

01

## Построение цифровых идентификационных моделей для задач магнитного управления плазмой в токамаке

© К.С. Мухтаров,<sup>1</sup> А.Е. Коньков,<sup>1</sup> Н.Н. Бахтадзе,<sup>1</sup> А.А. Черешко,<sup>1</sup> В.Н. Кушнарев,<sup>1</sup> А.В. Рагуткин,<sup>2</sup> И.Н. Кравченко,<sup>2</sup> И.М. Сидоров,<sup>3</sup> А.Б. Исаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 117342 Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 101000 Москва, Россия

<sup>3</sup> МИРЭА — Российский технологический университет, 119454 Москва, Россия

e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

Поступило в Редакцию 23 декабря 2025 г.

В окончательной редакции 3 марта 2026 г.

Принято к публикации 9 марта 2026 г.

Предложены методы разработки цифровых идентификационных моделей для синтеза систем магнитного управления формой плазмы в токамаке, учитывающие динамику взаимодействия токов в обмотках полоидального поля, тока плазмы и магнитных потоков. Целью настоящего исследования явилось повышение точности прогнозирования динамики плазмы за счет анализа исторических данных, что позволило выявлять закономерности в динамике системы управления. При построении динамической модели применен метод ассоциативного поиска, основанный на интеллектуальном анализе данных и машинном обучении. Разрабатываемые модели относятся к классу *Just-in-Time* — локальных моделей, создаваемых для каждого момента времени в режиме реального функционирования. В результате анализа серии разрядов токамака Глобус-М2 с близкими значениями максимального тока плазмы и мощности нагрева из базы данных отобраны разряды, схожие по динамическим характеристикам. Для этого применен метод динамического искажения времени (*Dynamic Time Warping*), позволяющий компенсировать различия во временных интервалах и сохранить описание динамики. Разработанные модели использованы для построения цифрового двойника систем магнитного управления плазмой в токамаках с использованием полунатурного моделирования.

**Ключевые слова:** ассоциативный поиск, динамическое искажение времени, идентификация, плазма, токамак, ARX-модель.

DOI: 10.61011/JTF.2026.07.63121.348-25

### Введение

Для построения идентификационных моделей систем управления объектами, характеризующимися сложной нелинейной динамикой, применение соответствующих традиционных методов и алгоритмов идентификации зачастую не позволяет получить удовлетворительные по точности результаты. В случае, когда решение должно также удовлетворять требованиям по быстродействию, большинство существующих подходов неприменимо. В качестве таких систем могут быть рассмотрены системы управления плазмой в токамаках.

Токамак (тороидальная камера с магнитными катушками) представляет собой тороидальную установку магнитного удержания плазмы для осуществления управляемого термоядерного синтеза. Токамаки являются сегодня основными экспериментальными установками для исследований в области управляемого термоядерного синтеза и создания термоядерных электростанций. Управление плазмой в токамаке осуществляется посредством сложной системы магнитных полей, формируемых токами в обмотках, и самим током плазмы. Эффективное

управление плазмой является ключевой задачей для поддержания стабильного разряда и предотвращения разрушения камеры.

Управление плазмой в токамаке требует формирования в реальном времени заданной геометрии магнитного поля, чтобы обеспечить стабильное удержание плазмы и предотвратить ее контакт со стенками камеры. Особенно сложной задачей является поддержание устойчивости вытянутых по вертикали плазменных конфигураций, которые обеспечивают повышенное давление, но подвержены вертикальным сдвигам. Задача управления плазмой представляет собой задачу управления многомерным, нестационарным и многосвязным динамическим объектом.

Для решения задачи управления плазмой используются математические модели, описывающие динамику взаимодействия токов в обмотках полоидального поля и тока плазмы. Традиционно синтез систем управления осуществляется на основе моделей, построенных „*ab initio* (из первых принципов)“, которые включают уравнения Фарадея и уравнения баланса сил [1–4]. Эти модели предоставляют описание процессов, происходя-

щих в плазме, и обеспечивают основу для анализа и проектирования систем управления [5–7]. Однако их практическое применение ограничено высокой сложностью расчетов, необходимостью точного знания параметров объекта и значительными вычислительными затратами.

Для синтеза регуляторов в системах управления плазмой часто используются линеаризованные модели, получаемые на основе метода малых отклонений [8,9]. Альтернативой является использование методов идентификации, позволяющих разрабатывать модели с использованием экспериментальных или численно сгенерированных данных. Такой подход применялся при разработке систем управления плазмой на установках JT-60U, DIII — D, JET и EAST [1,10–12]. Например, в работе [13] предложена ARMAX-модель, а в [14] представлена частотная идентификация MISO-модели методом  $H_\infty$  для токамака TCV.

Идентификационные модели обладают рядом преимуществ по сравнению с *ab initio* моделями:

- идентификация моделей основывается на экспериментальных данных, что позволяет учесть реальные особенности объекта, включая нелинейности, погрешности и шумы, учет которых может быть сложен или невозможен при построении модели „из первых принципов“;
- процесс идентификации часто требует меньших вычислительных ресурсов, особенно если объект имеет сложную физическую природу, и разработка модели „из первых принципов“ становится трудоемкой;
- для идентификации не требуется глубокого знания физических процессов, протекающих в объекте, что особенно важно для сложных систем или тех, где физические законы описания недостаточно изучены;
- идентификационные модели могут корректироваться на основе новых данных, что делает их более адаптивными к изменяющимся условиям эксплуатации объекта.

Применение традиционных методов идентификации для задач управления плазмой в токамаке сопряжено с рядом ограничений. Динамика плазмы характеризуется нелинейностью, неустойчивостью и зачастую неявными, „скрытыми“ параметрами, которые не отражаются в линеаризованных моделях, даже с учетом изменения параметров во времени. Кроме того, для систем магнитного управления плазмой в токамаке требуется высокое быстродействие. Перечисленные сложности ограничивают применение классических методов идентификации и мотивируют применение альтернативных подходов, способных строить модели на основе информации из базы данных разрядов токамака.

