

АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ, РАЗВИВАЮЩИХСЯ В РЕЖИМЕ С ОБОСТРЕНИЕМ

Д. В. Артамонов¹, В. М. Мыскин², А. Д. Семенов³

^{1,2,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

² Научно-производственная фирма «Круг», Пенза, Россия

¹ dva@pnzgu.ru, ² myskin.vlad97@gmail.com, ³ sad-50@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность данной разработки обусловлена научной популярностью развития применения нейронных сетей и интеллектуальных технологий в промышленности и низкой эффективностью современных систем противоаварийных защит, которые имеют существенные недостатки, основные из которых - «пропуск цели» и «ложная тревога». Целью данной работы, является повышение безопасности и технико-экономической эффективности существующих систем контроля и управления, на основе методов теории развивающихся процессов с обострением. *Материалы и методы.* В рамках выполнения данной исследования были использованы методы современной теории автоматического управления, методы идентификации технологических объектов и методы компьютерного моделирования. *Результаты.* Проведён анализ аварийных ситуаций, развивающихся в режиме с обострением, характерной особенностью которых является степенной закон развития и три стадии развития аварии. Проведено прогнозирование аварийной ситуации в системе температурного контроля электрогенератора с использованием метода скользящей линеаризации, позволяющей установить начало её возникновения и выделить все три стадии развития аварии. *Вывод.* Для достижения поставленных целей необходимо совершенствовать современные систем противоаварийных защит. Предлагается рассматривать развитие аварии, как развивающийся процесс с обострением. Для анализа предлагается использовать методы скользящей линеаризации реальных временных рядов, с последующим прогнозированием развития аварий.

Ключевые слова: авария, аварийная ситуация, режим с обострением, скользящая линеаризация

Для цитирования: Артамонов Д. В., Мыскин В. М., Семенов А. Д. Анализ аварийных ситуаций, развивающихся в режиме с обострением // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2023. № 3. С. 39–47. doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-5

ANALYSIS OF EMERGENCY SITUATIONS DEVELOPING IN THE MODE WITH AGGRAVATION

D.V. Artamonov¹, V.M. Myskin², A.D. Semenov³

^{1,2,3} Penza State University, Penza, Russia

² Scientific and production company "Krug", Penza, Russia

¹ dva@pnzgu.ru, ² myskin.vlad97@gmail.com, ³ sad-50@mail.ru

Abstract. *Background.* The relevance of this development is due to the scientific popularity of the development of the use of neural networks and intelligent technologies in industry and the low efficiency of modern emergency protection systems, which have significant drawbacks, the main of which are "missing the target" and "false alarm". The purpose of this work is to improve the safety and technical and economic efficiency of existing control and management systems, based on the methods of the theory of developing processes with aggravation. *Materials and methods.* Within the framework of this study, methods of modern theory of automatic control, methods of identification of technological objects and methods of computer modeling were used. *Results.* The analysis of emergency situations developing in the mode with aggravation, the characteristic feature of which is the power law of development and three stages of accident development. The prediction of an emergency situation in the temperature control system of an electric generator was carried out using the method of sliding linearization, which allows to establish the beginning of its occurrence and to distinguish all three stages of the accident development. *Conclusion.* To achieve these goals, it is necessary to improve modern emergency protection systems. It is proposed to consider the development of the accident as a developing process with aggravation. For the analysis, it is proposed to use methods of sliding linearization of real time series, followed by forecasting the development of accidents.

Keywords: accident, emergency situation, mode with aggravation, sliding linearization

For citation: Artamonov D.V., Myskin V.M., Semenov A.D. Analysis of emergency situations developing in the mode with aggravation. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2023;(3):39–47. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2023-3-5

Введение

Известно, что возникновение аварий на технологических объектах наносит большой материальный ущерб как самим объектам, так и окружающей среде. Одной из мер, служащих для обеспечения безопасности взрывопожароопасных технологических процессов, предусматриваются автоматические системы противоаварийной защиты (ПАЗ). Практика эксплуатации таких систем показала, что при возникновении аварийной ситуации система ПАЗ, построенная на допусковом контроле, не всегда предотвращает возникновение аварии.

