
**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 004.94

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРЕДОТКАЗНЫХ СОСТОЯНИЙ МАСЛООХЛАДИТЕЛЕЙ ГЦН АЭС ПО ПАРАМЕТРАМ ЭКСПЛУАТАЦИИ

© 2020 В.В. Кривин, В.Я. Шпицер, В.А. Толстов, И.О. Ишигов

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, Волгодонск, Россия

В статье представлены результаты эмпирического моделирования маслосистемы главных циркуляционных насосов АЭС, предназначенной для маслоснабжения опорных подшипников и их охлаждения. Эмпирическая модель дооснащает производственную платформу мониторинга, скользящим линейным предсказателем, что обеспечивает поддержание эксплуатационной безопасности и функциональной пригодности ГЦН. Исходными данными для предсказателя являются контролируемые параметры ГЦН.

Ключевые слова: мониторинг, прогнозирование, безопасность АЭС, главный циркуляционный насос, теплообменник, цифровая обработка сигналов, непараметрическая статистика, нормативные пределы, индикатор Соколова-Зингера, индикатор термической эффективности.

Поступила в редакцию 02.09.2020

После доработки 07.10.2020

Принята к печати 12.10.2020

Теплообменники маслосистемы главной циркуляционной системы (ГЦН) относятся к кожухотрубным системам, использующим для охлаждения технологическую воду из природного резервуара. В результате теплообменная поверхность и межтрубное пространство загрязняются (засоряются) и требуют вывода из эксплуатации для очистки. Прерывания эксплуатационного режима происходят в случайные моменты времени. Требуется выявлять начало функционального несоответствия и предсказывать момент достижения недопустимого уровня нарушения нормальных условий эксплуатации системы маслоснабжения ГЦН.

Целевым индикатором с нормативным ограничением по верхнему пределу является температура масла на выходе из теплообменника. Возможные нарушения режима эксплуатации представляются исключительно переходными процессами при глубоком возмущении расходной характеристики в контуре охлаждающей воды.

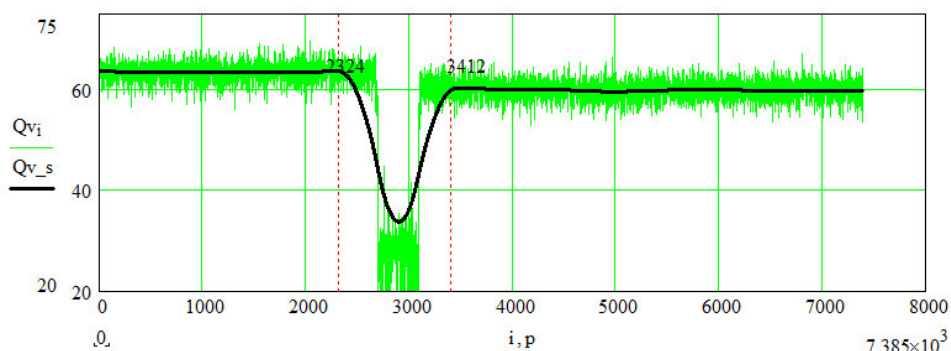


Рисунок 1 – Расход технической воды через теплообменник Q_v ($\text{м}^3/\text{ч}$), и его сглаженная копия – Q_{v_s} ; по оси абсцисс – номер измерения (аналог времени) [Consumption of technical water through the heat exchanger Q_v (cmph), and its smoothed copy – Q_{v_s} ; abcess axis is index of measurement (analogue of time)]

На рисунке 1 приведены измерения объёмного расхода технической воды через теплообменник, выполненные с дискретизацией 12,28 с. в течение месяца и сглаженная копия сигнала. Данные содержат возмущение объёмного расхода технической воды с $64 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $34 \text{ м}^3/\text{ч}$ продолжительностью 1,98 ч с последующим восстановлением в течение 1,73 ч до значения $60 \text{ м}^3/\text{ч}$. Если результатом возмущения является переход на стационарный уровень расхода ниже нормативного (например $30 \text{ м}^3/\text{ч}$), то это повод к аварийному управлению.

