

# Обеспечение диагностируемости технологического процесса минимальным числом датчиков на основе энтропийного критерия

В. В. Куркина<sup>1</sup>, М. С. Сиринова<sup>2</sup>, Д. А. Александров<sup>3</sup>

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

<sup>1</sup>victoria.kurkina@gmail.com, <sup>2</sup>martusitsa@yandex.ru, <sup>3</sup>dengrimzz@gmail.com

**Аннотация.** При разработке сенсорной сети, определяющей число и положение датчиков при автоматизации технологического процесса, очень важно обеспечить возможность эффективной диагностики процесса и в то же время уменьшить затраты на измерительную аппаратуру. Для решения этой проблемы предлагается использовать энтропийный критерий. Для этого проводится анализ и выявляются возможные нарушения, которые могут возникнуть на процессе. Далее рассматриваются изменения энтропии при возникновении нарушения и подключении каждого из возможных потенциальных датчиков. Выбираются те датчики, которые обеспечивают наибольшее уменьшение энтропии (увеличение информации).

**Ключевые слова:** диагностика технологических процессов, сенсорная сеть, энтропия, информационное обеспечение систем автоматизации

## I. ВВЕДЕНИЕ

Сложные производственные процессы требуют значительных финансовых вложений в датчики и аппаратуру автоматизации для мониторинга и контроля процесса, что позволяет в принципе гарантировать качество продукции, нормальную работу оборудования и безопасность операторов. Для этого очень важно обнаруживать нарушения в ходе процесса на ранних стадиях их развития, чтобы было время оператору принять меры по недопущению их развития и перехода в аварийную ситуацию, которая приведет к срабатыванию систем защиты, а значит существенным материальным потерям.

Обычно считается, что для обеспечения эффективного мониторинга состояния процесса чем больше датчиков на нем установлено, тем более качественно отслеживается текущее состояние технологического процесса, тем увереннее обнаруживаются нарушения. Однако вызванный этим рост капиталовложений, связанных со стоимостью самих датчиков и работами по их установке и обслуживанию, накладывают существенные ограничения на их число.

Отсюда возникает проблема нахождения некоторого оптимального (минимального) числа датчиков, обеспечивающего необходимую наблюдаемость процесса, легкость выявления возникающих на процессе нарушений, т. е. эффективность мониторинга и диагностики контролируемого процесса.

Несмотря на важность этой проблемы, обзор литературных источников показал, что в подавляющей части работ по обнаружению и диагностике нарушений на процессе, основное внимание уделяется разработке процедур для выполнения его мониторинга и диагностики, принимая имеющийся на процессе набор датчиков как данность, не пытаясь оценить его оптимальность [1, 2]. Очень мало внимания уделяется определению оптимального числа датчиков, их локализации, т. е. созданию эффективной сенсорной сети на процессе, обеспечивающей уверенное выявление нарушений и их идентификацию (определение причин, их вызвавших). При этом эффективной может считаться сеть, обеспечивающая высокую надежность работы системы, низкие затраты на аппаратуру сети, эффективную диагностируемость состояния процесса и аппаратуры автоматизации или высокую степень достоверности метрологической информации [3–6].

## II. КРИТЕРИИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

Для решения проблемы синтеза оптимальной сенсорной сети разработано несколько подходов. Наиболее часто в том относительно небольшом количестве работ, посвященных рассматриваемой проблеме, используется метод построения сенсорной сети, обеспечивающий уверенную диагностируемость нарушений на процессе, основанный на сигнальных направленных графах [7,8]. Т.к. получаемая при этом сеть не оптимальна в смысле минимума количества датчиков, то далее требуется оптимизация (минимизация) полученной сети тем или иным методом, например, с использованием генетических алгоритмов.

Другим методом, используемым для решения поставленной проблемы, является метод, основанный на оценках количества информации, связанной с установкой того или иного датчика. Количество информации оценивается по вычисляемому для каждого возможного датчика-кандидата изменению энтропии. Такому подходу в литературе уделено мало внимания. Поэтому в данной статье рассматриваются возможности энтропийного подхода к построению сенсорной сети.

