izmereniy [Forecasting of dynamic system condition by results of measurements]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 2015, №10, ISSN 0368-1025, pp. 11–15. (in Russian)
- [7] Sysoev Yu.S. Algoritmy vybora vesovykh kharakteristik pri approksimatsii funktsiy po metodu naimenshikh kvadratov [Algorithms of the choice of weight characteristics at approximation of functions by the smallest squares method]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 1996, №8, ISSN 0368-1025, pp. 5–10. (in Russian)
- [8] Plis A.I., Slivina I.A. Laboratornyy praktikum po vysshey matematike [Laboratory works on higher mathematics]. M. Pub. «Vysshaya shkola» [Higher School], 1983, 208 p. (in Russian)

Forecasting Algorithm of Temperature Drift of Main Circular Pump Oil System of the NPP Unit with the VVER-1000 Reactor

Yu.S. Sysoev*, V.G. Bekhetov, N.A. Simakova*****

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

** e-mail: sysoev2004@mail.ru ; ** e-mail: VGBeketov@mephi.ru; *** e-mail: simnataalex@gmail.com*

Abstract – When modeling the hardest consequences of global scale at nuclear power plant accidents special attention of researchers is paid to a problem of forecasting of those NPP equipment parameters which are able to afford to inform about the approach of emergency in advance. The control of the parameters influencing safety of reactor installation becomes particularly important.

One of such parameters is oil temperature at the entrance to the Main Circulation Pump (MCP). The new technique of forecasting of continuous parameter changes allowing to predict emergency situations at the NPPs which can happen because of oil overheat in Main Circular Pump oil system and warn station personnel about possible time approach of emergency situation is presented.

Keywords: parameter restoration, interpolation, extrapolation, method of the smallest squares, forecasting.