

Применение метода главных компонент для разработки системы диагностики содорегенерационного котлоагрегата

Д. А. Ковалёв¹, В. В. Куркина², Л. А. Русинов²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

E-mail: d.a.kovalyov@yandex.ru

Аннотация. Выявление и идентификация возможных нештатных ситуаций для обеспечения безопасной и безаварийной работы содорегенерационного котлоагрегата является актуальной научно-технической задачей, для решения которой используется линейный метод главных компонент. Разработка диагностической системы, работающей в режиме реального времени, позволит не только выявлять отклонения от нормального характера технологического процесса в содорегенерационном котлоагрегате на ранних стадиях, но и определять их причины и выдавать рекомендации по оперативному управлению процессом с целью устранения этих нарушений.

Ключевые слова: содорегенерационный котлоагрегат, диагностическая модель, метод главных компонент, нештатная ситуация

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные автоматизированные системы управления технологических процессов содорегенерационного котлоагрегата (СРК) выполняют ряд функций. В первую очередь это управление технологическими параметрами, исходя из задачи эффективного восстановления щелоков и поддержания в номинальных значениях средних параметров пара. Другой задачей котла является утилизация отработанных щелоков (черных щелоков).

СРК с естественной циркуляцией воды П-образной компоновки, представлен на рис. 1.

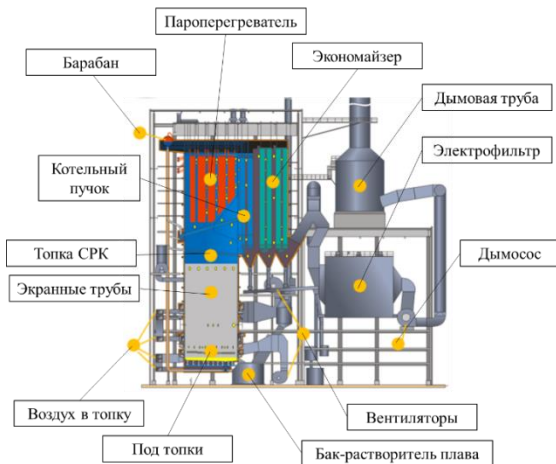


Рис. 1. Основные элементы СРК

В целом безопасность и регламентность работы такого сложного агрегата, как СРК, зависит от опыта работы операторов и содовщиков. Операторы перегружены обилием информации о процессе и просто не успевают вовремя заметить и пресечь развитие нарушения. Ряд нарушений в ходе технологического процесса очень быстро развиваются, например такие, как хлопки в баке плава или свищ в поверхностях нагрева в топке. Последствия данных нарушений очень опасны, так как могут привести к жертвам среди персонала, а также к серьезной порче оборудования.

Стоит заметить, что даже при развитии нарушения в ходе технологического процесса очень часто сложно идентифицировать, какая именно причина повлекла это нарушение. Кроме того, на практике имеется целое множество нарушений, развивающихся одновременно, что еще сильнее усложняет операторам анализ сложившейся ситуации.

II. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения задач обнаружения и своевременного распознавания подобных нештатных ситуаций может быть использована система мониторинга и диагностики состояния СРК, которая на этапе внедрения первоначально эксплуатируется, как система поддержки принятия решений оператором или в качестве советчика оператора. Реализация предложенного решения остается за оператором, однако, способность системы своевременно обнаружить факт нарушения и привлечь внимание оператора позволяет, по крайней мере, снизить число аварий.

Из уже сложившейся совокупности методов и подходов [1, 2] к разработке такой системы в рамках данной работы выбран комбинированный подход.

Для обнаружения факта возникновения нарушения используется статистическая диагностическая модель, построенная по методу главных компонент (МГК). МГК позволяет снижать размерность задачи, что существенно для выбранного объекта. В пользу применения МГК выступает также отсутствие адекватной феноменологической модели СРК, описывающей штатный и нештатный режим его работы.

