

УДК 621.64:004.8

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК ИЗ ТРУБОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ ЗАШУМЛЕННОСТИ

А. Ф. Булатов¹, А. Г. Лютов²

¹general.artur88@gmail.ru, ²lutov1@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 20.07.2013

Аннотация. В рамках специализированных систем обнаружения утечек существует множество способов выявить факт наличия утечки и оценить ее величину. Описывается метод обнаружения утечек с использованием нейронных сетей, позволяющий выявлять мелкие утечки в условиях зашумленности. Рассматривается реализация описанного метода в Matlab с использованием генетического алгоритма.

Ключевые слова: утечка; нейронные сети; генетические алгоритмы; зашумленность.

В последнее время участились случаи нарушения герметичности магистральных трубопроводов. Последствия этих нарушений вызывают загрязнение окружающей среды, опасность возгорания и взрыва, а ликвидация последствий ведет к серьезным финансовым затратам.

Основной причиной нарушения герметичности магистральных трубопроводов является большой срок эксплуатации трубопровода. Около 68% магистральных трубопроводов имеют срок эксплуатации более 20 лет, т.е. находятся в критическом возрасте.

Немаловажной является проблема несанкционированных врезок в магистральные трубопроводы с целью хищения нефти и нефтепродуктов. Помимо непосредственного экономического ущерба, наносимого хищением нефтепродуктов, любая несанкционированная врезка, являясь ненормативной конструкцией, несет большую потенциальную опасность, поскольку изначально нарушает локальные прочностные характеристики трубопровода [1].

Таким образом, одной из задач эксплуатации трубопроводного транспорта является своевременное обнаружение утечек, возникающих из-за нарушения герметичности и ее локализации. Для этого применяются системы обнаружения утечек (СОУ).

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

На данный момент существует множество способов расчета местоположения утечек, основанных на вычислениях гидравлических пара-

метров технологического процесса. К одному из таких способов относится способ, связанный с расчетом местоположения утечек на основе нейронных сетей [2]. Для расчета местоположения утечек необходимо знать информацию об изменениях расхода и снижении давления в магистральном трубопроводе. На практике изменения давления и расхода не всегда связаны с наличием утечек в трубопроводе. Давление и расход могут изменяться вследствие технологических событий. Чтобы достоверно определить, относится изменение параметров к штатному событию (утечке), либо к штатным технологическим изменениям, необходимо выявить непосредственно сам факт наличия утечки и определить время ее начала.

Существует множество методов, позволяющих выявить факт утечки и оценить ее величину [3]. Одним из самых простых методов является метод сравнения расходов. Метод основан на постоянстве мгновенного расхода нефти и нефтепродукта в начале и конце участка трубопровода при отсутствии утечки в установленном режиме перекачки. Если разность между показаниями расходомеров превышает определенное значение, то выдается сигнал об утечке. По разности показаний расходомеров можно вычислить расход самой утечки. На основе этого метода можно определить утечку лишь в стационарном режиме, т. к. технологические переключения влияют на показания расходомеров.

Метод сравнения скорости расхода основан на измерении мгновенной скорости расхода в различных сечениях трубопровода. Поврежде-

ние или разрыв трубы вызывает резкое изменение скорости расхода транспортируемой нефти. Недостатком такого метода являются ложные срабатывания при технологических переключениях.

Причиной ложных срабатываний при нестационарных процессах является изменение массы продукта в самом трубопроводе. Так, например, при запрессовке продукта расход в начале участка будет больше, чем в конце, и система выдаст сигнал об утечки. Хотя по факту утечки не будет.

Одним из методов, учитывающих не только изменения расхода на концах участка, но также изменение массы в самом трубопроводе, является метод модифицированного материального баланса [4].

В основе метода лежит выражение, имеющее вид:

$$\int_{t_1}^{t_2} [\rho(x_1, t)Q(x_1, t) - \rho(x_2, t)Q(x_2, t)] V M(t_2) - M(t_1), \quad (1)$$

где $M(t_1)$ и $M(t_2)$ – масса перекачиваемого продукта на участке трубопровода в момент времени t_1 и t_2 соответственно, $\rho(x, t)$ $Q(x, t)$ – массовый расход перекачиваемого продукта в сечении x , в момент времени t .

