

Е. С. Кирик, Х.-Ю. Ян, В. Шроер

(Красноярск, Россия – Ульм, Германия)

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ СНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СТЕКЕ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ*

Рассматривается метод идентификации факта падения напряжения в стеке топливных элементов и диагностики его причин. Предлагаемый метод позволяет фиксировать событие в кратчайшие сроки после его наступления. С использованием определенного набора наблюдений переменных процесса строится процедура классификации причин падения напряжения: высыхание мембраны со стороны катода, высыхание мембраны со стороны анода, кислородное голодание, высокая концентрация CO.

Введение. В процессе функционирования стека топливных элементов (ТЭ) различные причины могут вызывать падение напряжения. Снижение напряжения до критических значений приводит к выходу из строя стека. В связи с этим возникают следующие задачи:

- определение факта падения напряжения в кратчайшие сроки (прежде чем оно станет критическим);
- определение причины падения напряжения (с целью дальнейшего устранения).

Выделим основные причины, вызывающие падение напряжения (рассматривается система, состоящая из стека топливных элементов с протонообменной мембраной, который использует в качестве топлива водород, поступающий из реформера натурального газа [1]):

1. Высыхание мембраны со стороны катода (DMC).
2. Высыхание мембраны со стороны анода (DMA).
3. Кислородное голодание (AirStarv).
4. Высокая концентрация CO (HighCO).
5. Топливное голодание.

Природа поставленной задачи такова, что ее решение во многом опирается на информацию, которую можно получить только непосредственно с объекта наблюдения – стека топливного элемента. Такой информацией служат наблюдения измеряемых переменных процесса. Причем исходя из коммерческих соображений стоимость измерительной процедуры должна быть

* Работа частично поддержана DAAD совместно с Министерством образования и науки РФ по программе «Михаил Ломоносов» (грант № 325).

как можно ниже. К «дешевым» переменным процесса относятся: напряжение (U), ток (I), относительная влажность воздуха (rh_air), относительная влажность газа на выходе из реформера (rh_ref), интенсивность потока воздуха на катоде (np_air) и интенсивность потока воздуха на стадии очистки газа после реформинга ($yair_PROX$) (эта переменная отражает концентрацию CO в газе после реформинга).

Принимая во внимание физическую суть указанных переменных, можно видеть, что их поведение несет информацию о возникновении той или иной причины падения напряжения:

- 1) rh_air – высыхание мембраны со стороны катода;
- 2) rh_ref – высыхание мембраны со стороны анода;
- 3) np_air – кислородное голодание;
- 4) $yair_PROX$ – высокая концентрация CO.

В дальнейшем будем называть эти переменные вспомогательными.

К сожалению, в настоящее время подходящих переменных для определения топливного голодания не обнаружено.

Для определения режимов запуска и остановки стека ТЭ (и сопровождающих их изменений напряжения) достаточно наблюдений тока I . В то же время в установившемся режиме степень влияния каждой из причин на напряжение определяется конкретными операционными условиями. Однако переменных rh_air , rh_ref , np_air , $yair_PROX$, I для полного описания процесса недостаточно. Поэтому, опираясь только на текущие значения вспомогательных переменных, факт падения напряжения установить невозможно.

В этом случае единственный способ решить задачу состоит в одновременном наблюдении всех переменных: U , I , rh_air , rh_ref , np_air , $yair_PROX$. Индикатором наступления события служит изменение напряжения. Тогда в первую очередь проверке подлежит ток. Если изменение напряжения не связано с током, то причина определяется путем исследования поведения соответствующих переменных: rh_air , rh_ref , np_air , $yair_PROX$.

Таким образом, принимая во внимание вышеизложенное, во время функционирования стека ТЭ невозможно предсказать факт падения напряжения и, следовательно, избежать его вовсе. Поэтому задача сводится к наискорейшему установлению наступления события и последующему определению его причины: DMC, DMA, AirStarv или HighCO (схематично задача представлена на рис. 1). Согласно проведенному обзору литературы такая постановка задачи и полученное решение являются новыми.