Согласно РФ ГОСТ Р 22.0.05–2020 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Термины и определения», авария – опасное техногенное происшествие, создающее на объекте, определенной территории или акватории угрозу жизни и здоровью людей, и приводящее к разрушению или повреждению зданий, сооружений, оборудования и транспортных средств, нарушению производственного или транспортного процесса, нанесению ущерба окружающей среде.

Возникновению аварии предшествует аварийная ситуация, представляющая собой сочетание опасных состояний (положений или условий существования и функционирования) объектов природно-техногенной сферы, определяющих переход из нормальной (штатной) обстановки или ситуации к аварийной, связанной с поражением объектов, человека и среды жизнедеятельности [1]. Аварийная ситуация является частью или показателем аварийной обстановки, когда превзойдены ее предельно допустимые границы и начинаются опасные обратимые или необратимые изменения параметров состояния объектов, человека (операторов, персонала, населения) и среды жизнедеятельности, приводящие к аварии.

Постановка задачи

В соответствии с введенным определением аварийную ситуацию, возникающую в некотором объекте или системе, можно рассматривать как процесс неограниченного роста во времени переменных системы, приводящего к возникновению аварии.

В качестве примера на рис. 1 приведено изменение показаний датчика радиальных вибраций турбины Саян-Шушенской ГЭС [2].

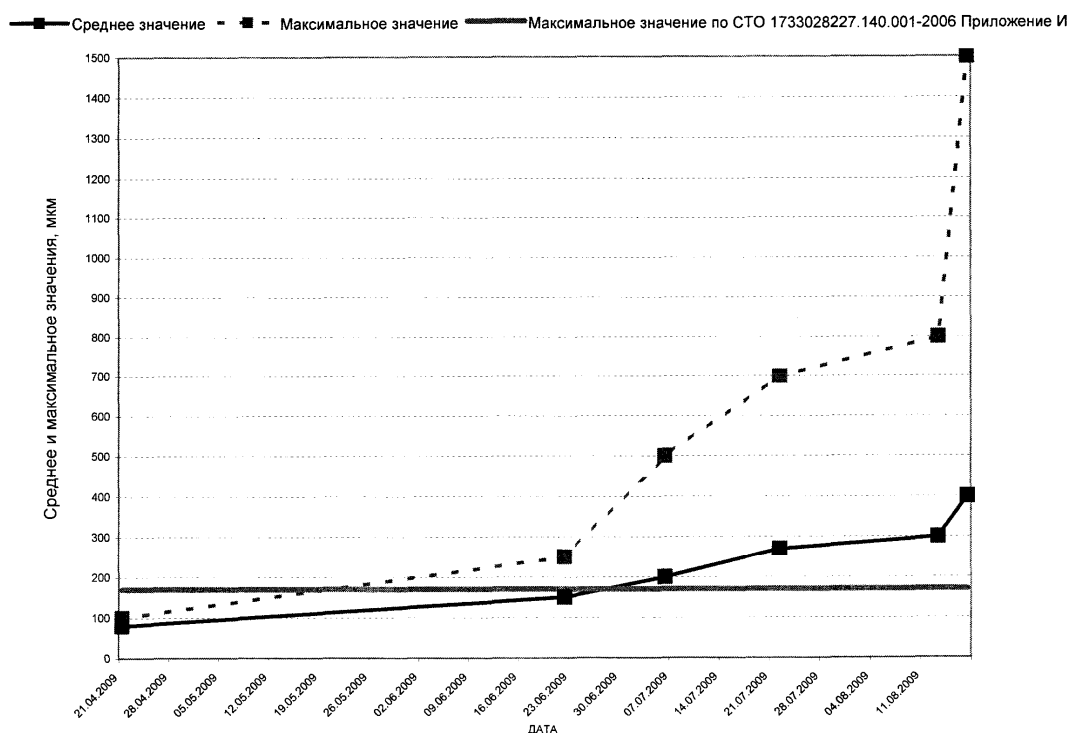


Рис. 1. Изменение показаний датчика радиальных вибраций турбины Саян-Шушенской ГЭС

Рост переменных системы в процессе ее развития присущ развивающимся системам [3]. Общим же для развивающихся процессов и систем (РПС) является степенной закон их развития [4].