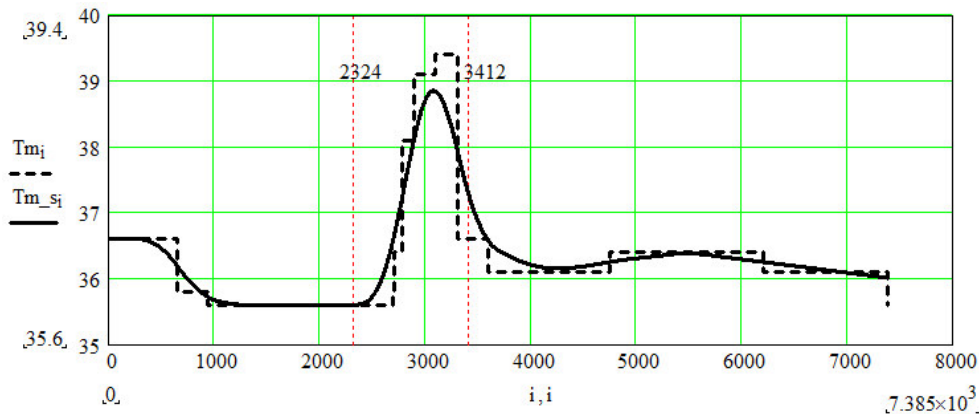


Рисунок 2 – Температура масла на выходе из теплообменника T_m и её сглаженная копия T_{m_s} [The oil temperature at the outlet of the heat exchanger T_m and its smoothed copy T_{m_s}]

На рисунке 2 приведены одновременно измеренные значения температуры масла на выходе из теплообменника. Реакция по температуре масла запаздывает на 0,61 ч. По этому индикатору установлена нормативная граница 40 C° , которая в данном возмущении не превышает.

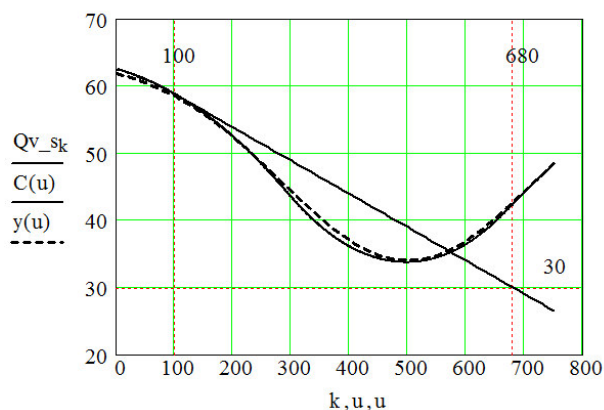
Приведенная пара сигналов может рассматриваться как типичный образ предвестника отказа, причём мониторинг сбросов расхода охлаждающей воды обеспечивает более раннее предупреждение. Локализацию предвестников ненормативных состояний и предсказание момента установления регламентного несоответствия, возможно, получать разными методами. Можно выделить статистическую идентификацию [1, 2] на архивном материале и глубокое обучение нейросетевого классификатора [3, 4].

В данной статье исследуется возможность применения линейного экстраполятора и некоторых специализированных индикаторов, удобных в технологии скользящего окна. Результаты прогноза состояний предлагаются оперативному персоналу как предупредительные. Алгоритм основан на сглаженной копии измеряемого сигнала для объёмного расхода и включает следующие действия:

1. Устанавливается контрольный уровень снижения объёмного расхода в контуре охлаждающей воды, например на 10% от средней текущей величины. Значения выше этого порога образуют квазистационарный временной ряд.

2. Фиксируется окно шириной $s \sim 100$ точек, которые обрабатываются и сохраняются в накопителе. Поступающие измерения, например, по 10 значений «проталкивают» в окне старые, становясь последними, и вновь запускается алгоритм обработки.

3. При обработке данных находится точка пересечения секущей дуги кривой, ограниченной окном, с нормативной нижней границей расходной характеристики (прогноз момента превышения предела). Подгоняется аппроксимация ожидаемой формы выброса. Минимум аппроксимации принимается за прогностическое значение объёмного расхода. Если прогностическое значение ниже нормативного, то это повод для сообщения оператору.



а.

Рисунок 3 – Аппроксимация гауссианом: $Qv_s(u)$ – сглаженная копия сигнала; $C(u)$ – скользящая секущая; $y(u)$ – гауссиан [Gaussian approximation: $Qv_s(u)$ – smoothed signal copy; $C(u)$ – moving secant; $y(u)$ – Gaussian]

Данным способом обрабатываются унимодальные кривые, аппроксимация которых может быть трёхпараметрической. Ниже представлены иллюстрации алгоритма с аппроксимацией выброса гауссианом (рис. 3) и произведением степенной и показательной функций (рис. 4).