Рис. 1. Модель системы классификации

Постановка задачи. Пусть имеется набор измерений процесса $X_T = \{x^i(t)\}_{t=0}^T$, $i = \overline{1, 6}$, где $x^1(t)$ – измерения переменной $\overline{\text{rh_air}}$ в момент времени t (в данном контексте время является эквивалентом номеру наблюдения); $x^2(t) - \overline{\text{rh_ref}}$; $x^3(t) - \overline{\text{nr_air}}$; $x^4(t) - \overline{\text{yair_PROX}}$; $x^5(t) - I$; $x^6(t) - U$. Пусть $X_T^i = \{x^i(t), x^5(t), x^6(t)\}_{t=0}^T$, $i = \overline{1, 4}$; $\text{In}^1(T)$ – индикатор для причины DMC в момент времени T ; $\text{In}^2(T)$ – индикатор для причины DMA; $\text{In}^3(T)$ – индикатор для причины AirStarv; $\text{In}^4(T)$ – индикатор для причины HighCO. Индикатор $\text{In}^i(T)$ определен на дискретном множестве $\{-1, 0, 1\}$, $i = \overline{1, 4}$, и принимает значение -1 , 1 или 0 , если напряжение падает, растет или остается неизменным соответственно.

Задача состоит в том, чтобы множеству наблюдений X_T^i поставить в соответствие значение индикатора $\text{In}^i(T) \in \{-1, 0, 1\}$, $i = \overline{1, 4}$.

Решение. Основные формулы. Для решения задачи необходимо опираться на некоторую вычисляемую на основе измеряемых наблюдений статистику. Учитывая указанные особенности задачи, такая статистика должна отражать поведение рассматриваемых переменных процесса на качественном уровне: показывать участки постоянных значений и участки изменения значений. В то же время абсолютные значения переменных, вообще говоря, не представляют интереса. Такими свойствами обладает численная оценка производной для каждой переменной $x^i(t)$, $i = \overline{1, 6}$:

$$L^i(T) = \frac{\hat{x}^i(T) - \hat{x}^i(T - \Delta t^i)}{\Delta t^i}, \quad (1)$$

где Δt^i – временная задержка (вопрос о выборе Δt^i рассматривается далее), а $\hat{x}^i(t)$ – сглаженное значение $x^i(t)$.

Проблема сглаживания в (1) возникает ввиду осциллирующего поведения переменных $x^i(t)$, $i = \overline{1, 6}$. Преобладающей причиной такого поведения для первых пяти переменных ($\overline{\text{rh_air}}$, $\overline{\text{rh_ref}}$, $\overline{\text{nr_air}}$, $\overline{\text{yair_PROX}}$, I) является ограниченная разрешающая способность измерительных приборов. Осцилляция измерений напряжения ($x^6(t)$) объясняется преимущественно физической природой этой переменной – конкретные значения напряжения в стеке ТЭ определяются совокупностью многих факторов. Кроме того, отдельные ячейки в стеке могут иметь ярко выраженное специфическое поведение в определенных операционных условиях, что сказывается на суммарном напряжении стека. Не ставя своей целью изложение конкретных деталей сглаживания, отметим, что одним из удобных методов является непараметрическое сглаживание – оценка регрессии Надарая – Ватсона [2, 3]. При необходимости можно применить дополнительную процедуру сглаживания к статистике (1):

$$\tilde{L}^i(T) = \frac{1}{k^i} \sum_{j=T-k^i+1}^T L^i(j).$$

Тем не менее характер осцилляций переменных таков, что слабая изменчивость статистики (1) неизбежна. В связи с этим требуется введение допусти-

мых пределов $[-\Delta L^i, \Delta L^i]$, $i = \overline{1, 6}$, т. е. считается, что если $L^i(T) \in [-\Delta L^i, \Delta L^i]$, то переменная x^i в момент времени T не претерпела существенных изменений.