Для идентификации нарушения, т. е. выявления конкретной причины, его вызвавшей, использование

модели МГК уже не целесообразно. Поэтому здесь предлагается использовать двухуровневую фреймово-производственную диагностическую модель, в основу которой положены результаты опроса операторов, технологов и других специалистов, имеющих опыт по управлению и наладке процессов СРК. Верхний уровень содержит корневые фреймы, объединяющие знания о возможных нарушениях в подсистемах объекта, полученные при его декомпозиции. На нижнем уровне находятся дочерние фреймы, в которых группируются производственные правила, описывающие причины конкретного нарушения. Отсутствие автоматического непрерывного контроля самого важного показателя эффективности работы котла – степени восстановления щелоков, предопределило включение этого показателя во фреймово-производственную модель.

Таким образом, диагностика нарушений в работе СРК происходит в два этапа:

1. обнаружение нарушения состояния СРК при непрерывном мониторинге на основе МГК-модели нормального режима работы котла.
2. идентификация причины нарушения по фреймово-производственной модели [1].

1 этап диагностики – обнаружение факта возникновения нарушения по МГК

МГК производит преобразование выборки исходных коррелированных данных в выборку новых некоррелированных переменных, осуществляя переход в пространство главных компонент [3]:

$$X = TP^T \quad (1)$$

где X – матрица исходных данных со значениями переменных процесса, P – матрица нагрузок или главных компонент; T – матрица счетов или матрица проекций исходных данных на главные компоненты. Данные нормируются к нулевому среднему и единичной дисперсии [4].

Процедура обнаружения нарушений базируется на мониторинге двух статистик T^2 и Q , по отклонению которых от пороговых значений определяются моменты отклонения процесса от регламентных рамок, т.е. возникновения нарушений [4–9].

Статистика T^2 представляет собой сумму нормированных квадратов счетов t_k :

$$T^2 = \sum_k^q \frac{t_k^2}{s_k^2} \quad (2)$$

где q – число главных компонент, учитываемых в модели, $k \in [1, q]$; S_k^2 – дисперсия t_k .

Q -статистика – это сумма невязок, не объясненных моделью:

$$Q = e^T e = (x - \bar{x})^T (x - \bar{x}) \quad (3)$$

где e – невязки.

Нарушение фиксируется при уверенном превышении хотя бы одной из этих статистик пороговых значений.

• порог для T^2 -статистики определяется с учетом того, что в реальных условиях эта статистика подчиняется распределению Фишера: $F_{\alpha}(q, (n-q))$ – q , $(n-q)$ степенями свободы (α -уровень значимости):

$$C_T \approx \frac{(n+1)q}{n-q} F_{\alpha}(q, (n-q)), \quad (4)$$

где, q – по-прежнему число первых главных компонент, учитываемых в модели МГК, n – число выборок измерений с p переменными

• порог для Q -статистики определяется более сложно:

$$C_Q = \theta_1 \left[1 - \theta_2 h_0 (1 - h_0) / \theta_1^2 + z_{\alpha} (2\theta_2 h_0^2)^{1/2} / \theta_1 \right]^{1/h_0}$$

$$\theta_1 = \sum_{j=q+1}^p \lambda_j, \theta_2 = \sum_{j=q+1}^p \lambda_j^2, \theta_3 = \sum_{j=q+1}^p \lambda_j^3, h_0 = 1 - 2\theta_1\theta_3 / 3\theta_2^2, \quad (5)$$

где z_{α} – процентная точка нормального распределения при уровне значимости α ; λ_j ($j = q+1, \dots, p$) – собственные числа ковариационной матрицы переменных процесса.

2 этап диагностики – распознавание причины нарушения

Как уже указывалось, для идентификации нарушений используется фреймово-производственная диагностическая модель. При ее разработке в ходе опроса экспертов учитывалась возможность появления нечеткостей и ошибок в их ответах [8]. Эти ошибки возникают из-за несогласованности в терминологии, из-за сложности решаемой задачи и т.п. причин, поэтому полученная от экспертов информация анализировалась и обрабатывалась в несколько этапов [9].