Степенные законы часто встречаются в физике, биологии, науках о Земле и космосе, в экономике и финансах, информатике, демографии и прочих социальных науках. Например, степенным законам отвечают распределения размеров городов, силы землетрясений, вспышек на Солнце, размеры кратеров на Луне, масштабы военных конфликтов и богатство людей и пр.

Для степенного закона характерны три фазы развития [3]:

- в первой фазе развития скорость развития системы остается постоянной или увеличивается незначительно и линейно;

- во второй фазе развития скорость развития увеличивается и растет уже не линейно, но коэффициент нелинейного роста незначителен по величине, и общая картина изменений на этом этапе близка к линейной, хотя уже и заметно от нее отличается;

- на третьей фазе развития наблюдается резкое увеличение скорости, близкой к скорости роста геометрической прогрессии – так называемый экспоненциальный рост.

Переход системы на третью фазу развития в соответствии с теорией катастроф необратим и неизбежно приводит к аварии системы.

Заметим, что на рис. 1 четко видны все три фазы развития аварийной ситуации турбины Саяно-Шушенской ГЭС.

Относительно большая длительность первой и второй фазы развития аварийной ситуации и линейная скорость ее развития, в принципе, позволяют с высокой степенью надежности прогнозировать ее возникновение и развитие.

Математическая модель развития аварийной ситуации

Покажем, что развитие аварийной ситуации осуществляется по степенному закону и происходит в режиме с обострением.

Начиная с работ А. Н. Колмогорова, И. Г. Петровского, Г. С. Пискунова, А. Тюринга, И. Пригожина, Г. Хакена и других при моделировании явлений самоорганизации в различных системах часто используют математические модели, в основе которых лежат системы нелинейных параболических уравнений типа реакция–диффузия:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[C(u) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + Q(u), \quad (1)$$

где t – время; x – пространственная координата; u – это физические переменные системы (концентрация, температура, производительность и т.п.). Объемные источники и стоки в правой части могут толковаться как нелинейное влияние обратных связей в физических, биологических, экономических и других системах. В работах [5, 6] было показано, что нелинейные зависимости $C(u)$ и $Q(u)$ в уравнении (1) во многих случаях приводят к неограниченному возрастанию функции и за конечное время – режиму с обострением. Особенностью режимов с обострением (для одного уравнения вида (1)) является вырождение многих сложных нелинейных зависимостей $C(u)$ и $Q(u)$ в (1) в более простые виды зависимостей. В таких случаях на асимптотической стадии уравнение (1) можно заменить (в зависимости от вида $C(u)$ и $Q(u)$) на уравнение с экспоненциальными коэффициентами; уравнение со степенными коэффициентами и уравнение Гамильтона – Якоби. При этом только уравнения со степенными зависимостями обладают сложным спектром устойчивых (или метастабильных) динамических структур. Эти математические идеи и выводы были сформулированы в работе [7] в виде антропного принципа в синергетике – при развитии режимов с обострением только узкий класс моделей со степенными зависимостями для $C = C_0 u^\sigma$ и $Q = Q_0 u^p$, и только в определенном диапазоне значений σ , p может описывать эволюцию сложных систем с большим числом различных структур и форм организации.

Полагая среду, где развивается аварийная ситуация, однородной, перейдем к обыкновенному дифференциальному уравнению:

$$\frac{du}{dt} = au^2 + bu + c, \quad (2)$$

где a , b и c – постоянные коэффициенты. Однородность среды делает инвариантным выбор точки отсчета, поэтому в уравнение (2) $b = c = 0$, тогда

$$\frac{du}{dt} = au^2. \quad (3)$$

Решение (3) имеет вид

$$u = \frac{1}{\frac{1}{u(0)} - at}, \quad (4)$$

$u(0)$ – начальное значение переменной u .

Переменная в уравнении (4) изменяется по степенному закону в режиме с обострением, поскольку за конечный отрезок времени:

$$\Delta t = \frac{1}{\frac{1}{au(0)}}, \quad \lim_{t \rightarrow \Delta t} u \rightarrow \infty. \quad (5)$$

Анализ аварийной ситуаций в системе температурного контроля электрогенератора

На рис. 2 показана система температурного контроля синхронного генератора типа ТФ-60-2УЗ.