Для создания алгоритма классификации необходимо принимать во внимание физическую природу связи напряжения U и переменных rh_air , rh_ref , pr_air , $yair_PROX$:

– напряжение меняется под действием какой-либо причины, выраженным в изменении одной или нескольких вспомогательных переменных (при определенных операционных условиях изменение вспомогательной(ых) переменной(ых) может и не влиять на напряжение);

– при всех прочих равных условиях напряжение не восстанавливается до тех пор, пока причина его изменения не устранена;

– обычно скорость изменения напряжения ниже, чем скорость изменения вспомогательных переменных;

– существуют задержки реакции напряжения на изменение соответствующих переменных, величина задержек $\Delta \tau^i \geq 0$, $i = \overline{1, 4}$, зависит от переменных и определенных операционных условий.

С учетом вышеизложенного задача отображения набора наблюдений X_T^i в значение индикатора $In^i(T) \in \{-1, 0, 1\}$, $i = \overline{1, 4}$, в момент времени T представляется следующим образом:

$$In^i(T) = \Psi[\Theta(L^5(T)) \hat{z}(L^i(T - \Delta \tau^i), L^6(T)), \Theta(L^5(T)) \times \\ \times \tilde{z}(In^i(T - 1), L^6(T))], \quad i = \overline{1, 4}, \quad (2)$$

где

$$\Psi[v, \mu] = \begin{cases} 1, & \text{если } (v=1, \mu=0), \text{ или } (v=1, \mu=1), \text{ или } (v=0, \mu=1); \\ -1, & \text{если } (v=-1, \mu=0), \text{ или } (v=-1, \mu=-1), \text{ или } (v=0, \mu=-1); \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (3)$$

$$\Theta(L^5(T)) = \begin{cases} 1, & \text{если } L^5(T) \in [-\Delta L^5, \Delta L^5]; \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (4)$$

$$\hat{z}(L^i(T - \Delta \tau^i), L^6(T)) = \begin{cases} 1, & \text{если } L^i(T - \Delta \tau^i) > \Delta L^i, L^6(T) > \Delta L^6; \\ -1, & \text{если } L^i(T - \Delta \tau^i) < -\Delta L^i, L^6(T) < -\Delta L^6; \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (5)$$

$$\tilde{z}(In^i(T - 1), L^6(T)) = \begin{cases} 1, & \text{если } In^i(T - 1) = 1, L^6(T) > \Delta L^6; \\ -1, & \text{если } In^i(T - 1) = -1, L^6(T) < -\Delta L^6; \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases} \quad (6)$$

Здесь Ψ – функция двух аргументов. Рассмотрим первый аргумент. Первоначально посредством функции Θ проверяется ток. Напомним, что наибольшее

влияние на напряжение оказывает изменение тока. В этом случае изменение всех остальных переменных практически не сказывается на напряжении. Если $\Theta = 1$, тогда функция \hat{z} «исследует» поведение переменных rh_air , rh_ref , pr_air , $yair_PROX$ и напряжения. Если наблюдается одновременное падение напряжения и одной из вспомогательных переменных, тогда $In^i(T) = -1$; при одновременном росте значений $In^i(T) = 1$; во всех остальных случаях $In^i(T) = 0$. Вторым аргументом функции Ψ обусловлен тем, что скорость реакции напряжения и скорость изменения какой-либо вспомогательной переменной могут быть различными, а также временными задержками $\Delta\tau^i$. Эти два факта выражаются в том, что первый аргумент в какой-то момент становится равным нулю. В этом случае основную роль начинает играть второй аргумент функции Ψ , продолжая процесс «наблюдения» за напряжением. Если напряжение продолжает «движение» в начатом направлении, тогда $In^i(T) = -1$ или $In^i(T) = 1$. Если изменение напряжения прекратилось, тогда $In^i(T)$ становится равным нулю.