На рисунке 3: 100 – ширина скользящего окна; 680 – абсцисса пересечения секущей и нормативного предела; 30 – нормативный предел; гауссиан определяется формулой (1):

$$y(u) = 64 - \exp\left(\frac{-(u-500)^2}{95000}\right). \quad (1)$$

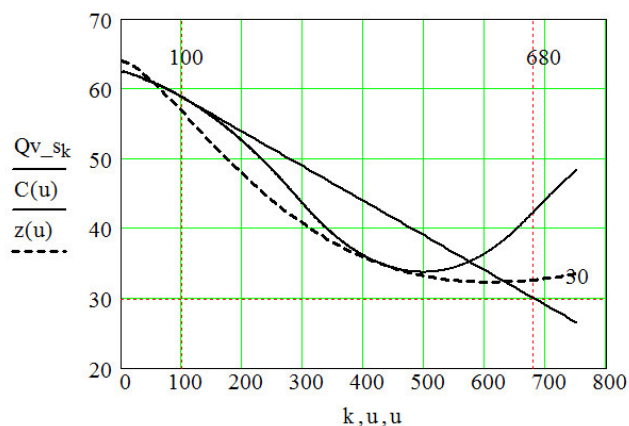


Рисунок 4 – Аппроксимация произведением степенной и показательной функций: $Qv_s(u)$ – сглаженная копия сигнала; $C(u)$ – скользящая секущая; $z(u)$ – аппроксимация [Approximation by the product of power and exponential functions: Gaussian approximation: $Qv_s(u)$ – smoothed signal copy; $C(u)$ – moving secant; $y(u)$ – approximation]

На рисунке 4: 100 – ширина скользящего окна; 680 – абсцисса пересечения секущей и нормативного предела; 30 – нормативный предел; аппроксимация определяется формулой (2):

$$z(u) = 64 - a \times u^b \times \exp(c \times u), \quad (2)$$

где $a = 0,0085$;
 $b = 1,52$;
 $c = -0,0025$.

Параметры модели возмущения расходной характеристики оцениваются методом наименьших квадратов (МНК). По мере накопления измерений достоверность прогноза повышается.

Описанный алгоритм подвергается обучению на множестве форм возможных возмущений объёмного расхода охлаждающего теплоносителя. Результатом обучения является формирование пространства однотипных векторов параметров аппроксимации. Предсказания возможных ненормативных состояний при повторных возмущениях производится в сконструированном пространстве вычислением средних по ближайшим соседям к последнему набору значений [5, 6].

Пусть исследуются возмущения измеряемой величины, возникающие в случайные моменты времени. Для первых двух возмущений ($j = 1, 2$) найдены наборы параметров аппроксимации сглаженных измерений во всех скользящих окнах $\hat{a}_{ij}, \hat{b}_{ij}, \hat{c}_{ij}; i = 1, \dots, m; j = 3, \dots, n$. Здесь i – номера скользящих окон, а j – номер текущего возмущения. Для возмущения № 3 $\hat{a}_{i3} = \frac{(\hat{a}_{i1} + \hat{a}_{i2})}{2}, \hat{b}_{i3} = \frac{(\hat{b}_{i1} + \hat{b}_{i2})}{2}, \hat{c}_{i3} = \frac{(\hat{c}_{i1} + \hat{c}_{i2})}{2}$. Для всех последующих формируется множество «ближайших соседей» к последнему измерению.

Обозначим $X_{is} = (\hat{a}_{is}, \hat{b}_{is}, \hat{c}_{is})$, $X_{ir} = (\hat{a}_{ir}, \hat{b}_{ir}, \hat{c}_{ir})$ – вектора, координатами которых являются значения параметров аппроксимаций i – номера скользящего окна, а s, r – номера соответствующих возмущений. Расстояние между ними обозначим $\rho(X_{is}, X_{ir})$. Вектор X_{iN} , координатами которого являются значения параметров аппроксимации последнего измерения назовём стартовым. Задавшись нужным числом m соседей, будем считать соседними к стартовому вектору X_{iN} Указанное число m этих векторов $X_{i(N-s)}$ удовлетворяющих условию, формула (3):

$$\sum_{s=1}^m \rho(X_{iN}, X_{i(N-s)}) = \min_{Q \in \Omega} [\sum_{s \in Q} \rho(X_{iN}, X_{i(N-s)})], \quad (3)$$

где Q – произвольный набор номеров длины m , Ω – множество всех наборов номеров значений ряда длины m , кроме номеров координат стартового вектора.