Если равенство выражений в (1) выполняется с той или иной степенью точности, то утечки на контрольном участке трубопровода нет, в противном случае она имеет место.

Для вычисления массы на участке трубопровода необходимо знать распределение давления по всей длине нефтепровода:

$$M(t_0) = \int_{x_1}^{x_2} \rho_0 S_0 \left(1 + \frac{p(x, t_0) - p_0}{K} \right) \left(1 + \frac{d_0}{\delta E} (p(x, t_0) - p_0) \right) dx, \quad (2)$$

где ρ_0 – номинальная плотность жидкости; d_0 , S_0 , δ – номинальный диаметр, площадь поперечного сечения и толщина стенки трубопровода соответственно; K – модуль упругости жидкости; E – модуль Юнга материала трубы. Члены, стоящие в скобках, учитывают поправку плотности жидкости и площади сечения трубопровода на отклонение давления от атмосферного.

Вычисление поступившей жидкости происходит, как в классическом методе материального баланса, по показаниям расходомеров:

$$M_{\text{пост}} = \int_{t_1}^{t_2} \rho_0 \left(1 + \frac{p(x_1, t) - p_0}{K} \right) \cdot Q(x_1, t) dt, \quad (3)$$

$$M_{\text{выт}} = \int_{t_1}^{t_2} \rho_0 \left(1 + \frac{p(x_2, t) - p_0}{K} \right) \cdot Q(x_2, t) dt. \quad (4)$$

Вычисленное изменение массы за промежуток времени и разность между количеством поступившей и вытекшей жидкости за это же время сравниваются друг с другом, т. е. находят дисбаланс массы на участке трубопровода.

Если дисбаланс объемов нефти превысит установленное пороговое значение, включается аварийный сигнал о появлении утечки.

Процент ложных срабатываний зависит от погрешностей приборов и интенсивности самой утечки. На рис. 1 показана зависимость процента ложных срабатываний от интенсивности утечки при использовании приборов 2-го класса точности.

Таким образом, с помощью описанного выше метода можно безошибочно определить факт наличия самой утечки при ее интенсивности 1,5 %. Однако вопрос о точном времени возникновения утечки и определения величины изменения давления ΔP остается открытым.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК

Зная факт наличия утечки, оператор может легко определить ее начало по графику отображения давления. Однако для автоматизации процесса обнаружения утечек необходимо создать такую систему, которая на основе поступающих данных с датчиков давления и сигнала о наличие утечки сможет определять точное время начала утечки и соответственно изменение давления ΔP (рис. 2).

Согласно экспериментальным данным [4], малые утечки обнаруживаются через 212 с после их возникновения. Однако волна давления, за которую принято считать изменение давления на участке трубопровода, где возникла утечка, обнаруживается после 30 с, в зависимости от расстояния до датчика давления.