Выбор $\Delta\tau^i$. Для вычисления индикатора (2) необходимо знать величину задержки $\Delta\tau^i$ для каждой из четырех рассматриваемых причин. Величина $\Delta\tau^i$ определяется причиной изменения напряжения и конкретными операционными условиями, поэтому в данной постановке определение конкретных значений $\Delta\tau^i$, $i = \overline{1, 4}$, не представляется возможным.

Но проблема неизвестных значений $\Delta\tau^i$, $i = \overline{1, 4}$, может быть решена программными средствами. Оператор “while” или специальные счетчики позволяют вычислить значение индикатора (2) в момент времени T без использования конкретного значения $\Delta\tau^i$, $i = \overline{1, 4}$.

Выбор $\Delta t^i = 1$. В отсутствие осцилляций переменных $x^i(t)$, $i = \overline{1, 6}$, можно ограничиться значением Δt^i , $i = \overline{1, 6}$. Но в данном случае выбор величины Δt^i для вычисления статистики (1) является дополнительной процедурой сглаживания, поэтому $\Delta t^i > 1$, $i = \overline{1, 6}$. В то же время заданием конкретных значений должны сохраниться информативные качества статистики (1). Используемый метод сглаживания переменных $x^i(t)$, $i = \overline{1, 6}$, также оказывает влияние. Пусть N^i измерений переменной $x^i(t)$ участвует в вычислении $\hat{x}^i(T - \Delta t^i)$, тогда $\Delta t^i > N^i / 2$.

Для нахождения конкретных значений Δt^i , $i = \overline{1, 6}$, можно использовать какую-либо процедуру оптимизации или задать вручную при соответствующем предварительном исследовании поведения переменных.

Ограничения. Предлагаемый метод содержит ряд ограничений вследствие вычислительных особенностей. Введем обозначения: dt^i , $i = \overline{1, 4}$, – время, в течение которого одна из вспомогательных переменных изменяется (падает или/и растет) вплоть до достижения следующего установившегося значения; $dt^{6(i)}$ – аналогичное время для напряжения при возникновении одной из причин; T^* и $T^* - \Delta\tau^i$ – моменты времени, когда напряжение и i -я вспомогательная переменная начинают меняться соответственно; $T^* + \Delta T^{*i}$ – время, когда \hat{z} впервые «обнаруживает» изменение напряжения вследствие i -й при-

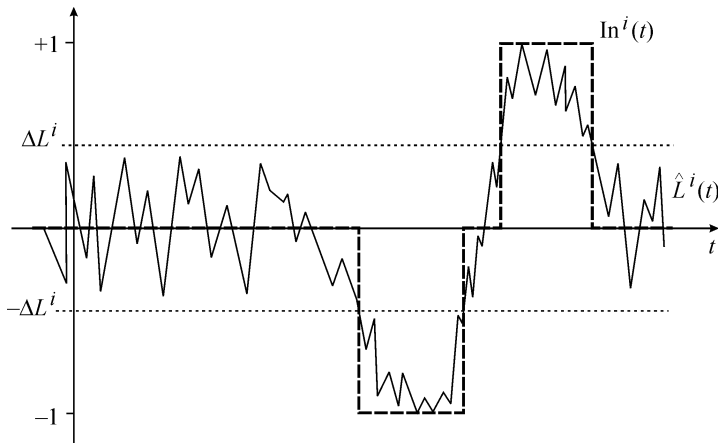


Рис. 2. Запаздывание реакции функции \hat{z} и индикатора

чины, $i = \overline{1, 4}$. Напомним, что были введены допустимые пределы $[-\Delta L^i, \Delta L^i]$, $i = \overline{1, 6}$, вариативности статистики (1) для каждой из переменных. Как следствие, функция \hat{z} «замечает» начало изменения переменных $x^i(t)$, $i = \overline{1, 6}$, позднее, чем это происходит в действительности (рис. 2). С учетом введенных обозначений ограничения формулируются следующим образом.

1. Индикатор (2) замечает изменение напряжения с задержкой ΔT^{*i} , $\Delta T^{*i} \ll dt^{6(i)}$.