Для преодоления перечисленных ограничений в работе предлагается метод построения модели плазмы на основе алгоритма ассоциативного поиска. Этот алгоритм основан на концепции индуктивных знаний — обобщенных закономерностей, выявляемых из анализа множества наблюдений. Эти знания включают статистические зависимости и эмпирические распределения параметров, которые невозможно заранее учесть в аналитических

моделях [15]. Такой подход позволяет описывать как измеряемую динамику системы, так и скрытую, немоделируемую внутреннюю динамику, что особенно важно для сложных многомерных объектов, таких как плазма в токамаке.

## 1. Структурная схема системы магнитного управления плазмы в токамаке

Токамак — это управляемая термоядерная установка, работающая в импульсном режиме из-за ограниченного запаса магнитного потока, создаваемого центральным соленоидом. Каждый эксперимент называется *разрядом* (*shot*) [11,16]. Исследование основано на данных, полученных из серии разрядов токамака Глобус-М2 (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СПб) [16–18].

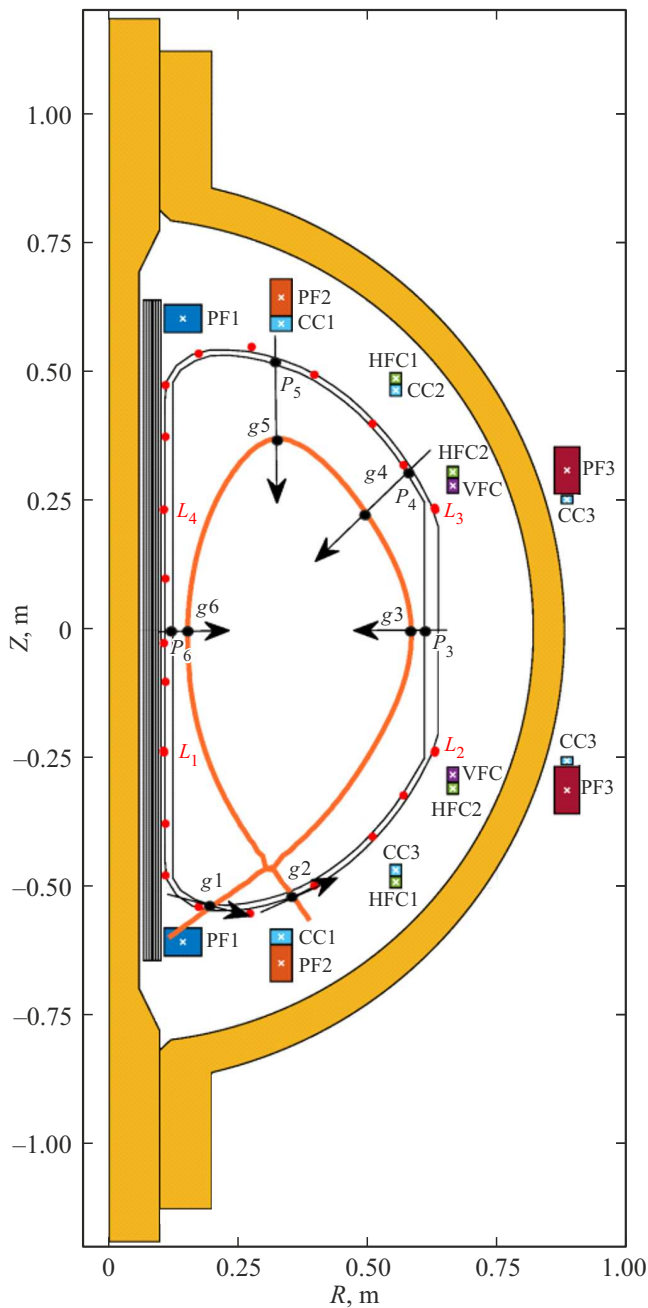
Система управления полоидальным полем токамака Глобус-М2 включает семь обмоток: обмотку горизонтального поля (HFC), обмотку вертикального поля (VFC), центральный соленоид (CS), корректирующую обмотку (CC) и три дополнительных обмотки полоидального поля (PF1, PF2, PF3) (рис. 1) [19]. Эти обмотки формируют полоидальное магнитное поле, которое обеспечивает стабилизацию положения и формы плазмы внутри вакуумной камеры. Для отслеживания состояния плазмы используется система магнитной диагностики, включающая 21 магнитную петлю, расположенную вокруг камеры.

Структурная схема системы магнитного управления плазмой в токамаке Глобус-М2 представлена на рис. 2. Объект управления включает два основных блока:

- „PF-system“ — систему обмоток полоидального поля (темно-оранжевый блок), в которую входят все семь обмоток. Токи в этих обмотках формируют полоидальное магнитное поле, воздействующее на плазму;
- „Plasma&Diagnostics“ — совокупность плазмы токамака в течение разряда и системы магнитной диагностики (темно-красный блок). Входными воздействиями на этот блок являются токи в обмотках полоидального поля  $I_{PF} = [I_{HFC}, I_{VFC}, I_{CS}, I_{PF1}, I_{PF2}, I_{PF3}, I_{CC}]$ , а выходными — ток плазмы и магнитные потоки, измеряемые 21 диагностической петлей  $[I_P, \Psi^T]$ .

## 2. Идентификация системы управления для блока „Plasma&Diagnostics“

Идентификационная модель для системы управления плазмой в токамаке описывает взаимосвязь между токами в обмотках полоидального поля (входными воздействиями) и измеряемыми величинами: током плазмы и потоками магнитного поля, регистрируемыми системой магнитной диагностики (выходами).