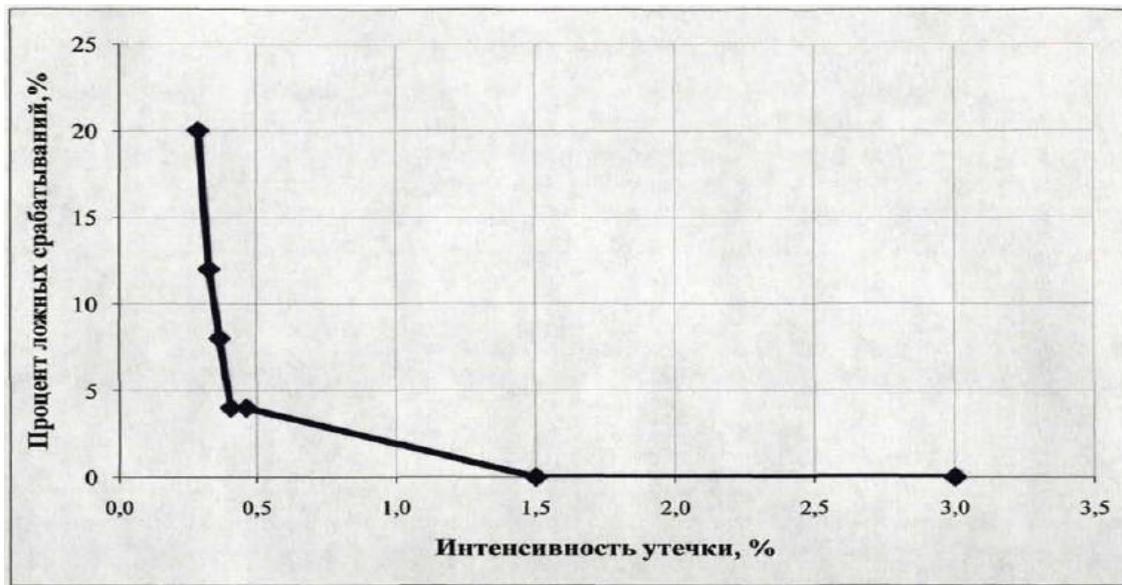


Рис. 1. Процент ложных срабатываний метода при утечках различной интенсивности при использовании приборов 2-го класса точности

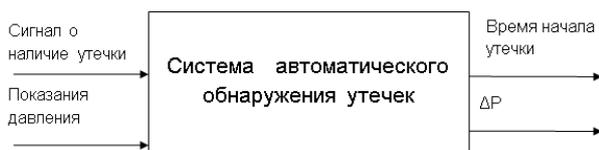


Рис. 2. Система обнаружения утечек, определяющая время начала и ΔP утечки

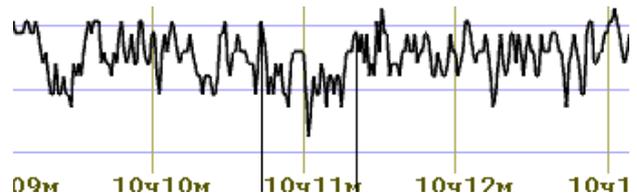


Рис. 3. График изменения давления при малой утечке

Для автоматического определения волны давления необходимо подавать на систему данные датчиков давления. Анализируя эти данные, система должна также выдавать время начала утечки и точное изменение давления ΔP в автоматическом режиме. Основной проблемой обнаружения волны давления является наличие колебаний показаний давления, возникающие из-за вибрации магистральных насосов. Особенно сложно определить волну при малой утечке. Например, небольшое снижение давления, связанное с малым отбором нефтепродукта (40 л/мин) с 10:10:40 до 10:11:20 сложно отнести к утечке и легко спутать с вибрацией насоса (рис. 3). Для распознавания утечки и определения времени начала утечки в систему обнаружения будет входить подсистема распознавания утечек (рис. 4).

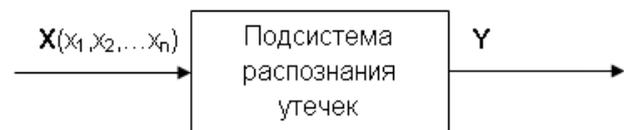


Рис. 4. Подсистема для распознавания утечек

Здесь X – вектор значений давлений за определенный период времени n секунд, Y – выход подсистемы, показывающий классифицированы ли входные значения x_1, x_2, \dots, x_n как утечка или нет. На графике (рис. 5) видно, что время начала утечки, отмеченное визером, примерно равно 6 мин 18 с. Утечку подсистема будет классифицировать такое событие, при котором происходит постепенное снижение и в дальнейшем не повышение давления. Так, например при $x_1 = P_{6:18}$, подсистема должна выдавать на выходе значения $Y \approx 1$, в то же время при $x_1 = P_{6:17}$ выход Y должен быть близок к 0. С помощью стандартных алгоритмов поиска можно найти

P_{\min} от начала утечки до установившегося значения.