Результатом прогноза считаем среднее значение по найденным ближайшим соседям, формула (4):

$$X_{i(N+1)} \approx \left(\sum_{s=1}^m \frac{\hat{a}_{is}}{m}, \sum_{s=1}^m \frac{\hat{b}_{is}}{m}, \sum_{s=1}^m \frac{\hat{c}_{is}}{m} \right). \quad (4)$$

Мониторинг квазистационарного состояния в рамках регламентной эксплуатации не предполагает предсказаний, но на этом материале можно оценивать постепенное снижение термической эффективности теплообменника. На рисунке 5 иллюстрация квазистационарного регламентного расхода технической воды и его сглаженная копия.

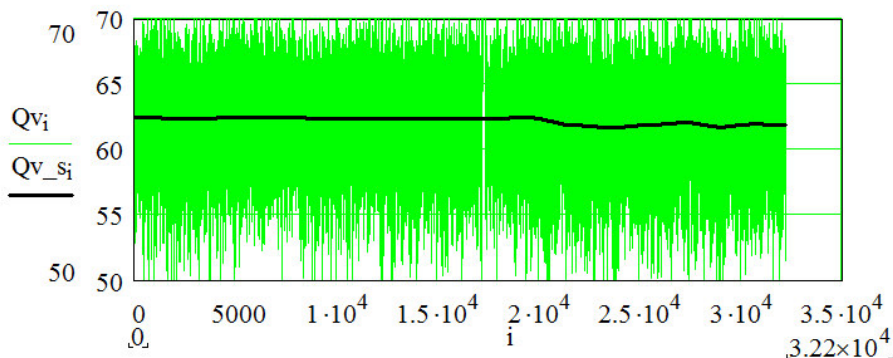


Рисунок 5 – Объёмный расход технической воды при нормальных условиях эксплуатации ($\text{м}^3/\text{ч}$)
[Volumetric flow rate of service water under normal operating conditions (cmph)]

Подробная структура сглаженной копии предстала на рисунке 6.

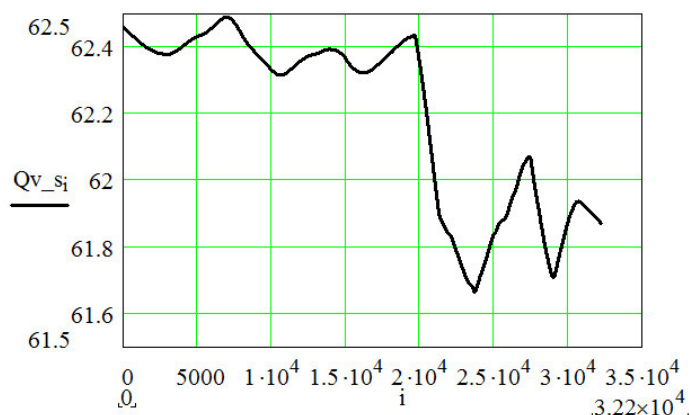


Рисунок 6 – Структура расходной характеристики в условиях штатной эксплуатации; продолжительность измерений ~ 4,6 суток (сглаженная копия) [The structure of the flow rate characteristics under normal operating conditions; measurement duration ~ 4.6 days (smoothed copy)]

Этой расходной характеристике соответствует график температуры масла на выходе из теплообменника рисунке 7.

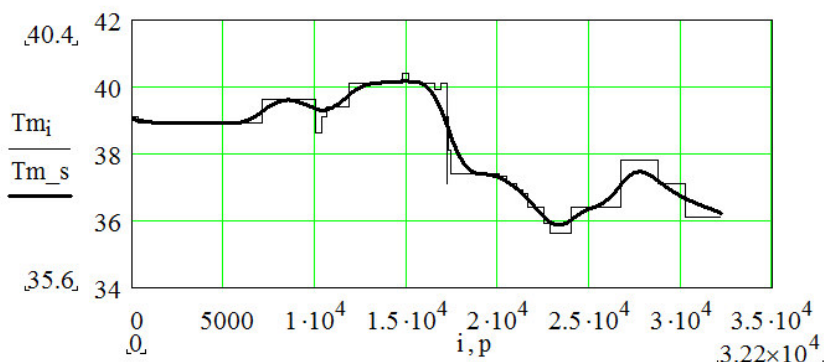


Рисунок 7 – Измерения и сглаживания копии температуры масла на выходе из теплообменника [Measurements and smoothed copies of the temperature of the oil on the heat exchanger output]

Подобные измерения обычно обрабатываются с помощью автокорреляционных и взаимокорреляционных функций [7, 8] относительно выбранных базовых участков кривых. В данной статье применены специализированные теплотехнические индикаторы.