**Рис. 1.** Вертикальное сечение сферического токамака Глобус-М2 (красные точки — магнитные петли).

Дискретная модель в пространстве состояний имеет вид

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + BI_{PF}(k), \\ [I_P(k), \Psi^T(k)]^T = Cx(k) + DI_{PF}(k), \end{cases} \quad (1)$$

где  $I_P(k)$  — ток плазмы;  $\Psi$  — потоки магнитного поля, измеряемым 21-й петлей;  $I_{PF}$  — токи в обмотках полоидального поля;  $x, k$  — соответственно вектор состояния и номер отсчета.

При построении модели динамики плазмы возможны различные подходы к идентификации параметров во времени. Модель может быть:

- 1) построена на каждом временном шаге разряда, что позволяет учитывать мгновенные изменения динамики объекта;
- 2) построена в ключевых моментах разряда с последующей линейной интерполяцией параметров между ними (Linear Parameter Varying — LPV-подход);
- 3) сформирована как единая модель для всего разряда, длительность которого принимается в качестве временного такта.

В настоящей работе реализован третий вариант: для каждого разряда строится одна модель с постоянными параметрами, которая отражает обобщенное представление динамики системы в течение всего эксперимента. Такой подход позволяет выявить общие закономерности поведения объекта.

### 3. ARX-модель блока „Plasma&Diagnostics“

Для описания динамики взаимодействия токов полоидального поля, тока плазмы и магнитных потоков используется авторегрессионная модель (Autoregressive with exogenous inputs — ARX-модель), которая для каждого выходного сигнала  $y_i(k)$  записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} y_i(k) = & - \sum_{r=1}^R \sum_{v \in V_r} a_{i,r}^v \tilde{y}_r(k-v) + \sum_{j=1}^J b_{i,j}^0 u_j(k) \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{w \in W_j} b_{i,j}^w u_j(k-w), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $y_i(k)$  —  $i$ -й выходной сигнал (ток плазмы или магнитный поток на одной из петель) на дискретном временном шаге  $k$ ;  $\tilde{y}_r(k-v)$  —  $r$ -й выходной сигнал одного из ближайших в смысле евклидова расстояния разряда из базы данных — при сдвиге  $v$  на дискретном временном шаге  $k$ ;  $k-v$  — будем говорить далее: „при временном сдвиге  $v$ “ на дискретном временном шаге  $k$ ;  $u_j(k)$  —  $j$ -й входной сигнал (ток в обмотке полоидального поля) на дискретном временном шаге  $k$ ;  $I$  — количество выходов системы ( $i = 1, \dots, I$ );  $J$  — количество входов системы ( $j = 1, \dots, J$ );  $R$  — количество выходов, задержки которых используются в модели ( $r = 1, \dots, R$ );  $a_{i,r}^v, b_{i,j}^0, b_{i,j}^w$  — коэффициенты модели, полученные идентификацией на данных текущего разряда;  $V_r$  — множество значений сдвигов (задержек) выходных сигналов, включаемых в модель для выхода  $r$ , определяется на основе анализа автокорреляции и включает сдвиги  $v$ , удовлетворяющие условию  $\rho(v) \geq \rho_{\min}$ ;  $W_j$  — множество значений сдвигов (задержек) входных сигналов для входа  $j$ , определяется на основе анализа автокорреляции и включает сдвиги  $w$ , удовлетворяющие