Зная $P_{\text{нач}}$ и P_{\min} , можно найти ΔP по формуле $\Delta P = P_{\text{нач}} - P_{\min}$. За $P_{\text{нач}}$ будем принимать значение x_1 из вектора данных X , при котором нейронная сеть впервые по времени будет выдавать на выходе 1.

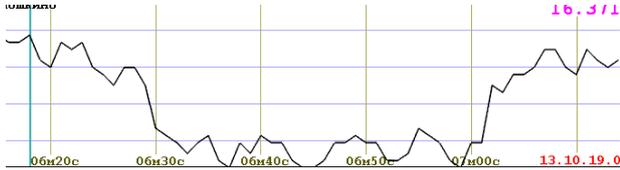


Рис. 5. График изменения давления при крупной утечке

Вектор входных значений X содержит n значений. Число n нужно выбрать таким образом, чтобы подсистема не приняла за утечку колебания (например, между 5:33 и 5:41), вызванные вибрацией насоса (рис. 6). Поэтому значение n нужно брать около 20–30. Более точное значение n будем определять во время моделирования, обучения и проверки разработанной подсистемы. В качестве такой подсистемы будем использовать искусственные нейронные сети, имеющие способность к распознаванию и классификации. В процессе обучения нейронная сеть сможет научиться избегать ошибок, так же как и опытный оператор, следящий за процессом.

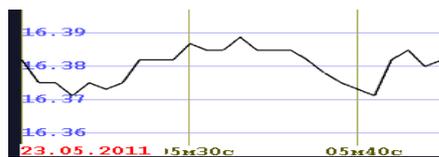


Рис. 6. График колебания давления вызванное шумом магистрального насосного агрегата

РАЗРАБОТКА НЕЙРОННОЙ СЕТИ И ЕЕ ОБУЧЕНИЕ

Нейронной сети предстоит задача распознать, относиться ли зашумленные наборы данных к утечке или нет. Для этой задачи подходит многослойный персептрон. Многослойная нейронная сеть включает в себя входной слой, выходной слой и один или несколько скрытых слоев. Входной слой состоит из n нейронов, где n – количество значений во входном векторе X (рис. 4). Функция активации входного слоя будет линейная функция $y = x$. Выходной слой состоит из одного нейрона, функцией активации

которого будет также линейная функция $y = x$. Если произошла утечка, то на выходе будет значение, близкое к 1, если нет, то к 0. Вопрос о структуре скрытого слоя является отдельной задачей, решаемой экспертами различными способами. Одним из таких способов является поиск оптимальной структуры нейронной сети с помощью генетических алгоритмов.

Для оптимизации скрытого слоя необходимо параметры нейронной сети представить в виде двоичного кода Грея и затем объединить в одну хромосому. Отличительной особенностью кода Грея является его помехозащищенность, поскольку соседние числа отличаются друг от друга только на 1 бит.

Хромосома S , описывающая структуру нейронной сети, будет состоять из 34 генов (рис. 7), где s_0 – количество скрытых слоев нейронной сети (от 1 до 4); s_1, s_3, s_5, s_7 – количество нейронов в 1–4-м слоях соответственно (от 1 до 32); s_2, s_4, s_6, s_8 – функции активации в 1–4-м слоях соответственно (от 1 до 8).

Распишем подробно каждую из функций активации:

1. Линейная функция активации с жестким ограничением **hardlim**:
2. Симметрическая функция активации с жестким ограничением **hardlims**:
3. Положительная линейная функция активации **poslin**:
4. Линейная функция активации **purelin**:
 n .
5. Радиально-базисная функция **radbas**:
6. Треугольная функция активации **tribas**:
7. Логическая функция **logsig**:

8. Гиперболическая тангенциальная функция tansig:

Если количество слоев будет равно 1, то количество нейронов и функции активации после-

дующих слоев не будут приниматься во внимание.