### A. Энтропийный критерий

Информационная двоичная энтропия  $E$ , определяющая количество информации в сообщении в битах, при

отсутствии информационных потерь, рассчитывается по формуле Хартли, определяющей количество информации, которое содержится в сообщении:

$$E = K \log N$$

где  $N$  – мощность алфавита,  $K$  – число символов в алфавите (здесь и далее  $\log$  – логарифмы по основанию 2).

Для независимых случайных событий  $x_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) с вероятностями возможных состояний  $p_i$ , формула Хартли переходит в формулу Шеннона:

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i$$

Эта величина также называется средней энтропией сообщения. Если  $i=1$ , то получаем частную энтропию, характеризующую только  $i$ -ое состояние:

$$H(x_i) = -p_i \log_2 p_i$$

Получение информации в контексте диагностики можно рассматривать как измерение значения некоторой переменной процесса при возникновении нарушений. Очевидно, что информационный выигрыш при подключении того или иного датчика можно оценить, как разницу между максимальным значением энтропии ( $H_{max}$ ) и значение энтропии ( $H(C/d_j)$ ) для переменной  $d_j$ , т. е. при измерении этой переменной соответствующим датчиком.

Максимуму энтропии действительно соответствует случай, когда элемент имеет одинаковую вероятность принадлежности к любому классу, т.е. не реагирует ни на какое нарушение или одинаково реагирует на все известные нарушения на процессе ( $P_i = 1/K \rightarrow H_{max} = \log K$ ; где  $K$  – количество нарушений). Тогда энтропия интерпретируется как классификационная ошибка элемента. Информационный прирост в таком случае можно рассматривать как инверсию энтропии, то есть максимальная энтропия соответствует минимуму информации (максимуму общей неопределенности), и чем меньше энтропия, тем больше будет информации [9].

$$I_G = H_{max} - H(C|d_i) \quad (1)$$

где  $I_G \geq 0$ ,  $H_{max} = \log K$ ,  $H(C/d_j) = - \sum_{k=1}^K p_k \log p_k$  и  $p_k$  – вероятность того, что переменная  $d_j$  реагирует на возникновение нарушения  $C_k$  (рис. 1).

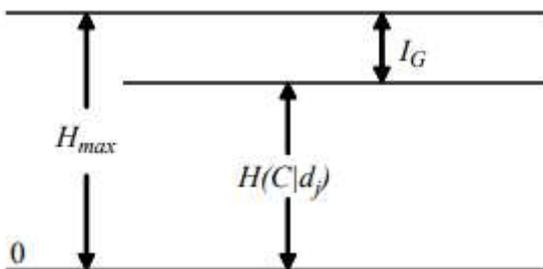


Рис. 1. Взаимосвязь информационного прироста и энтропии

Относительный прирост информации можно также определить как:

$$I_{Gr} = I_G / H_{max} \quad (2)$$

Роль соответствующей переменной и связанного с ней датчика, состоит в том, чтобы максимизировать выигрыш в приросте информации и, таким образом, получить существенный вклад в обнаружение нарушения.

### В. Методика выбора датчиков

Прежде всего, необходимо проанализировать технологический процесс и выявить все возможные нарушения. Существует несколько методик анализа процесса и все они связаны с организацией экспертных групп. Можно, в частности, рекомендовать стандартизованную в России методику HAZOP (Hazardous and operability) [10].

Далее определяются для всех переменных, а значит возможных датчиков-кандидатов, пары их значений при нормальном протекании процесса и при возникновении нарушения и составляется таблица (таблица 1). В таблице показано представление каждой пары классов, где  $A_{kj}$  указывает значение датчика  $j$  при возникновении нарушения  $k$ . Число строк в таблице определяется числом нарушений, а число столбцов – количеством переменных. Для приведения к безразмерному виду и к единичной сумме по столбцам введем нормирование, поделим каждый элемент  $D_{ij}$  на их сумму в столбце:

$$\tilde{D}_{kj} = d_{kj} / \sum_{k=1}^2 D_{kj}$$

ТАБЛИЦА 1 ОПИСАНИЕ ПАР «НОРМА-НАРУШЕНИЕ» ЗНАЧЕНИЙ ПЕРЕМЕННЫХ

Нарушение	Переменная 1	Переменная 2	.....	Переменная K
Норма	$D_{11}$	$D_{12}$	...	$D_{1K}$
Нарушение j	$D_{j1}$	$D_{j2}$	...	$D_{jK}$