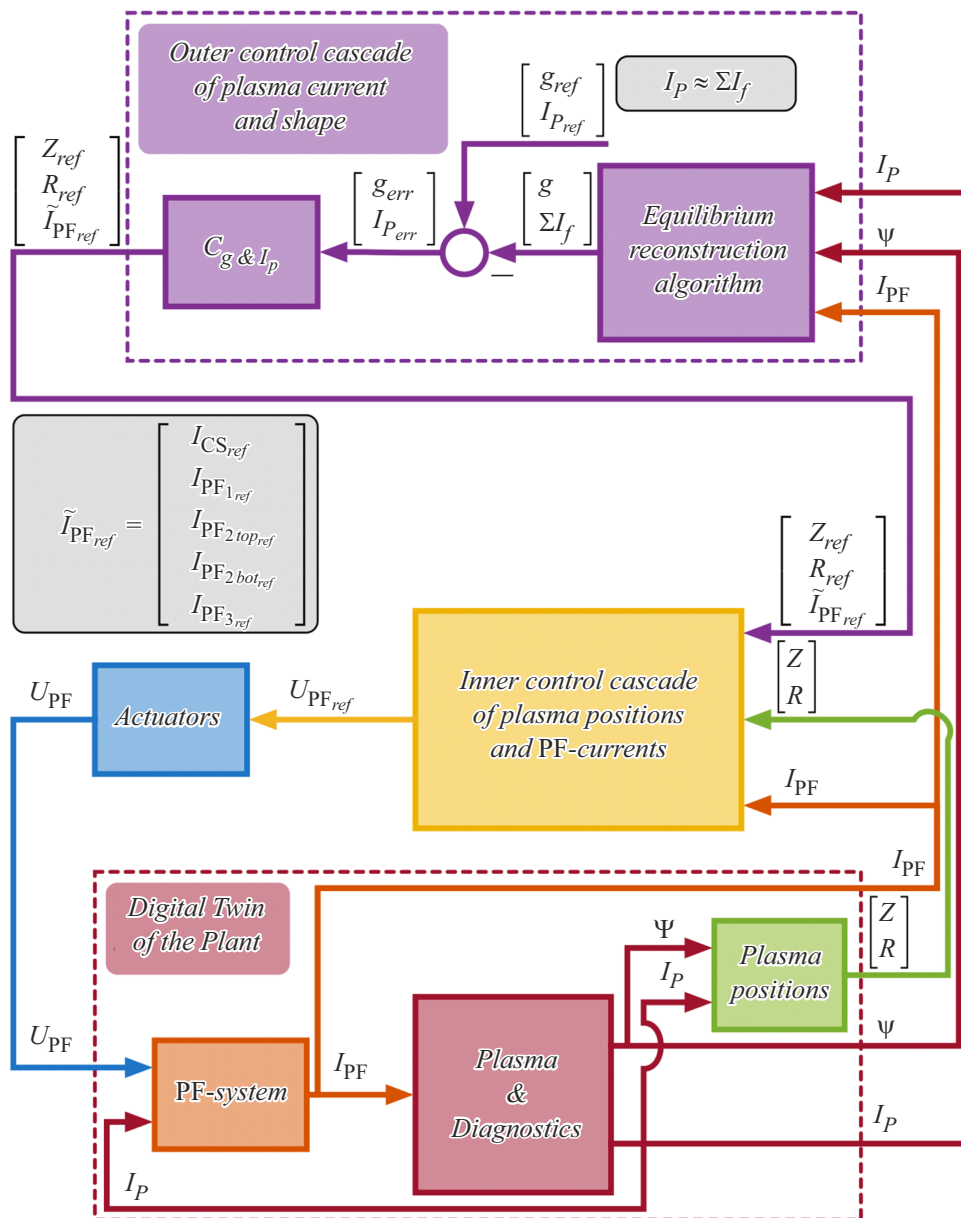


Рис. 2. Структурная схема системы магнитного управления плазмой в токамаке Глобус-М2.

условию  $\rho(w) \geq \rho_{\min}$ ;  $\rho(v)$  и  $\rho(w)$  — коэффициенты автокорреляции выходных и входных сигналов при задержках  $v$  и  $w$  соответственно.

Форма записи ARX-модели из уравнения (2) является достаточно общей и позволяет учесть влияние как прошлых входов, так и прошлых выходов на динамику системы.

ARX-модель из уравнения (2) в матричной форме может быть записана следующим образом:

$$Y(k) = U_{ext}(k)A,$$

где  $Y$  — матрица выходов;  $U_{ext}$  — „расширенный вектор входа“, включающий все входы модели (2);  $A$  — матрица коэффициентов модели.

В рамках настоящей работы проведен анализ влияния наличия и отсутствия сдвигов выходов на точность предсказаний ARX-модели. Показано, что при отсутствии сдвигов выходов модель строго соответствует предсказанным значениям, тогда как при использовании сдвигов выходов возникает расхождение между предсказанными значениями и выходами ARX-модели.

В случае, если учитываются сдвиги выходов близкого разряда из базы данных, матрицы  $U_{ext}$  и  $A$  имеет вид:

$$U_{ext}(k) = [y_1(k-v) \dots y_R(k-v) u_1(k) \dots u_J(k) \times u_1(k-w) \dots u_J(k-w)], \quad (3)$$

$$A^T = \begin{bmatrix} -a_{1,1}^v & \dots & -a_{1,R}^v & b_{1,1} & \dots & b_{1,5} & -b_{1,1}^w & \dots & -b_{1,J}^w \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{R,1}^v & \dots & -a_{R,R}^v & b_{R,1} & \dots & b_{R,5} & -b_{R,1}^w & \dots & -b_{R,J}^w \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Если сдвиги выходов не учитываются, то матрицы имеют вид:

$$U_{ext}(k) = [u_1(k) \dots u_J(k) u_1(k-w) \dots u_J(k-w)], \quad (5)$$

$$A^T = \begin{bmatrix} b_{1,1} & \dots & b_{1,5} & -b_{1,1}^w & \dots & -b_{1,J}^w \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{R,1} & \dots & b_{R,5} & -b_{R,1}^w & \dots & -b_{R,J}^w \end{bmatrix}. \quad (6)$$

#### 4. Ассоциативный поиск для идентификации ARX-модели в токамаке Глобус-М2

Метод ассоциативного поиска основан на концепции индуктивных знаний, сформулированной В.Н. Вапником [20]. Эта концепция предполагает извлечение скрытых закономерностей из эмпирических данных, в том числе таких, которые не поддаются формализации в аналитическом виде. Метод продемонстрировал высокую эффективность при моделировании нелинейных и нестационарных систем в химической, энергетической, технологической и торговой отраслях [21–25].

В настоящей работе алгоритм ассоциативного поиска адаптирован для построения модели динамики плазмы токамака Глобус-М2. Модель формируется на основе исторических данных, отобранных по степени близости входных векторов к текущему в смысле выбранного критерия (например, евклидова либо манхэттенского расстояния). В отличие от классических подходов *Just-in-Time* [26], где на каждом временном шаге формируется локальная модель, здесь строится одна обобщенная модель на разряд, что позволяет описать поведение системы в рамках конкретного экспериментального режима.

Такой подход позволяет ограничить выборку данных только наиболее релевантными фрагментами, избегая необходимости использовать полную временную историю входных воздействий. Это обеспечивает баланс между точностью и вычислительной эффективностью, позволяет минимизировать размерность модели и сохранить адекватность аппроксимации.

#### 5. Методика ассоциативного отбора разрядов на основе DTW-сопоставление входных векторов

Построение модели осуществляется на основе экспериментальных данных мониторинга 897 плазменных

разрядах токамака Глобус-М2 за 2022–2023 гг. Первым этапом алгоритма ассоциативного поиска является отбор подмножества разрядов, наиболее близких к текущему по динамике входных сигналов. Так как продолжительность разрядов различается, классические методы оценки схожести (например, евклидова метрика) оказываются неприменимыми из-за несоизмеримости длины временных рядов. Для решения этой проблемы используется метод динамического искажения времени — *Dynamic Time Warping* (DTW).