Индикатор Соколова-Зингера индикатор известный как «параметр водо-водяного подогревателя» эффективно используется для построения систем мониторинга водо-водяных теплообменников [9, 10]. Мониторинг осуществляется по текущему значению показателя относительно значения для нормальных условий эксплуатации, формула (5):

$$\Phi = \frac{\sqrt{\delta t_M \delta t_{\text{Вод}}}}{\Delta t}, \quad (5)$$

где δt_M , $\delta t_{\text{Вод}}$ – изменение температур масла и воды в теплообменнике;

$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}$ – температурный напор;

$\Delta t_{\text{б}}$ – большее значение;

$\Delta t_{\text{м}}$ – меньшее значение разностей температур.

На рисунке 8 приведено поведение «индикаторов Соколова-Зингера» в интервале 61.7-62.5 м³/ч для нормальных условий эксплуатации (Φ_N) и с внесением 5%-ного возмущения по температуре масла (Φ). Для (Φ_N) может быть декларирован нормативный коридор, относительно которого фиксируется смещение текущей траектории.

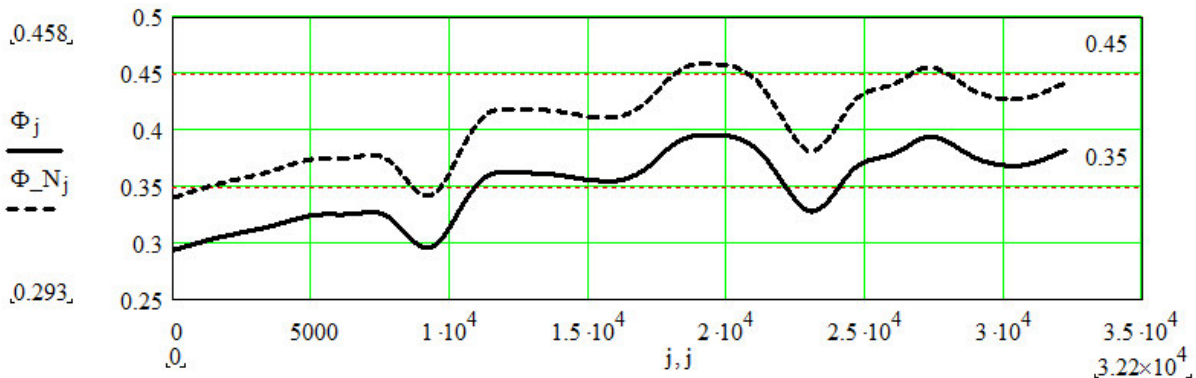


Рисунок 8 – Индикаторы Соколова-Зингера в интервале 61.7 – 62.5 м³/ч для нормальных условий эксплуатации (Φ_N) и с внесением 5%-ного возмущения по температуре масла (Φ) [Sokolov-Singer indicators in the range 61.7 – 62.5 cmph for normal operating conditions (Φ_N) and with the introduction of 5% disturbance in oil temperature (Φ)]

На рисунке 9 приведена шкала (0, 1) дефектности по соотношению (1-Φ/Φ_N) для маслоохладителя. Линейный «предсказатель» дефектности состояния теплообменника определяется на этой шкале. Прогнозирование превышения нормативного предела температуры масла на основе этого показателя может быть выведено для визуального контроля.