2. Если $dt^i \geq \Delta\tau^i + \Delta T^{*i}$, $i = \overline{1, 4}$, тогда $T^* - \Delta\tau^i + dt^i \geq T^* + \Delta T^{*i}$, $i = \overline{1, 4}$, (рис. 3, *a*). В этом случае изменению напряжения возможно поставить в соответствие изменение одной из вспомогательных переменных. Если $dt^i < \Delta\tau^i + \Delta T^{*i}$ (как правило, такие случаи возникают при кратковременных и незначительных по величине изменениях вспомогательных переменных), тогда причина изменения напряжения не может быть установлена (рис. 3, *b*). Но, как показывает практика, обычно реакция напряжения на такие возмущения весьма незначительна. В то же время в случае существенного изменения напряжения условие $dt^i \geq \Delta\tau^i + \Delta T^{*i}$ выполняется.

3. Первое значение индикатора (2) может быть вычислено только при наличии первых $s = \max\{\Delta t^i + N^i/2, \Delta t^6 + N^6/2\}$, $i = \overline{1, 5}$, наблюдений процесса.

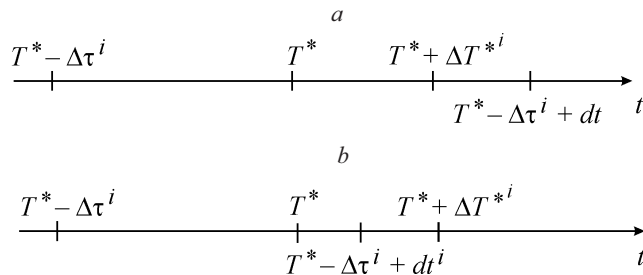


Рис. 3. Временная карта событий при изменении напряжения

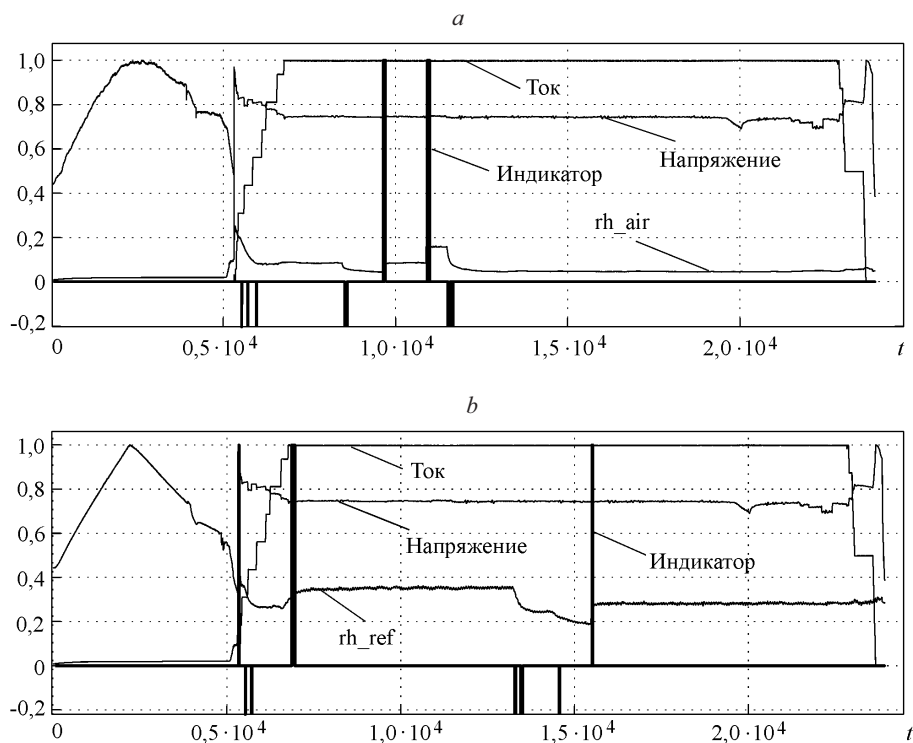


Рис. 4. Данные одного эксперимента и вычисленные индикаторы для двух причин падения напряжения: DMC (\ln^1) (a) и DMA (\ln^2) (b)

4. Для нахождения конкретных значений параметров Δt^i , $-\Delta L^i$, ΔL^i , N^i , k^i , $i = \overline{1,6}$, необходимы предварительные наблюдения нескольких законченных экспериментов. На основе этих наблюдений значения параметров определяются либо вручную, либо с применением какой-либо процедуры оптимизации.