Первоначально создадим случайную популяцию хромосом S (рис. 8). Число хромосом в популяции M будет равно 60 исходя из правила $n < M \leq 2n$, где n – число генов в хромосоме.

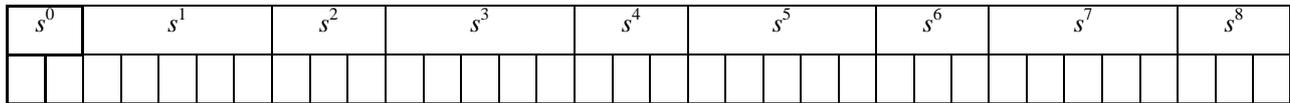


Рис. 7. Хромосома параметров нейронной сети

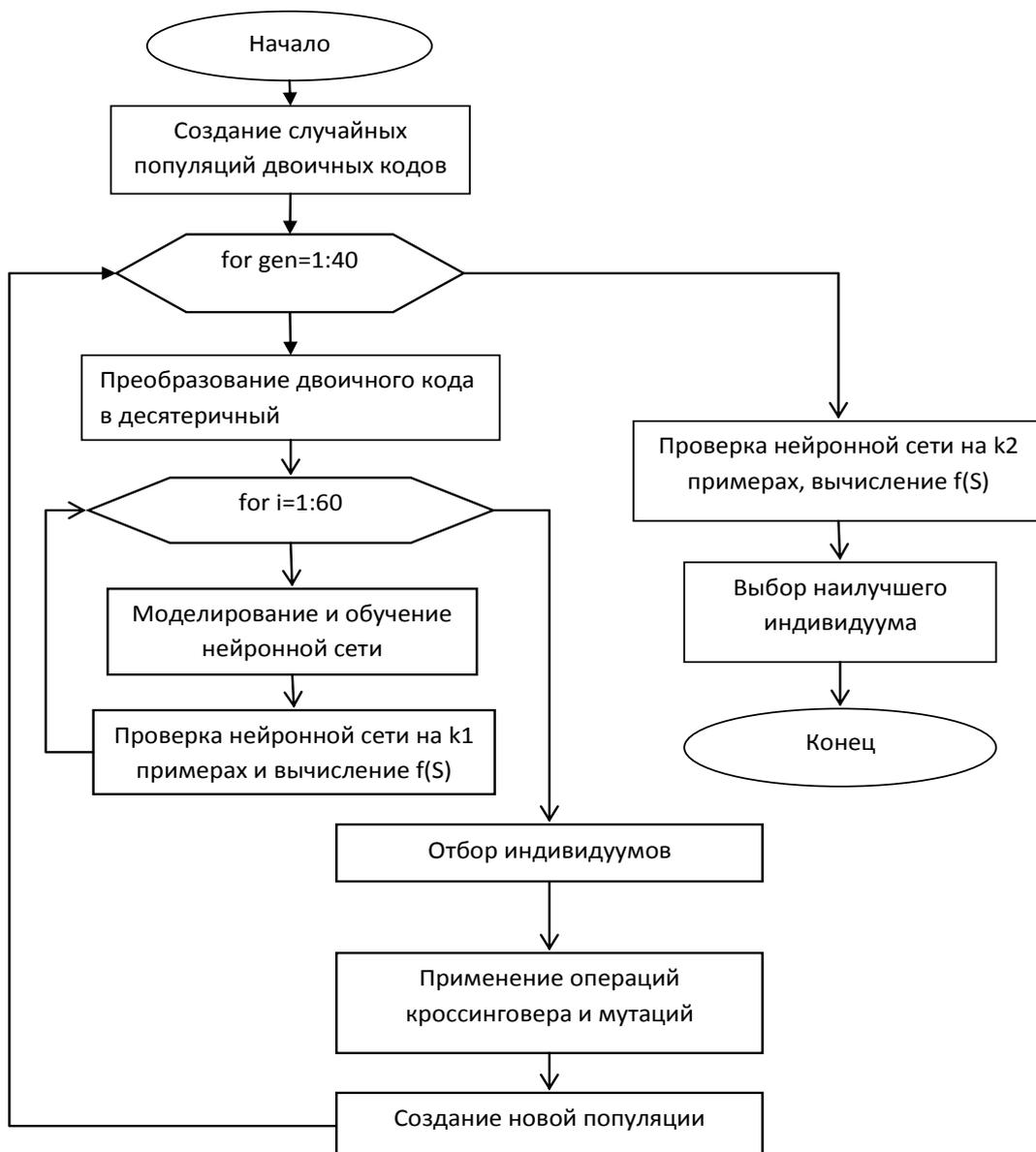


Рис. 8. Выбор оптимальной архитектуры нейронной сети на основе генетических алгоритмов



Рис. 9. Изменения усредненного значения функции пригодности

Полученную случайную двоичную популяцию хромосом в десятиричную с помощью кода Грея. На основе значений из 60 десятиричных хромосом смоделируем многослойные нейронные сети. Затем обучим нейронные сети на примерах, каждый пример состоит из 25 последовательных показаний датчиков давления, которые подаются на входной слой нейронной сети. Целевой выход нейронной сети будет соответствовать 1, если 25 последовательных показаний давления относятся к утечке, 0 – в противном случае.

Тестируемое множество k_1 необходимо выбрать таким образом, чтобы оно состояло из равных по количеству примеров, относящихся к событию «утечка» и не относящихся к такому событию. Такой выбор тестируемого множества позволяет отбирать такие архитектуры нейронной сети, которые в равной степени будут хорошо классифицировать утечку, если она произошла и не утечку, если утечки нет.

Для нахождения функции пригодности хромосомы используем функцию, обратно пропорциональную количеству ошибок. Функция пригодности выглядит следующим образом:

где $e(k, S)$ – функция ошибки.

Распишем функцию ошибки

где $Y(k, S)$ – выходное значение нейронной сети на k проверочном множестве при S структуре

нейронной сети. $Y_t(k)$ – тестовый выход при k проверочном множестве. $Y_t(k) = 1$, если проверочное множество данных k будет соответствовать утечке, в противном случае $Y_t(k) = 0$.

На основе вычисленных функций пригодности произведем отбор индивидуумов.