ТАБЛИЦА I. СТРУКТУРА КОРНЕВОГО ФРЕЙМА

Обозначение	Содержимое слота															
FrK ₁₂	Фрейм макроситуации (корневой фрейм): <i>Подсистема зеленого щелока</i>															
Atr ₁₂ = {Q _j }	Определяющие диагностические параметры, $j \in [1, 2]$: температура воды через летки – $T_{\text{воды через летки}}$; уровень зеленого щелока – $L_{\text{уровень зеленого щелока}}$. $T_{\text{воды через летки}} > 70 \text{ C}$ $L_{\text{уровень зеленого щелока}} = \text{визуально}$															
Nor ₁₂ = {S _i }	Диагностические показатели, $i \in [1, 2]$: $T_{\text{воды через летки}}$, $L_{\text{уровень зеленого щелока}}$.															
Im ₁₂ {λ _{y,i} }	Матрица причинно-следственных отношений: <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td style="text-align: center;">S_i</td> <td>T воды через летки</td> <td>L-ур зел щел</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Fr</td> <td>></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">D_y</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td>1</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td></td> <td>1</td> </tr> </table>	S _i	T воды через летки	L-ур зел щел	Fr	>		D _y			1	1		2		1
S _i	T воды через летки	L-ур зел щел														
Fr	>															
D _y																
1	1															
2		1														
St ₁₂	Статус St=0/ St=1 если хоть один $s_i > \lambda_{y,i}$															
FrD _{12.1} FrD _{12.2}	Фреймы макроситуаций (дочерние фреймы) $y \in [1, 2]$: Хлопки в баке зеленого щелока Хлопки в летках															

В результате декомпозиции сложного объекта управления СРК [10] для каждой из подсистем были сформированы корневые (таблица 1) фреймы, активация

которых происходит при превышении пороговых значений переменных, характеризующих группы ситуаций, и дочерние фреймы (табл. 2) содержащие причины конкретных нарушений. При этом причины прописываются как нечеткие продукционные правила [11].

ТАБЛИЦА II. СТРУКТУРА ОДНОГО ИЗ ДОЧЕРНИХ ФРЕЙМОВ КОРНЕВОГО ФРЕЙМА

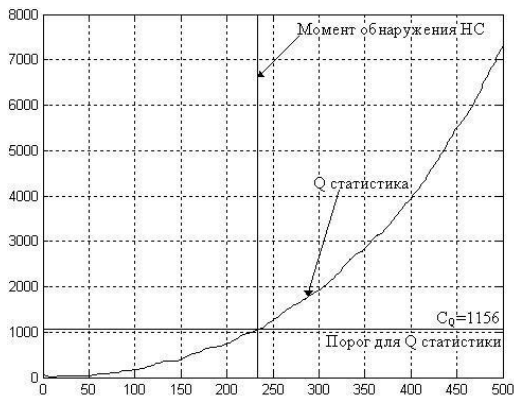
Обозначение	Содержимое слота
FrD _{12.1} FrD _{12.2}	Фреймы макроситуаций (дочерние фреймы) $y \in [1, 2]$: Хлопки в баке зеленого щелока Хлопки в летках
DM ₁₂	Список правил, описывающих макроситуации
RL ₁₂	Если T воды через летки $> 0,1 \uparrow$, то Dg ₁₂ , Rc ₁₂
RL ₁₃	Если L _{ур зел щел.} < 1 , то Dg ₁₃ , Rc ₁₃
Diag ₁₂	Список возможных макроситуаций и причин
Dg ₁₂	Хлопки в баке зеленого щелока
Dg ₁₃	Хлопки в летке
Rec ₁₂	Список рекомендаций по устранению нарушений
Rc ₁₂	Останов котла, ремонт
Rc ₁₃	Остановить поток плава на летку, уменьшить мощность котла