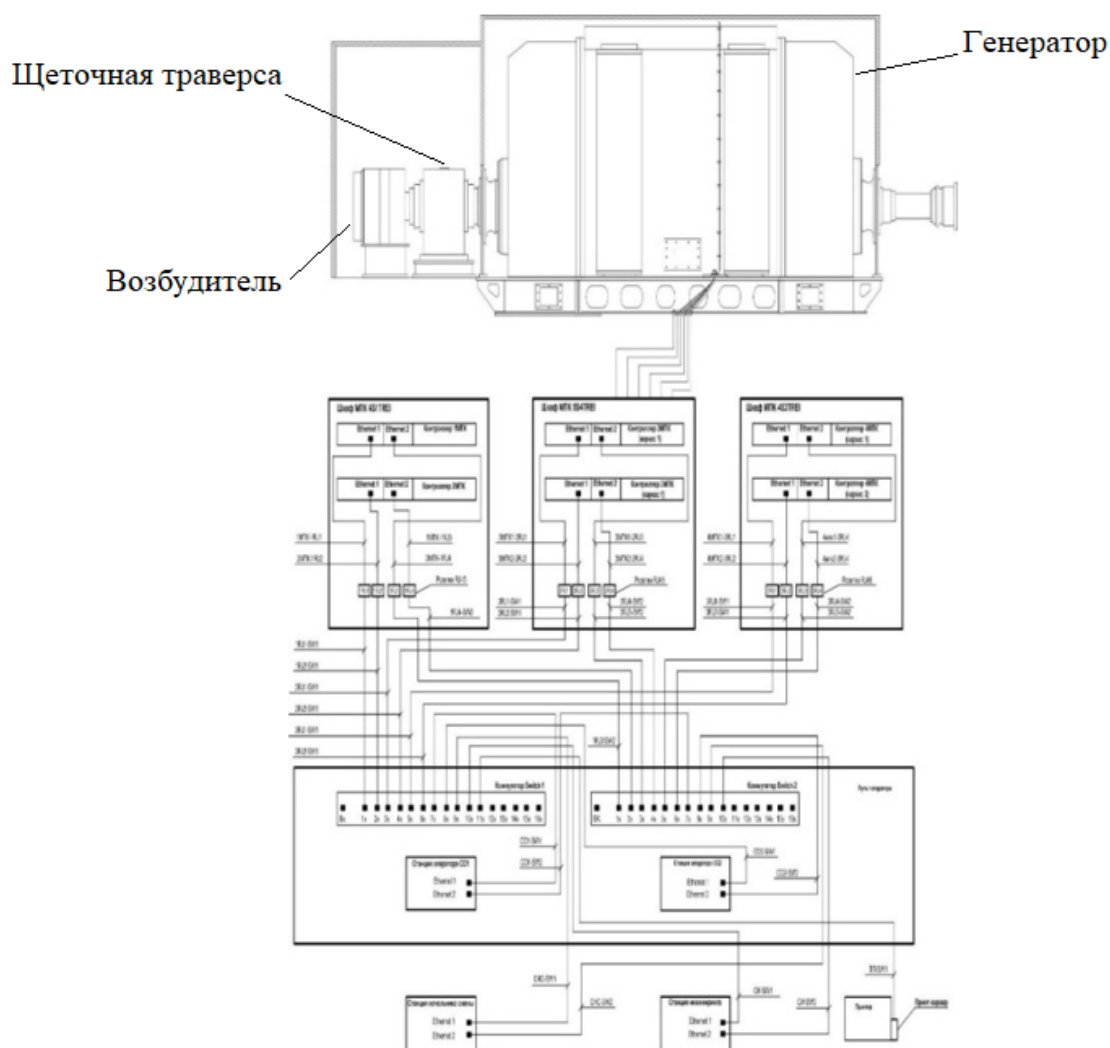


Рис. 2. Подсистема температурного контроля генератора

Система температурного контроля генератора выполнена на базе ПТК КРУГ, реализующего допусковый алгоритм температурного контроля.