DTW — это метод выравнивания временных последовательностей, допускающий локальные нелинейные искажения шкалы времени. В отличие от линейных метрик DTW находит оптимальное сопоставление между точками двух временных рядов, что позволяет выявлять структурное сходство динамики, даже если события в сравниваемых процессах происходят в разные моменты времени [27]. Это особенно важно в контексте анализа данных разрядов токамака, где их продолжительность может существенно варьироваться, затрудняя прямое сопоставление временных характеристик между разрядами. Благодаря способности к „искривлению“ временной оси, DTW обеспечивает устойчивость к неоднородностям во времени и позволяет корректно сравнивать процессы с различными масштабами [28]. В реализации алгоритма, используемой в MATLAB, по умолчанию применяется евклидова метрика для расчета расстояния между точками временных рядов.

После выравнивания с помощью DTW для каждого разряда из архива вычисляется расстояние до текущего. Разряды с наименьшими значениями этого расстояния считаются наиболее релевантными и отбираются для формирования обучающей выборки. Использование DTW на этом этапе формирует новый вариант алгоритма ассоциативного поиска, где близость оценивается по евклидовой метрике с фиксированной длиной векторов.

На рис. 3, а показаны графики тока плазмы для разрядов № 40045 и № 42403, а на рис. 3, б — те же сигналы после выравнивания методом DTW. Видно, что характерные особенности сигналов становятся сопоставимыми, несмотря на различие в длительности. Применение DTW в контексте ассоциативной идентификации модели для задач управления в токамаке позволяет значительно повысить качество отбора прецедентов.

#### 6. Оценка коэффициентов модели на основе ассоциативно отобранных данных

После выполнения ассоциативного отбора на основе DTW-критерия формируется обучающая выборка, включающая временные ряды входных и выходных сигналов из  $q$  наиболее близких разрядов. Из каждого разряда по всем временным отсчетам извлекаются пары расширенных входных векторов  $U_{ext}$  и соответствующих выходных значений  $Y$ , которые затем объединяются в

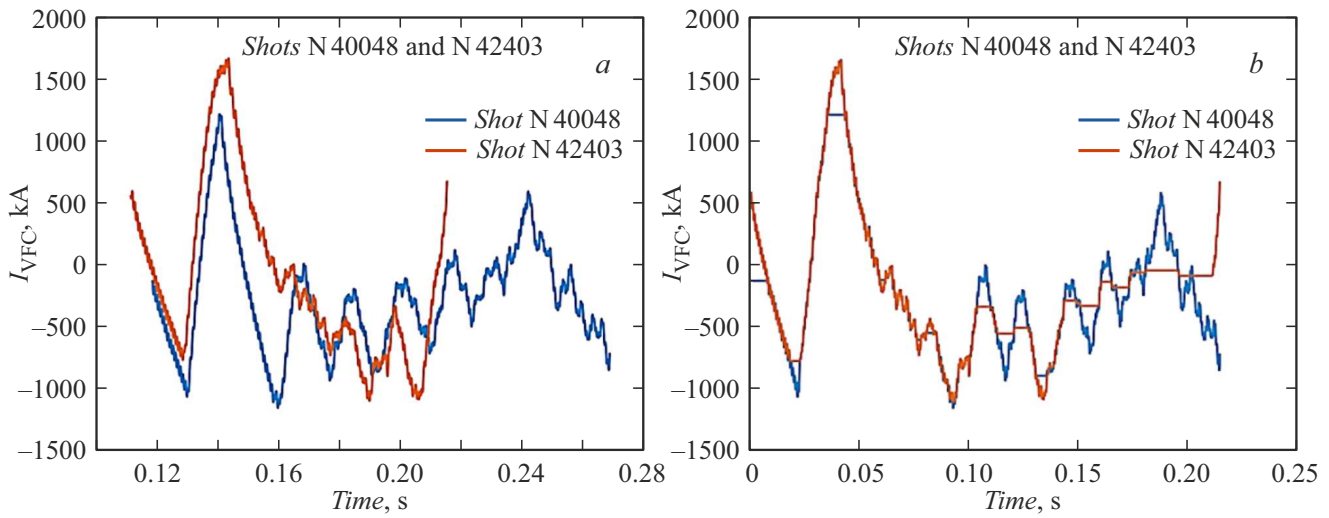


Рис. 3. Иллюстрация сравнения входных сигналов полоидальных токов методом DTW.

общую матрицу обучающих данных:

$$\hat{U}_{ext} = \begin{pmatrix} U_{ext_1} \\ \vdots \\ U_{ext_q} \end{pmatrix}, \quad \hat{Y} = \begin{pmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_q \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Для оценки коэффициентов, ввиду коррелированности между собой компонентов расширенного вектора входов, используется решение задачи наименьших квадратов с использованием псевдообратной матрицы Мура-Пенроуза:

$$\hat{A} = (\hat{U}_{ext}^T \hat{U}_{ext})^{-1} \hat{U}_{ext}^T \hat{Y}. \quad (8)$$

Полученная модель используется для прогноза выходного сигнала нового разряда на основе текущих значений входа. На ее основе формируется ARX-модель:

$$Y_{predicted} = U_{entry} \hat{A}. \quad (9)$$

Предполагается, что для матриц  $A, B, C$  и  $D$  из уравнения (1) выполняются критерии Калмана.

## 7. Результаты исследований

Моделирование проводилось для четырех вариантов моделей: прогноз, полученный по коэффициентам модели с учетом сдвигов выходов; прогноз без учета сдвигов выходов; выход ARX-модели, построенной с учетом сдвигов; выход ARX-модели без учета сдвигов.

На рис. 4 (токи плазмы разных разрядов) и рис. 5 (потоки одного разряда) представлены результаты сравнения динамики сигналов: синяя линия — данные эксперимента, красная — выход ARX-модели с учетом сдвигов выходов, желтая — предсказание с учетом сдвигов выходов, фиолетовая — выход ARX-модели без учета сдвигов, зеленая — предсказания без учета сдвигов.