В качестве отбора будет использоваться метод «колеса рулетки» с элитным отбором. Это означает, что индивидуум с наилучшей функцией пригодности будет всегда оставаться в следующем поколении. Прошедшие отбор хромосомы в свою очередь будут скрещиваться по схеме многоточечного кроссинговера. После кроссинговера есть небольшая вероятность мутации хромосомы. Разновидностью мутации является инверсия, при которой участок хромосомы покидает свое место в цепи хромосомы и, развернувшись на 180° , вновь занимает прежнее положение [5].

На рис. 9 представлены изменения усредненного значения функции пригодности $f(S)$ при 40 итерациях. В результате после 40 итераций были найдены оптимальные архитектуры многослойной нейронной сети, преобладают 3-слойные нейронные сети с гиперболической тангенциальной функцией активации в первом скрытом слое и линейной функцией активации во втором и третьем скрытом слоях.

Полученные многослойные нейронные сети протестируем на втором тестовом множестве k_2 . Множество k_2 представляет собой большой набор данных, в основном состоящий из примеров, не относящихся к утечке, и небольшим количеством примеров, соответствующих утечке.

Такое множество больше соответствует действительности, так как в магистральном трубопроводе утечка является довольно редким событием. В результате вычислений функции пригодности получаем такую нейронную сеть, в которой функция пригодности равна 0,333. Она имеет три ошибки, а именно: на выходе нейронная сеть выдала – 1, которые соответствуют событию «закрытие отбора», т. е. окончание утечки. Нейронная сеть смогла распознавать не только начало утечки, но и окончание. Это нейронная сеть с 3 скрытыми слоями с гиперболической тангенциальной функцией активации в первом скрытом слое и линейной функцией активации во втором и третьем скрытом слоях. В первом скрытом слое она содержит 6 нейронов, во втором 32, а в третьем – 23.