При контроле технологических параметров генератора должны соблюдаться следующие требования:

- периодичность измерения контролируемых параметров – 7 с;
- в нормальном режиме работы генератора должна быть обеспечена запись значений контролируемых параметров с интервалом 1 ч;
- при выходе любого контролируемого параметра за пределы допустимых значений и поступлении сигнала должна быть обеспечена автоматическая регистрация значений параметров с интервалом 1 мин;
- должен быть обеспечен вывод результатов измерений параметра и установки для осуществления визуального контроля его величины до возвращения ее в норму.

Если регистрируемые температуры превышают допустимые, то нагрузка генератора должна быть снижена до значения, при котором температуры не превышают допустимых, и при первой возможности генератор должен быть остановлен для выявления и устранения причин повышенного нагрева.

На рис. 3 представлено изменение температуры воздуха на выходе из щеточной траверсы при возникновении ее аварии, зарегистрированной системой контроля.

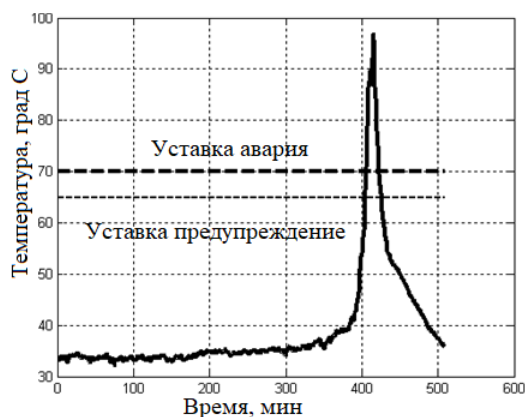


Рис. 3. Развитие аварии щеточной траверсы генератора

Для предотвращения ложных срабатываний системы противоаварийной защиты уставки предупредительной и аварийной сигнализации были заданы на уровне в 650 и 700 С. При таких уставках произошел «пропуск цели» и из-за сгорания щеточной траверсы произошла авария, в результате которой генератор на длительное время был выведен из строя.

Процесс изменения температуры воздуха на выходе щеточной траверсы, график которого показан на рис. 3, с полным основанием можно рассматривать как развивающийся процесс с обострением. Процесс развития аварии состоит из трех этапов, отмеченных на рис. 4.

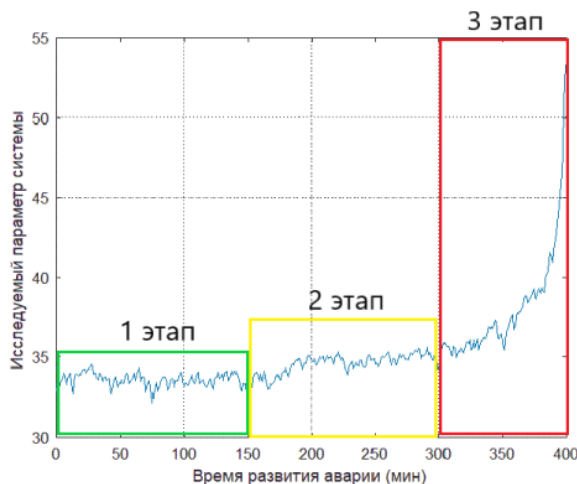


Рис. 4. Стадии развития аварии

Первый этап развития аварии – медленный количественный рост значений контролируемой переменной (температуры).

Второй этап – некоторое ускорение роста температуры.

Третий этап – резкое ускорение роста в режиме обострения, во время которого срабатывание системы предаварийной защиты уже не предотвращает аварии.

Резкое изменение контролируемой переменной на третьем этапе развития аварии делает неработоспособной систему допускового контроля, поскольку снижение уставок для обнаружения аварийной ситуации на втором этапе развития аварии приводит к «ложным тревогам», а желание устранить возникновение ложных тревог путем увеличения уровня уставок приводит к переходу системы на третий этап развития аварии и неизбежному «пропуску цели».

Аппроксимация кривых развития аварийной ситуации, приведенных на рис. 5 степенным законом в режиме с обострением [4], подтверждает обоснованность применения этого закона для анализа возникновения и развития аварийных ситуаций и возникновения аварии.