Если датчик  $d_j$  имеет такое же значение при нормальном состоянии процесса и при нарушении (то есть нет изменений в значении переменной при возникновении  $k$ -того нарушения), то тогда, нормированное его значение будет иметь значение 0,5, что означает, что оно будет соответствовать максимальному значению энтропии ( $\log 2$ ) (рис. 4) и обеспечит нулевой прирост информации.

С другой стороны, если данная переменная имеет очень разные значения для нормального класса и класса нарушения (кроме 0 или 1), это даст значение минимальной энтропии и, таким образом, это будет соответствовать максимальному значению полученной информации. Это означает, что с этим датчиком может наблюдаться нарушение.

Энтропия рассчитывается для каждого дескриптора следующим образом для каждого из нарушений:

$$H(\tilde{D}_j) = - \sum_{k=1}^2 \tilde{D}_{kj} \log \tilde{D}_{kj}$$

Изменение информации также рассчитывается для каждого датчика по формуле (1).

Наиболее подходящим датчиком для данного нарушения будет тот, который обеспечит наибольшее относительное увеличение информации по (2). Эта процедура повторяется для всех пар «нормальный процесс – нарушение». Преимущество этой процедуры состоит в том, что наиболее подходящие переменные (и, соответственно, датчики) для каждого нарушения могут быть получены напрямую, поскольку анализ каждой пары выполняется независимо и последующей оптимизации не требуется.

### С. Экспериментальная проверка метода.

Для проверки энтропийного метода был выбран процесс получения олефинов. Выбор этого процесса определялся еще и тем, что по нему были известны возможные нарушения и их параметры [11]. Поэтому анализ процесса проводить не требовалось.

Установка состоит из трех основных производственных блоков:

- блок Предфракционирования, предназначенный для разделения сырьевой широкой фракции нормальных парафинов на узкие фракции;
- блок Пакол, в реакторе которого происходит превращение нормальных парафинов до соответствующих моноолефинов;
- блок Дифайн, реактор которого предназначен для избирательного превращения диолефинов – побочных продуктов реактора блока Пакол – в моноолефины.

Для оценки работоспособности метода было рассмотрено информационное обеспечение колонны С-201 блока Предфракционирование (рис. 2). В настоящее время схема автоматизации колонны включает 18 датчиков, из которых 8 входят в контуры регулирования и, таким образом, являются обязательными с технологической точки зрения.

Из возможных нарушений на процессе были рассмотрены три нештатные ситуации [11]:

- нарушение температурного режима колонны С-201 (5 возможных причин);
- нарушение подачи орошения колонны (3 возможных причины);
- повышение давления в колонне (2 возможных причины).

Расчеты относительных приростов информации, при наличии рассмотренных 10 возможных нарушений режима колонны С-201, показали, что из 10 установленных на процессе датчиков и не задействованных в контурах управления, 4 датчика, в принципе, могут быть исключены из существующей на процессе сенсорной сети, т.к. не улучшают наблюдаемость процесса.