5. Предложенный метод не позволяет обнаруживать слабые тренды переменных, поскольку в этом случае статистика (1) для таких переменных не выходит за допустимые пределы $[-\Delta L^i, \Delta L^i]$.

Приложение к экспериментальным данным. Алгоритм классификации апробирован на экспериментальных данных, которые были получены с помощью демонстрационной установки, состоящей из реформера природного газа и собственно стека топливных элементов, перерабатывающего поступающий с реформера водород. Установка мощностью 5 кВт разработана в Центре исследования солнечной энергии и водорода (г. Ульм, Германия). Подсистема реформинга газа – во Франхоферовском институте солнечных систем (г. Фрайбург, Германия).

Экспериментальные данные содержат примеры падения напряжения при различных операционных условиях стека ТЭ и вызванного каждой из четырех рассмотренных причин: высыханием мембраны со стороны катода, высыханием мембраны со стороны анода, кислородным голоданием, высокой концентрацией CO.

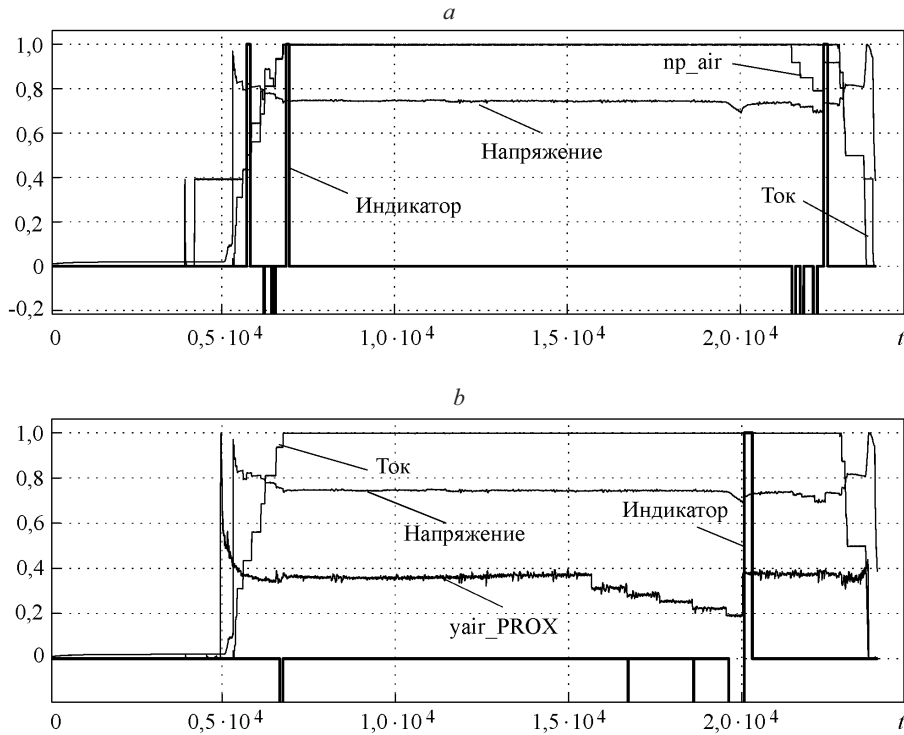


Рис. 5. Данные одного эксперимента и вычисленные индикаторы для двух причин падения напряжения: AirStarv (In^3) (a) и HighCO (In^4) (b)