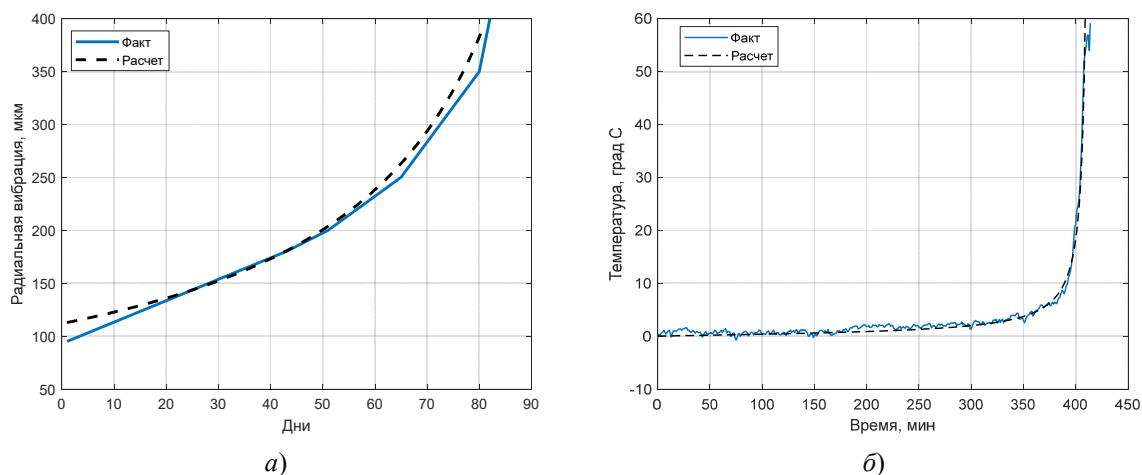


Рис. 5. Аппроксимация кривых развития аварии степенным законом:
а – генератор; б – щеточная траверса

Аппроксимация проводилась средствами MATLAB с использованием генетического алгоритма, минимизировался квадрат невязки:

$$\sum_{i=1}^n \left(u_i - \frac{1}{b - at_i} \right)^2 = \min. \quad (5)$$

Окно программы минимизации показано на рис. 6.