В табл. 1,2 приведены значения СКО (средне-квадратическое отклонение (root-mean-square deviation, RMSD)) в процентах между экспериментальными данными и результатами прогнозов и моделей как с учетом, так и без учета сдвигов выходов.

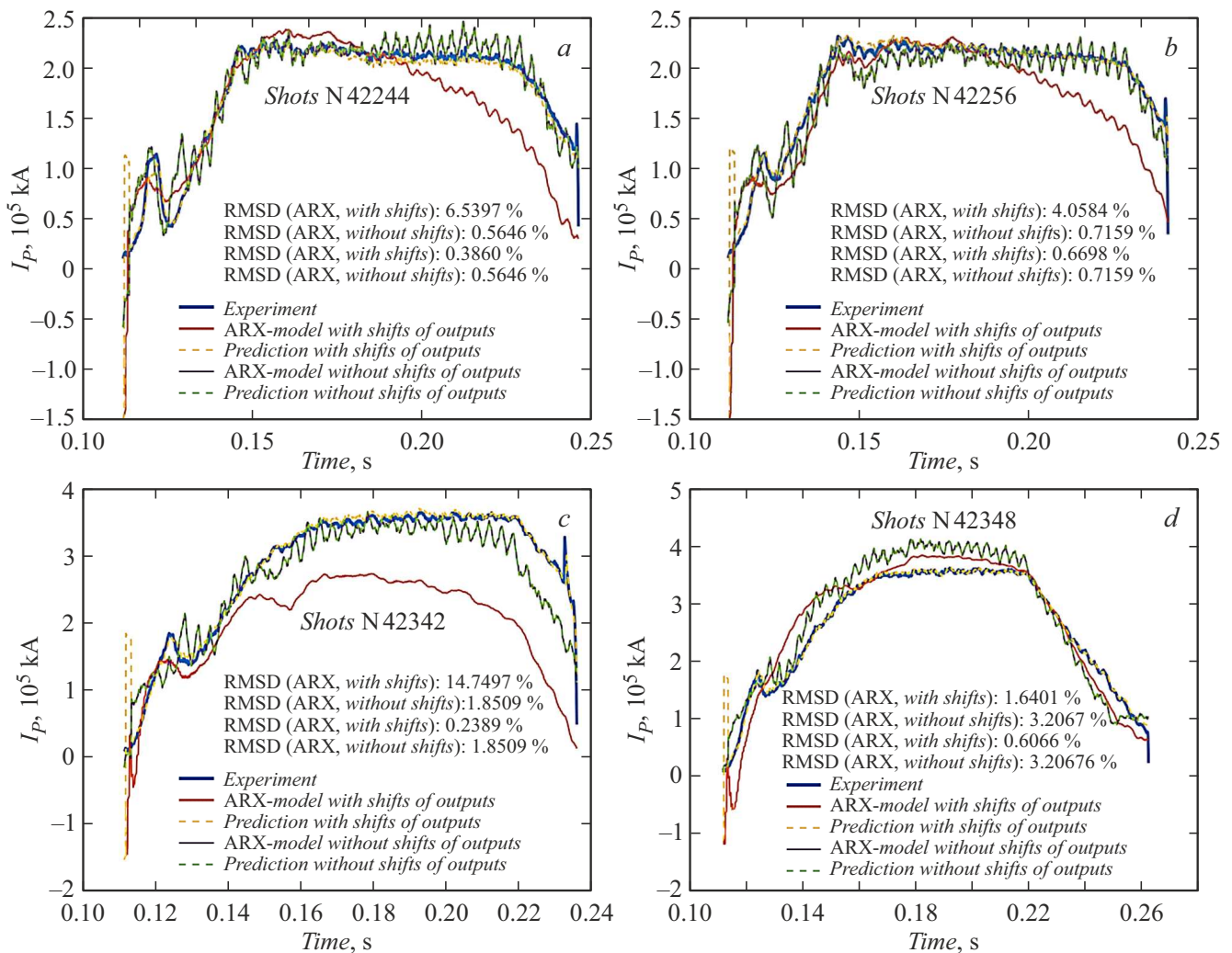
Проведенный анализ демонстрирует следующее:

1) при учете сдвигов выходов наиболее близкого ассоциативного разряда предсказанные значения достигают высокой точности, поскольку модель использует информацию о предыдущих значениях выходного сигнала, что повышает согласованность прогноза с динамикой системы. Однако в этом случае возникает расхождение между предсказанием и выходом ARX-модели, так как использование сдвигов выходов делает модель непригодной для синтеза регулятора: выходы модели становятся зависимыми от будущих значений регулятора, что нарушает принцип причинности при построении моделей динамических систем;

2) при исключении сдвигов выходов ARX-модель и прогноз полностью совпадают. Это свидетельствует о корректности реализации метода и строгом согласовании модели с доступной информацией в момент управления. Хотя точность при этом может быть ниже, именно такая структура ARX-модели считается физически реализуемой и применимой в реальных задачах управления.

## 8. Обсуждение полученных результатов

Результаты исследования подтвердили эффективность применения алгоритма ассоциативного поиска для построения моделей на основе данных мониторинга предыдущих разрядов токамака Глобус-М2. Полученные модели характеризуются высокой точностью предсказания



**Рис. 4.** Результаты идентификации тока плазмы для разных разрядов: *a* — ток плазмы 200 кА (разряд 42244), *b* — ток плазмы 200 кА (разряд 42256), *c* — ток плазмы 350 кА (разряд 42342), *d* — ток плазмы 350 кА (разряд 42348).

динамики выходных параметров (тока плазмы и магнитных потоков), что демонстрируют результаты сравнения с экспериментальными данными мониторинга независимых разрядов.