Для нахождения неизвестных параметров Δt^i , $-\Delta L^i$, ΔL^i , N^i , k^i , $i = \overline{1,6}$, было достаточно предварительной информации (наблюдения пяти различных экспериментов). Приняты следующие значения:

$$\Delta t^i = 40, i = \overline{1,6};$$

$$\pm \Delta L^1 = \pm 2,1 \cdot 10^{-2}; \quad \pm \Delta L^2 = \pm 2,0 \cdot 10^{-2}; \quad \pm \Delta L^3 = \pm 5,5 \cdot 10^{-6};$$

$$\pm \Delta L^4 = \pm 2,0 \cdot 10^{-5}; \quad \pm \Delta L^5 = \pm 5,0 \cdot 10^{-4}; \quad \pm \Delta L^6 = \pm 6,0 \cdot 10^{-4};$$

$$N^1/2 = N^2/2 = N^3/2 = N^4/2 = N^6/2 = 20; \quad N^5/2 = 15;$$

$$k^1 = k^2 = k^3 = k^4 = k^6 = 15; \quad k^5 = 10.$$

Рассмотрим в деталях результаты идентификации фактов падения напряжения и классификации причин для одного эксперимента (рис. 4, 5). В этом эксперименте напряжение в значительной степени было подвержено влиянию двух причин: AirStarv (рис. 5, a, промежуток времени $[2,23 \cdot 10^4, 2,35 \cdot 10^4]$) и HighCO (рис. 5, b, промежуток времени $[1,85 \cdot 10^4, 2,05 \cdot 10^4]$). Изменения двух других вспомогательных переменных имели слабое влия-

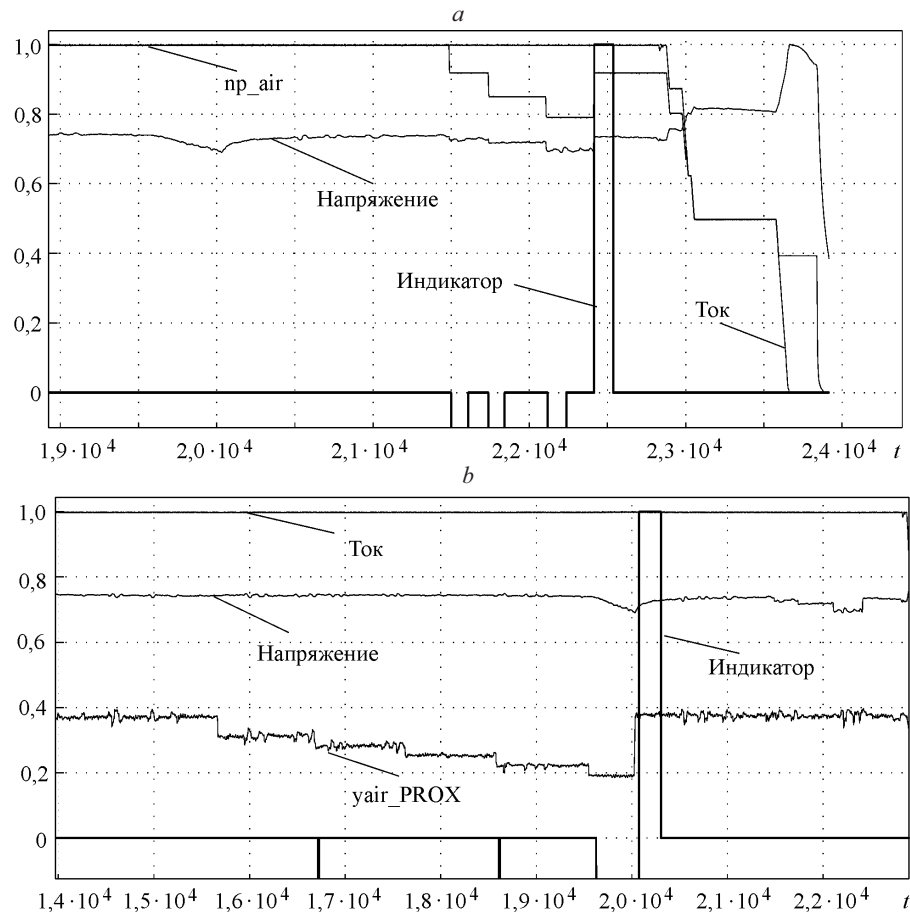


Рис. 6. Примеры поведения индикаторов при наступлении соответствующих событий: для AirStarv (In^3) (a) и для HighCO (In^4) (b)

ние на напряжение при данных операционных условиях (см. рис. 4). Ток в течение всего установившегося режима был постоянным.