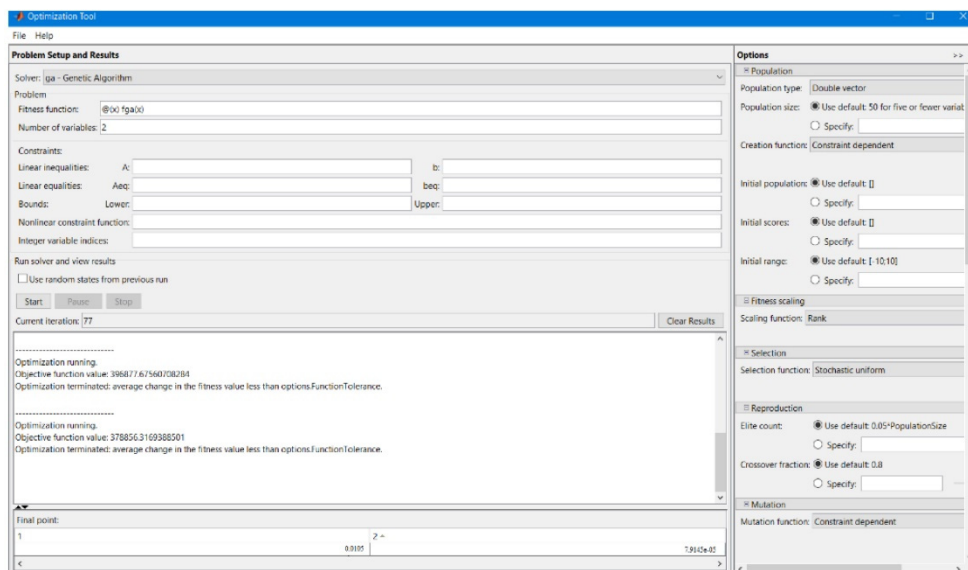


Рис. 6. Окно программы минимизации невязки

**Прогнозирование аварийных ситуаций, развивающихся
по степенному закону, в режиме с обострением**

Как отмечается в работе [3], в первой и во второй фазе развития аварийной ситуации скорость развития близка к линейной. Это обстоятельство позволяет выявлять линейный закон изменения контролируемого параметра, используя алгоритм скользящей линеаризации. В соответствии с этим алгоритмом в исходном временном ряде $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ выделяется скользящее окно s_j длиной L $s_j = [x_j, x_{j+1}, \dots, x_{j+L}]$ и производится аппроксимация находящегося в окне отрезка временного ряда уравнением прямой $y = k_j x + b_j$. Очевидно, что по мере смещения окна вдоль временного ряда коэффициенты аппроксимирующей прямой будут изменяться, а их увеличение будет свидетельствовать о возникновении аварийного режима.

На рис. 7,а приведено изменение коэффициентов аппроксимирующей прямой, полученных в результате скользящей линеаризации временного ряда аварии, приведенного на рис. 7,б.

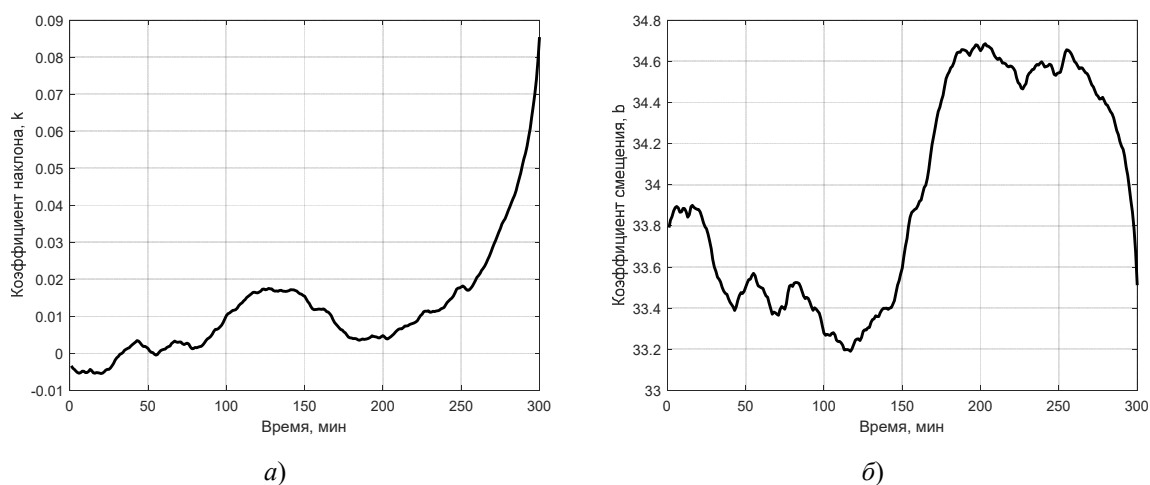


Рис. 7. Изменение коэффициентов аппроксимирующей прямой:
а – изменение коэффициентов; б – временной ряд развития аварии

На рис. 8 изображена фазовая траектория изменения коэффициентов аппроксимирующей прямой, на которой четко видно все три этапа развития аварии.

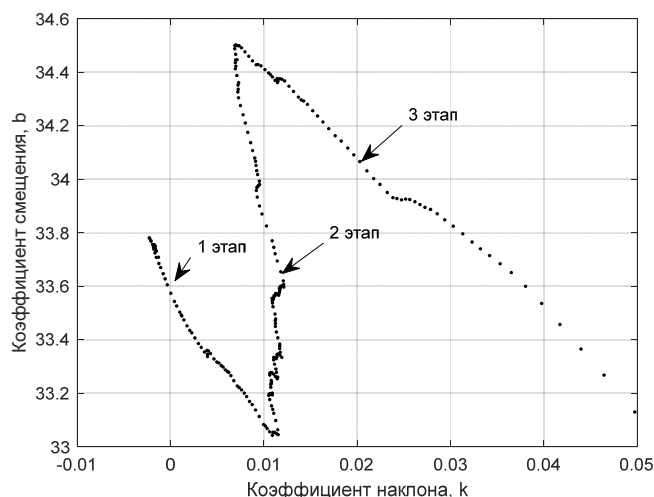


Рис. 8. Фазовая траектория изменения коэффициентов аппроксимирующей прямой

Заключение

1. Проведен анализ развития аварийной ситуации в системе температурного контроля электрогенератора, показано, что традиционные средства допускового контроля не обеспечивают надежной защиты. Стремление повысить надежность обнаружения аварийной ситуации путем

снижения уровня уставок допускового контроля приводит к частому возникновению «ложных тревог» при изменении режимов работы генератора, повышение уровня уставок для исключения «ложных тревог» приводит к недопустимым «пропускам цели».