Применение DTW (Dynamic Time Warping) для сопоставления входных векторов разных разрядов позволило учесть временные искажения и вариативность фаз плазменного разряда, что улучшило выборку релевантных разрядов и качество идентификации.

Показано, что включение в модель сдвигов выходов повышает точность прогнозирования. Это подчеркивает важность соблюдения структурных ограничений при использовании ARX-моделей в управлении.

Полученные ARX-модели планируется использовать при полунатурном моделировании систем магнитного управления плазмы. Полунатурное моделирование осуществляется на стенде реального времени в ИПУ РАН [29]. Стенд состоит из двух целевых машин реального времени „Регулятор“ — „Модель объекта“, соеди-

ненных обратной связью посредством многоканальных АЦП и ЦАП.

Полученные модели играют важную роль в создании цифрового двойника [30] систем магнитного управления плазмой в токамаках. Описанный подход позволяет точно и оперативно отражать любые изменения объекта управления при проведении полунатурного моделирования.

## Заключение

В работе предложен и реализован метод идентификации моделей динамики плазмы в токамаке Глобус-M2 на основе алгоритма ассоциативного поиска. Метод использует данные мониторинга разрядов и обеспечивает построение ARX-моделей, отражающей поведение системы в рамках конкретного режима работы.

В рамках предложенного подхода:

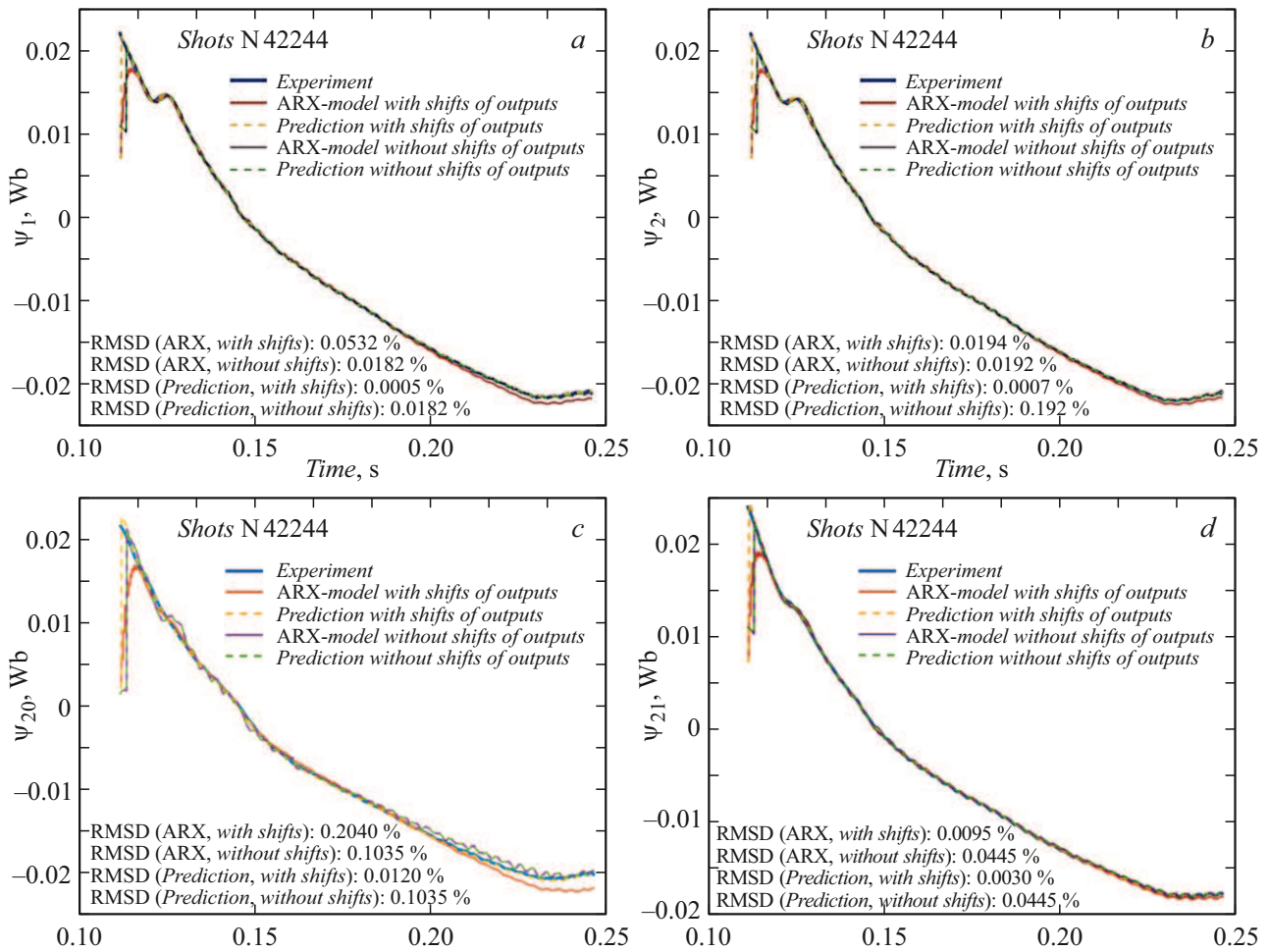


Рис. 5. Результаты идентификации потоков разряда 42244: а —  $\psi_1$ , b —  $\psi_2$ , c —  $\psi_{20}$ , d —  $\psi_{21}$ .

Таблица 1. Результаты моделирования тока плазмы для разных разрядов

СКО	$I_p$	$I_p$	$I_p$	$I_p$
	№ 42244	№ 42256	№ 42342	№ 42348
Предсказания (со сдвигами), %	0.3860	0.6698	0.2389	0.6066
ARX-модели (со сдвигами), %	6.5397	4.0584	14.7497	1.6401
Предсказания (без сдвигов), %	0.5646	0.7159	1.8509	3.2067
ARX-модели (без сдвигов), %	0.5646	0.7159	1.8509	3.2067

- коэффициенты модели определяются на основе фрагментов данных, ассоциативно близких к текущему разряду;

- для повышения корректности сравнения режимов применяется метод динамического искажения времени (DTW), позволяющий учесть различия в длительности фаз разрядов;

- формируется единая модель для всех моментов времени разряда, что предоставляет обобщенное описание динамики и снижает вычислительную нагрузку.