С помощью (2) были вычислены индикаторы для всех причин: DMC, DMA, AirStarv, HighCO (см. рис. 4, 5) (для лучшей наглядности результатов данные нормированы, отрицательные значения индикаторов частично урезаны без потери информативности). Слабое влияние причин DMC и DMA на напряжение отмечается несколькими кратковременными «переключениями» индикатора между значениями 0 и -1 или 0 и 1 (см. рис. 4, a, b соответственно). Кратковременные переключения индикатора свидетельствуют о незначительных изменениях напряжения.

На рис. 6, a, b приведены наиболее яркие примеры падения напряжения по причине AirStarv ($\Delta T^{*3} \approx 10-13$ с для каждого изменения переменной pr_air) и по причине HighCO ($\Delta T^{*4} \approx 20$ с) соответственно. В обоих случаях ток оставался постоянным. Значения индикаторов интерпретируются следующим образом: пока напряжение снижается вследствие возникновения соответствующей причины, $\text{In}^i = -1$; $\text{In}^i = 0$, если напряжение достигает уста-

новившегося значения; $In^i = 1$, если напряжение растет в связи с изменением соответствующей вспомогательной переменной.

В целом результаты проведенного тестирования алгоритма на экспериментальных данных выглядят следующим образом. Были использованы измерения пяти различных экспериментов, которые содержали 7 up- и 5 down-примеров для DMC, 1 up- и 2 down-примеров для DMA, 11 up- и 12 down-примеров для AirStarv, 2 up- и 2 down-примеров для HighCO. Все события и причины, их вызвавшие, были распознаны корректно. В то же время имели место ложные кратковременные «срабатывания» индикатора. В основном эти случаи соответствовали увеличенной дисперсии измерений напряжения и вспомогательных переменных. Как следствие, статистика (1) выходила за рамки допустимых значений на короткие промежутки времени. Это приводило к кратковременным «переключениям» индикатора относительно нулевого значения. Дополнительные исследования показали, что увеличение дисперсии напряжения, как правило, происходило за счет отдельных ячеек, которые при определенных условиях вели себя специфическим образом.

Заключение. Цель создания данного метода – включение в контур управления стеком топливных элементов для поддержания постоянного напряжения. Поэтому одним из следующих шагов является создание контроллера на основе показаний индикаторных функций. Другим приложением метода является использование для отдельных элементов (ячеек) стека с целью исследования их индивидуальных особенностей поведения в различных операционных условиях.

Также следует отметить, что идея предложенного алгоритма в целом является независимой от конкретной области применения, поэтому метод может быть легко адаптирован для любой другой подобной задачи идентификации–классификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Jahn H.-J., Schroer W.** Mathematical model of a residential fuel cell power plant and its application to start-up optimization // Fuel Cells. 2004. **4**, N 4. P. 276.
2. **Надарая Э. А.** О непараметрических оценках плотности вероятности и регрессии // Теория вероятностей и ее применение. 1965. **10**, № 1. С. 199.
3. **Watson G.** Smooth regression analysis // Sankhya. Ser. A. 1956. **26**, N 4. P. 359.

*Институт вычислительного моделирования СО РАН,
Красноярский государственный университет,
Высшая техническая школа,
Институт прикладных исследований (г. Ульм, Германия),
E-mail: kirik@icm.krasn.ru
jahn@fh-ulm.de
schroer@fh-ulm.de*

*Поступила в редакцию
30 сентября 2005 г.*