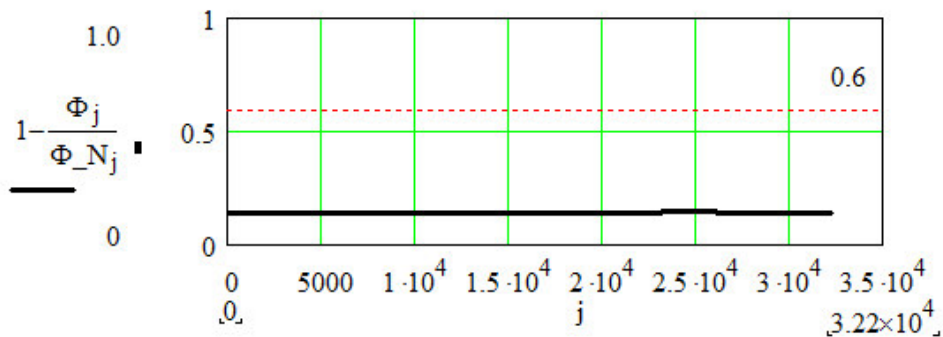


Рисунок 9 – Шкала (0,1) дефектности по соотношению (1-Φ/Φ_N) для маслоохладителя [Defectiveness scale (0,1) according to the ratio (1-Φ / Φ_N) for oil cooler]

Индикаторы на основе коэффициентов термической эффективности [11]. В интервале 60-63 м³/ч водяной эквивалент масла значительно меньше соответствующего значения для воды. В этом случае коэффициент термической эффективности теплообменника вычисляется по формуле (6):

$$\epsilon = \frac{t_M^{Bx} - t_M^{Byx}}{t_M^{Bx} - t_{Вод}^{Bx}} \quad (6)$$

На рисунке 10 коэффициенты термической эффективности теплообменника в интервале 61.7-62.5, м³/ч для нормальных условий эксплуатации (Θ) и с внесением 5%-ного возмущения по температуре масла (Θδ).

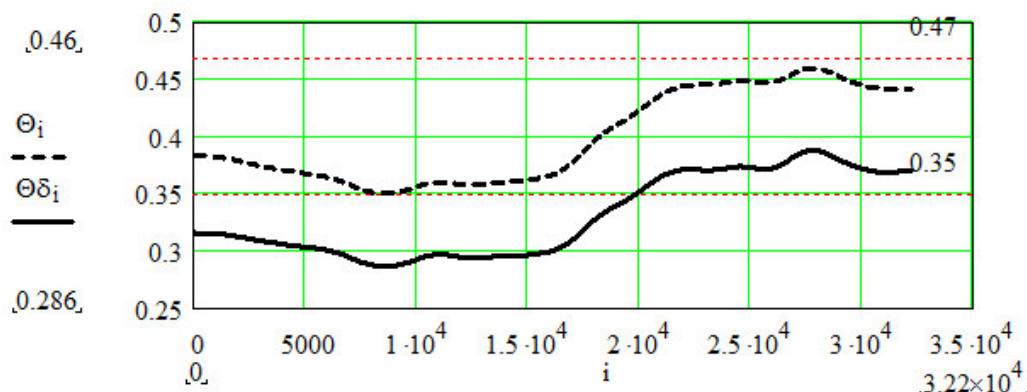


Рисунок 10 – Коэффициенты термической эффективности в интервале 61.7 – 62.5, м³/ч для нормальных условий эксплуатации (Θ) и с внесением 5%-ного возмущения по температуре масла ($\Theta\delta$) [Thermal efficiency coefficients in the range 61.7 – 62.5 cmph for normal operating conditions (Θ) and with the introduction of 5% disturbance in oil temperature ($\Theta\delta$)]

Можно использовать ещё один индикатор термической эффективности [12], формула (7):

$$r = \frac{t_{\text{Вод}}^{\text{Вых}} - t_{\text{Вод}}^{\text{Вх}}}{t_{\text{М}}^{\text{Вх}} - t_{\text{М}}^{\text{Вых}}} \quad (7)$$

На рисунке 11 индикатор термической эффективности теплообменника в интервале 61.7-62.5, м³/ч для нормальных условий эксплуатации (Ω) и с внесением 5%-ного возмущения по температуре масла ($\Omega\delta$).