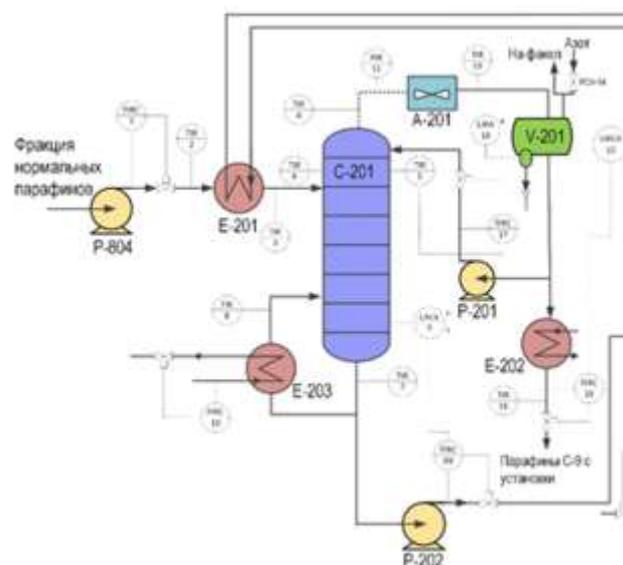


Рис. 2. Схема автоматизации колонны С-201

### III. ВЫВОДЫ

Рассмотренный в статье метод отбора датчиков при построении сенсорной сети заключается в сравнении энтропий, связанных с данным датчиком, при нормальной работе процесса и при возникновении нарушения. По разности этих значений определяется значимость датчика для диагностики нарушений.

Метод требует проведения предварительного анализа технологического процесса с целью выявления возможных нарушений. При этом определяются регламентные значения переменных процесса и их значения при возникновении нарушений. По этим данным и определяется изменение энтропии (прирост информации) при включении того или иного датчика. В сенсорную сеть включаются датчики, обеспечивающие наибольший прирост информации. Таким образом, строится минимальная сенсорная сеть и не требуется ее дальнейшая оптимизация.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Aldrich Ch. Unsupervised Process Monitoring and Fault Diagnosis with Machine Learning Methods / Ch. Aldrich, L. Auret - London: Springer-Verlag, 2013. 388 p.
- [2] Русинов Л.А. Методы и системы мониторинга и диагностики нарушений в технологических процессах производства химических наноматериалов/ Учебное пособие. / Л.А. Русинов, В.В.Куркина. СПб: Изд. СПбГТИ(ТУ), 2012. 48 с.
- [3] Lambert H.E. Fault trees for locating sensors in process systems / H.E.Lambert // Chem Eng Prog, 1977. 81.
- [4] Ali Y. Sensor network design for maximizing reliability of linear processes / Y.Ali, S.Narasimhan // AIChE J., 1993. V.39. No.5. P. 820–828.
- [5] Duan R. Optimal sensor placement based on system reliability criterion under epistemic uncertainty / R.Duan, Y.Lin, T.Feng // IEEE Access, 2018. V.6. P.57061-57073. doi:10.1109/ACCESS.2018.2873420
- [6] Jung D. Sensor selection for fault diagnosis in uncertain systems / D.Jung, Y.Dong, E.Frisk, M.Krysanter, G.Biswas // International journal of control, 2020. V.93. No.3. P.629–639. doi.org/10.1080/00207179.2018.1484171

- [7] Raghuraj, R. Location of sensors in complex chemical plants based on fault diagnostic observability criteria / R.Raghuraj, M.Bhushan, R.Rengaswamy // *AIChE J.*, 1999. V. 45. No2. P. 310–322.
- [8] Kolliri, S. Sensor Network Design for Efficient Fault Diagnosis and Signed Digraph Update / S. Kolluri, I. Bajaj, M. Bhushan // 10th IFAC International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems - December 18-20, 2013. Mumbai, India.
- [9] Orantes, A. Classification as an aid tool for the selection of sensors used for fault detection and isolation / A. Orantes, T. Kempowsky, M.-V. Le Lann // *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2006, V.28. No.5. P.457–479.
- [10] Симакин В.В. Применение методов анализа опасностей HAZID и HAZOP при проектировании газотранспортного терминала / В.В.Симакин, М.В. Лисанов, А.И. 158 Макушенко и др. // *Безопасность труда в промышленности*, 2008. N.8. URL: <http://www.safety.ru/sites/default/files/HAZOP1.pdf> (дата обращения 18.06.2021)
- [11] Осипенко У.Ю. Управление процессом получения олефинов в нештатных ситуациях: дис. ... канд. техн. наук / СПб: СПбГТИ(ТУ), 2021. – 200 с. URL: <https://etu.ru/assets/files/nauka/dissertacii/2021/osipenko/dissertaciya-osipenko.pdf>