Экспериментальная проверка предлагаемого метода диагностики

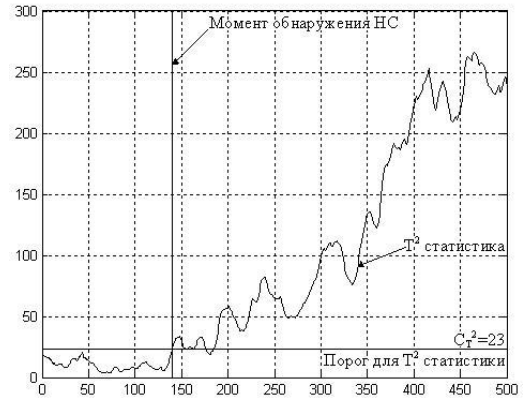
Для проверки работы системы диагностики была смоделирована ситуация «нарушение в тракте зеленого щелока». В данном фрейме есть конкурирующие ситуации, имеющие одинаковые симптомы. Их различение представляет определенные трудности для системы диагностики. Метод испытывался на более трудно определяемых постепенно развивающихся нарушениях.

Как видно из рис. 2 факт возникновения нарушения был обнаружен T² статистикой уже на 142 шаге, а Q статистикой на 235 шаге. Причина, его вызвавшая, определена уже на 290 шаге. Величина шага 1 секунда.

а. Изменения Q статистики



б. Изменения T² статистики



в. Изменение значения критерия близости

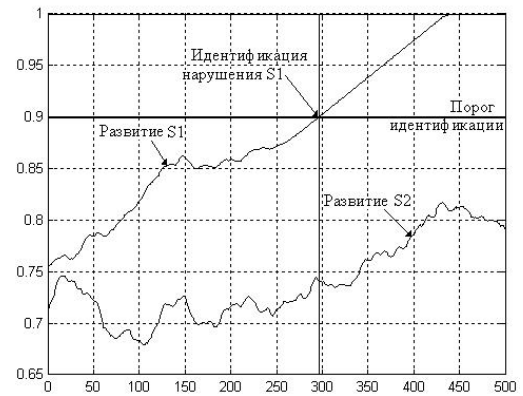


Рис. 2. Динамика изменений статистик Q и T² для подсистемы зеленого щелока СРК при имитационном моделировании нештатной ситуации «хлопки в баке зеленого щелока»

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен комбинированный метод диагностики. Обнаружение нарушения производится статистическим методом с предварительным снижением размерности методом главных компонент. Это позволило организовать непрерывный мониторинг процессов в содорегенерационном котле, контролируя всего две статистики: T² и Q. При превышении порогового значения хотя бы одной из этих статистик фиксируется факт обнаружения нарушения.

Для обнаружения нарушений, существенно различающихся по времени развития, строятся две МГК-модели, адаптация которых к изменяющимся условиям на процессе происходит с существенно разным временным интервалом.

Для определения причин нарушения (его идентификации) на основе экспертной информации строится двухуровневая фреймово-продукционная модель. Причина нарушения считается определенной, если значения критерия близости текущей ситуации к ситуациям в дочернем фрейме модели превысит некоторый порог γ .

Для проверки работоспособности данного метода с помощью имитационного моделирования [12–16] был сформирован массив данных, полученных с процесса. Для моделирования процесса развития нештатной ситуации на ряд параметров накладывались линейные

возмущения таким образом, чтобы к концу окна эти параметры достигали своих пороговых значений. При этом моделировались конкурирующие ситуации, т.к. их распознавание затруднено из-за наличия одинаковых симптомов.