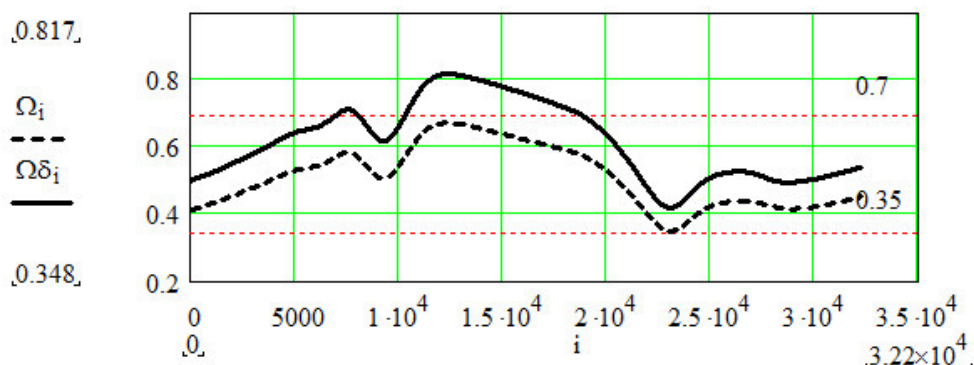


Рисунок 11 – Индикаторы термической эффективности в интервале (61.7 – 62.5, м³/ч) для нормальных условий эксплуатации (Ω) и с внесением 5%-ного возмущения по температуре масла ($\Omega\delta$) [Thermal efficiency indicators in the range 61.7 – 62.5 cmph for normal operating conditions (Ω) and with the introduction of 5% disturbance in oil temperature ($\Omega\delta$)]

Очевидно, что на этих индикаторах можно построить систему прогноза и мониторинга, так же как и на «индикаторе Соколова-Зингера». Из всех подобных конструкций индикаторов, допустимых для маслоохладителей ГЦН, рассмотренные – являются наиболее практичными. Применение «Индикаторов Соколова-Зингера» и «Индикаторов на основе коэффициентов термической эффективности» позволяет сформировать универсальную линейную шкалу дефектности теплообменника и осуществлять прогнозируемый вывод его из эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Славутский, Л. А. Основы регистрации данных и планирования эксперимента / Л. А. Славутский. – Чебоксары : Издательство ЧГУ, 2006. – 200 с.

2. *Фомин, Я. А.* Теория выбросов случайных процессов / Я. А. Фомин. – Москва : Связь, 1980. – 216 с.
3. *Коэльо, Л. П.* Построение систем машинного обучения на языке Python / Л. П. Коэльо, В. Ричарт; перевод с английского А. А. Слинкин. – Москва : ДМК Пресс, 2016. – 302 с.
4. *Флах, П.* Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / П. Флах. – Москва : ДМК Пресс, 2015. – 400 с.
5. *Лоскутов, А. Ю.* Основы теории сложных систем / А. Ю. Лоскутов, А. С. Михайлов. – Москва – Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2007. – 620 с.
6. *Сысоев, Ю. С.* Использование временных рядов для формирования промежутков однотипного поведения параметров объекта при различных способах прогнозирования / Ю. С. Сысоев // Измерительная техника, 2018. – № 2. – С. 8-12.
7. *Орлов, А. И.* Прикладная статистика / А. И. Орлов. – Москва : Экзамен, 2004. – 656 с.
8. *Орлов, Ю. Н.* Индикативные статистики для нестационарных временных рядов / Ю. Н. Орлов, Д. О. Шагов // Препринты ИПМ им. М. В.Келдыша, 2011. – № 53. – С. 20. – URL : <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-53> (дата обращения: 02.09.2020).
9. *Зингер, Н. М.* Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем / Н. М. Зингер – Москва : Энергоатомиздат. 1986. – 320 с.
10. *Соколов, Е. Я.* Теплофикация и тепловые сети / Е. Я. Соколов – Москва : Издательство МЭИ, 1999. – 472 с.
11. *Уонг, Х.* Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров / Х. Уонг – Москва : Атомиздат, 1979. – 216 с.
12. *Белкин, А. П.* Диагностика теплоэнергетического оборудования / А. П. Белкин, О. А. Степанов. – Санкт-Петербург : Лань, 2018. – 240 с. URL : <https://e.lanbook.com/book/105988> (дата обращения: 02.09.2020).