Таким образом, разработанная система обнаружения утечек способна на основе показаний, получаемых с датчиков давления, и сигнала о возникновении утечки вычислить время ее начала и соответственно ΔP при условиях зашумленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты разработки системы автоматического определения утечки в условиях зашумленности, отличительной особенностью которой является обучение системы с применением нейронных сетей и генетических алгоритмов. В процессе обучения нейронная сеть обретает свойства цифрового фильтра, что позволяет фиксировать малые утечки в условиях зашумленности.

В совокупности с разработанным способом расчета местоположения утечки [2] система автоматического определения утечек представляет законченную модель для автоматического определения утечки и расчета ее местоположения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Трубопроводный** транспорт нефти: учебник в 2 т. М.: Недра, 2004. Т. 2. 621 с.
2. **Лютов А. Г., Булатов А. Ф.** Метод расчета местоположения утечки в магистральном трубопроводе на основе нейронных сетей // *Нейрокомпьютеры: разработка и применение*. 2013. № 3. С. 40-43.
3. **Кутуков С. Е.** Проблема повышения чувствительности, надежности и быстродействия систем обнаружения утечек в трубопроводе // *Нефтегазовое дело*. 2004. Т. 2. С. 29–45.
4. **Лурье М. В., Зверев Ф. С.** Метод зональной локации для обнаружения утечек из трубопровода // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2012. № 1. С. 48–51.
5. **Васильев В. И., Ильясов Б. Г.** Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учеб. пособие. М.: Радиотехника, 2009. 392 с.

ОБ АВТОРАХ

БУЛАТОВ Артур Фларитович, асп. каф. автоматизации технол. процессов. Дипл. инж. по автоматиз. технол. процессов (УГАТУ, 2010). Готовит дисс. о моделях и алгоритмах оперативной диагностики управляемых технол. процессов в условиях неопределенности.

ЛЮТОВ Алексей Германович, проф., зав. каф. автоматизации технол. процессов. Дипл. инж.-электроник (УАИ, 1985). Д-р техн. наук по сист. анализу, упр. и обр. информации (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. автоматизац. и упр. сложн. технол. и произв. процессами.

METADATA

Title: The automated system of detection of leak the pipeline in the conditions of noise.

Authors: A. F. Bulatov, A. G. Lutov.

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: general-artur@mail.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 17, no. 5 (58), pp. 86-92, 2013. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Within specialized systems of detection of leaks there is a set of ways to elicit the fact about existence of leak and to estimate its size. The method of detection of leaks with use of the neural networks, allowing revealing small leaks in the conditions of noise is described. Realization of the described method with use of genetic algorithm is considered.

Key words: leaking, neural networks, genetic algorithm, noisiness.

References (English transliteration):

1. Pipeline transport of oil: the textbook in 2 vols. Moscow: Nedra, 2004. Vol. 2.
2. A. G. Lutov and A. F. Bulatov, "The method for calculating position leak into the pipeline based on neural networks," *Neurocomputers: development and application*, no. 3, pp. 40-43, 2013.
3. S. E. Kutukov, "Improvement in pipeline leak detection system's responsiveness, robustness and rapidity," *Oil and Gas Business*, vol. 2, pp. 29-45, 2004.
4. M. V. Lurie and F. S. Zverev, "Method of zonal location to detect oil leaks," *Science and technologies oil and oil products pipeline transportation*, no. 1, pp. 48-51, 2012.
5. V. I. Vasilev and B. G. Iliasov, *Intellectual control systems. Theory and practice: study letter*. Moscow: Radiotekhnika, 2009.

About authors:

БУЛАТОВ Артур Фларитович, post-graduate student of Dept. of Automation of technological processes, Dipl. engineer of automation of technological processes (USATU, 2010).

ЛЮТОВ Alexey Germanovich, Prof. Head of Dept. of Automation of technological processes, Dipl. electronics engineer (USATU, 1985). Dr. of thec. Sci. (USATU, 2005).