В итоге проверки метода было показано, что на первом этапе производится уверенное обнаружение нарушений. Идентификация нарушения происходит позже после обнаружения нештатной ситуации. Проверка метода показала, что идентификация производится устойчиво. И даже при развитии двух конкурирующих ситуаций производится уверенная идентификация истинных причин вызвавших нарушение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Рудакова И.В., Куркина В.В., Русинов Л.А. Алгоритмическое обеспечение систем диагностики для режима обнаружения нештатных ситуаций на контролируемом объекте // Прикладная химия. РАН. СПб, 2003. 17 с. Деп. в ВИНТИ г. СПб.
- [2] Rusinov L.A., Rudakova I.V., Kurkina V.V. Real time diagnostics of technological processes and field equipment // Chemometrics and intelligent laboratory systems, 2007. V.88. P.18-25.
- [3] Esbensen K.H. Multivariate data analysis – in practice, CAMO, Oslo, 2000, 598p.
- [4] Галиаскаров М.Р. Сравнительный анализ характеристик мониторинга технологического процесса с использованием линейного и нелинейного метода главных компонент / М.Р. Галиаскаров, И.В. Рудакова, Л.А. Русинов // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2013. № 22(48). С. 106–110. EDN RUPEOJ.
- [5] Joe Qin, S. Statistical process monitoring: basics and beyond. Journal of Chemometrics, 2003. N.17. P.480–502.
- [6] Ketelaere B., Hubert M., Schmitt E. Overview of PCA-Based Statistical Process-Monitoring Methods for Time-Dependent, High-Dimensional Data // Journal of Quality Technology, 2015. V.47. N.4. P. 318-335.
- [7] Мешалкин В.П. Экспертные системы в химической технологии. Основы теории, опыт разработки и применение. М.: Химия, 1995. 368 с.
- [8] Рудакова И.В. Оперативное управление процессом полимеризации этилена при высоком давлении: дис. ... канд. техн. наук. / Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет). Санкт-Петербург, 2004. 182 с. EDN NMSTLV.
- [9] Osipenko U. Development of a Fuzzy Production Model for a Diagnostic System of a Catalyst State in the Process of Olefins Production / U. Osipenko, V. Kurkina, L. Rusinov // Proceedings - 2019 21st International Conference "Complex Systems: Control and Modeling Problems", CSCMP 2019, Samara, 03–06 сентября 2019 года. Samara: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 680-683. DOI 10.1109/CSCMP45713.2019.8976818. EDN MNTLXK.
- [10] Ковалев Д.А. Анализ возможных нарушений технологических процессов в сордерегенерационном котле // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2021. № 56(82). С. 108-111. DOI 10.36807/1998-9849-2020-56-82-108-111. EDN WYMCWM.
- [11] Diagnostics of sintering processes on the basis of PCA and two-level neural network model / E.G. Egorova, I.V. Rudakova, L.A. Rusinov, N.V. Vorobjev // Journal of Chemometrics. 2018. Vol. 32, No. 2. P. e2959. DOI 10.1002/cem.2959. EDN UXXHIX.
- [12] Kukharova T.V., Ilyukhina Y.A., Shestopalov M.Y., "Development of a Methodology for Controlling the Process of Heating Metal Blanks in a Methodical Furnace," 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), Saint Petersburg, Russian Federation, 2022, pp. 718-721, doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755574.
- [13] Kukharova T.V., Utkin V.A., Boev I.V., "Observation and Prediction Systems Modeling for Human Mental State," 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602831.
- [14] Yury I., Martirosyan A. The development of the sodereberg electrolyzer electromagnetic field's state monitoring system. Sci Rep 14, 3501 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52002-w>
- [15] Asadulagi M.-A.M., Pershin I.M., Tsapleva V.V. Research on Hydrolithospheric Processes Using the Results of Groundwater Inflow Testing. Water 2024, 16, 487. <https://doi.org/10.3390/w16030487>
- [16] Pershin I.M., Papush E.G., Kukharova T.V., Utkin V.A. Modeling of Distributed Control System for Network of Mineral Water Wells. Water 2023, 15, 2289. <https://doi.org/10.3390/w15122289>