REFERENCES

- [1] Slavutskiy L.A. Osnovy` registracii danny`x i planirovaniya e`ksperimenta [The Basis of Data Registration and Experiment Planning]. Cheboksary: Izdatel'stvo CHGU [Cheboksary: Publishing house of ChGU]. 2006. 200 p. (in Russian).
- [2] Fomin Ya.A. Teoriya vy`brosov sluchajny`x processov [The Theory of Random Process Outliers]. Moskva: Svyaz`. [Moscow: Communication]. 1980. 216 p. (in Russian).
- [3] Coelho L.P., Richart V. Postroenie sistem mashinnogo obucheniya na yazy`ke Python [The Building of Machine Learning Systems in Python Language]. Moskva: DMK Press [Moscow: DMK Press]. 2016. 302 p. (in Russian).
- [4] Flach P. Mashinnoe obuchenie. Nauka i iskusstvo postroeniya algoritmov, kotory`e izvlekayut znaniya iz danny`x [The Machine Learning. The Science and Art of Building Algorithms that Extract Knowledge from Data]. Moskva: DMK Press [Moscow: DMK Press]. 2015. 400 p. (in Russian).
- [5] Loskutov A.Yu., Mikhailov A.S. Osnovy` teorii slozhny`x system [The Basis of Complex System Theory]. Moscow-Izhevsk: Institut komp`yuterny`x issledovaniy [The Institute of Computer Science]. 2007. 620 p. (in Russian).
- [6] Sysoev Yu.S. Ispol`zovanie vremenny`x ryadov dlya formirovaniya promezhutkov odnotipnogo povedeniya parametrov ob`ekta pri razlichny`x sposobax prognozirovaniya [The Time Series Usage for the Formation of Intervals of Same Type Behavior of Object Parameters with Different Forecasting Methods]. Izmeritel`naya texnika [Measuring equipment]. 2018. №2. P. 8-12 (in Russian).
- [7] Orlov A.I. Prikladnaya statistika [Applied Statistics]. Moskva: Ekzamen [Moscow: Examination]. 2004. 656 p. (in Russian).
- [8] Orlov Yu.N., Shagov D.O. Indikativny`e statistiki dlya nestacionarny`x vremenny`x ryadov [Indicative Statistics for Non-Stationary Time Series]. Preprinty IPM im. M.V. Keldysha [Keldysh Institute Preprints. M.V. Keldysh]. 2011. N53. 20 p. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-53> (in Russian).
- [9] Zinger N.M. Gidravlicheskie i teplovy`e rezhimy` teplofikacionny`x sistem [Hydraulic and Thermal Modes of Heating Systems]. Moskva: Energoatomizdat [Moscow: Energoatomizdat]. 1986. 320 p. (in Russian).
- [10] Sokolov E.Ya. Teplofikaciya i teplovy`e seti [Heating and Heat Networks]. Moskva: Izdatel'stvo MEI [Moscow: MPEI Publishing House]. 1999. 472 p. (in Russian).
- [11] Uong X. Osnovny`e formuly` i danny`e po teploobmenu dlya inzhenerov [Basic Formulas and Data of Heat Transfer for Engineers]. Moskva: Atomizdat [Moscow: Atomizdat]. 1979. 216 p. (in Russian).

- [12] Belkin A.P., Stepanov O.A. Diagnostika teploe`nergeticheskogo oborudovaniya [Diagnostics of Heat and Power Equipment]. Sankt-Peterburg: Lan`[St. Petersburg: Lan]. 2018. 240 p. URL: <https://e.lanbook.com/book/105988> (in Russian).

The Identification of Pre-Failure Conditions of Oil Coolers of NPP MCP by Operating Parameters

V.V. Krivin¹, V.Ya. Shpicer², V.A. Tolstov³, I.O. Ishigov⁴

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI",
Lenina street, 73/94, Volgodonsk, Russia 347360*

¹*ORCID iD: 0000-0003-0903-0786*

WoS Researcher ID: E-2267-2018

e-mail: vvkkrivin@mephi.ru

²*ORCID iD: 0000-0002-5051-5091*

e-mail: shpitsler@mephi.ru

³*ORCID iD: 0000-0001-7144-5195*

WoS ResearcherID: F-1032-2017

e-mail: v-tolstov-2017@mail.ru

⁴*ORCID iD: 0000-0002-5829-6989*

WoS Researcher ID: E-2448-2018

e-mail: ioishigov@mephi.ru

Abstract – The article deals with the results of empirical modeling of the oil system of the main circulation pumps of a nuclear power plant, designed for oil supply to support bearings and their cooling. The empirical model extends the industrial monitoring platform with a sliding linear predictor to maintain the operational safety and operability of the MCP. The initial data for the predictor are the controlled parameters of the MCP.

Keywords: monitoring, forecasting, NPP safety, main circulation pump, heat exchanger, digital signal processing, nonparametric statistics, regulatory limits, Sokolov-Singer indicator, indicator of thermal efficiency.