2. Установлено что аварийная ситуация состоит из трех этапов, развивается в режиме с обострением и ее развитие происходит по степенному закону.

3. Возникновение аварийной ситуации предложено выявлять по методу скользящей линейаризации, позволяющей обнаружить все три этапа ее развития.

Список литературы

1. Аварийная ситуация. URL: <https://fireman.club/inseklodepia/avarijnaya-situaciya>.
2. Авария на Саяно-Шушенской ГЭС. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki>
3. Александров В. В. Развивающиеся системы в науке, технике, обществе и культуре. СПб. : СПбГТУ, 2000. 244 с.
4. Hofstadter D. R. Godel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid. N.Y. : Basic Books, 1979. 779 p.
5. Галактионов В. А., Самарский Д. А. Методы построения приближенных автомодельных решений нелинейных уравнений теплопроводности // Математический сборник. 1982. Т. 118, № 3. С. 222–322 ; Т. 121, № 2. С. 131–155.
6. Самарский А. А., Галактионов В. А., Курдюмов С. П., Михайлов А. П. Режимы с обострением в задачах для квазилинейных параболических уравнений. М. : Наука, 1987. 480 с.
7. Князева Е. Л., Курдюмов С. П. Антропный принцип в синергетике // Вопросы философии. 1997. № 3. С. 62–79.

References

1. *Avarijnaya situatsiya = Emergency situation*. (In Russ.). Available at: <https://fireman.club/inseklodepia/avarijnaya-situaciya>
2. *Avariya na Sayano-Shushenskoy GES = Accident at the Sayano-Shushenskaya HPP*. (In Russ.). Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki>
3. Aleksandrov V.V. *Razvivayushchiesya sistemy v nauke, tekhnike, obshchestve i kul'ture = Developing systems in science, technology, society and culture*. Saint Petersburg: SPbGTU, 2000:244. (In Russ.)
4. Hofstadter D.R. *Godel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid*. New York: Basic Books, 1979:779.
5. Galaktionov V.A., Samarskiy D.A. Methods for constructing approximate self-similar solutions of nonlinear heat conduction equations. *Matematicheskiy sbornik = Mathematical collection*. 1982;118(3):222–322, 121(2):131–155. (In Russ.)
6. Samarskiy A.A., Galaktionov V.A., Kurdyumov S.P., Mikhaylov A.P. *Rezhimy e obostreniem v zadachakh dlya kvazilineynykh parabolicheskikh uravneniy = Modes with aggravation in problems for quasi-linear parabolic equations*. Moscow: Nauka, 1987:480. (In Russ.)
7. Knyazeva E.L., Kurdyumov S.P. The anthropic principle in synergetics. *Voprosy filosofii = Questions of philosophy*. 1997;(3):62–79. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Владимирович Артамонов

доктор технических наук, профессор,
первый проректор университета,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: dva@pnzgu.ru

Dmitry V. Artamonov

Doctor of technical sciences, professor,
first vice-rector of the university,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Владислав Михайлович Мыскин

инженер по автоматизированным системам
управления технологическим процессом,
Научно-производственная фирма
«Круг» (Россия, г. Пенза, ул. Германа
Титова, 1); аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Краснова, 40)
E-mail: myskin.vlad97@gmail.com

Vladislav M. Myskin

Engineer for automated process control systems,
Scientific and production company "Krug"
(1 Germana Titova street, Penza, Russia);
postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Анатолий Дмитриевич Семенов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Краснова, 40)
E-mail: sad-50@mail.ru

Anatoliy D. Semenov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of information
and measurement technology and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию /Received 24.05.2023

Поступила после рецензирования /Revised 26.04.2023

Принята к публикации /Accepted 24.07.2023