Таким образом, при исключении сдвигов выходов ARX-модель демонстрирует совпадение с предсказанными значениями, сохраняя корректную в аспекте соблюдения принципа причинности структуру, необходимую для синтеза систем управления.

Таблица 2. Результаты моделирования потоков для разряда 42244

СКО	$\psi_1$	$\psi_2$	$\psi_{20}$	$\psi_{21}$
Предсказания (со сдвигами), %	0.0005	0.0007	0.0120	0.0030
ARX-модели (со сдвигами), %	0.0532	0.0194	0.2040	0.0095
Предсказания (без сдвигов), %	0.0182	0.0192	0.1035	0.0445
ARX-модели (без сдвигов), %	0.0182	0.0192	0.1035	0.0445

## Финансирование работы

Исследование проведено по Соглашению о предоставлении из федерального бюджета гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 075-15-2024-527 от 23 апреля 2024 г.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] W. Wehner, W. Shi, E. Schuster, D. Moreau, M.L. Walker, J.R. Ferron, T.C. Luce, D.A. Humphreys, B.G. Penaflor, R.D. Johnson. *Optimal feedback control of the poloidal magnetic flux profile in the DIII-D tokamak based on identified plasma response models*, 2012 American Control Conference (ACC) (Montreal, QC, Canada, 2012), p. 5049–5054. DOI: 10.1109/ACC.2012.6315581
- [2] Ю.В. Митришкин, Н.М. Карцев, А.А. Прохоров, Е.А. Павлова, П.С. Корнев, А.Е. Коньков, В.И. Кружков, С.Л. Иванова. Тез. Докл. XIV Международной симпозиум «Интеллектуальные системы» (INTELS'20) (Россия, ZOOM, 2021), т. 186, с. 466.
- [3] П. Корнев, Ю. Митришкин, М. Патров. Мехатроника, автоматизация, управление, **17**, 254 (2016). DOI: 10.17587/mau.17.254-266
- [4] E. Witrant, E. Joffrin, S. Bremond, G. Giruzzi, D. Mazon, O. Barana, P. Moreau. *Plasma Phys. Controlled Fusion*, **49**, 1075 (2007). DOI: 10.1088/0741-3335/49/7/009
- [5] D. Moreau, D. Mazon, Y. Adachi, Y. Takase, Y. Sakamoto, S. Ide, T. Suzuki. In: Proc. Int. Conf. on Control and Automation, 1 (2010). DOI: 10.1142/9789814313155\_0053
- [6] W. Wehner, J. Barton, M. Lauret, E. Schuster, J. Ferron, C. Holcomb, T. Luce, D.A. Humphreys, M.L. Walker, B. Penaflor, R. Johnson. *Fusion Engineering and Design*, **123**, 1 (2017). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.03.022
- [7] S. Wang, E. Witrant, D. Moreau. *Fusion Engineering and Design*, **162**, 112071 (2020). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2020.112071
- [8] Q.P. Yuan, B.J. Xiao, Z.P. Luo, M.L. Walker, A.S. Welander, A. Hyatt, J.P. Qian, R.R. Zhang, D.A. Humphreys, J.A. Leyer. *Nuclear Fusion*, **53** (4), 043009 (2013). DOI: 10.1088/0029-5515/53/4/043009
- [9] А.Е. Коньков, П.С. Корнев, Ю.В. Митришкин, И.М. Балаченков, Е.О. Киселев. *Plasma Phys. Reports*, **49** (12), 1552 (2023). DOI: 10.1134/S1063780X23601827
- [10] D. Moreau, D. Mazon, M.L. Walker, J.R. Ferron, K.H. Burrell, S.M. Flanagan, P. Gohil, R.J. Groebner, A.W. Hyatt, R.J. La Haye. *Nuclear Fusion*, **51** (6), 063009 (2011). DOI: 10.1088/0029-5515/51/6/063009
- [11] B. Mavkov, E. Witrant, C. Prieur, D. Moreau. *Control Engineering Practice*, **60**, 28 (2017). DOI: 10.1016/j.conengprac.2016.12.006
- [12] C. Zhu, B. Xiao, C. Xu, Y. Zhu. *Proc. 33rd Chinese Control Conference (CCC 2014)* (Nanjing, China 2014), p. 6682. DOI: 10.1109/ChiCC.2014.6896098
- [13] Y. Zhu. *Multivariable System Identification for Process Control* (Pergamon Press, Oxford, 2001)
- [14] A. Coutlis, D. Limebeer, J. Wainwright, J. Lister, P. Vyas. *IEEE Trans. Control Systems Technology*, **8** (4), 646 (2000). DOI: 10.1109/87.852910
- [15] Н. Бахтадзе, В.А. Лотоцкий, М.Е. Максимов, Б.В. Павлов. *IFAC Proceedings Volumes*, **40** (3), 105 (2007).
- [16] Yu. Mitrishkin, P. Korenev, A. Prokhorov, N.M. Kartsev, M. Patrov. *Adv. Systems Sci. Applications*, **18** (2), 26 (2018). DOI: 10.25728/assa.2018.18.2.598
- [17] Y.V. Mitrishkin, N.M. Kartsev, E.A. Pavlova, A.A. Prohorov, P.S. Korenev, M. Patrov. *Adv. Systems Sci. Applications*, **18**, 39 (2018).
- [18] V. Minaev, V. Gusev, N.V. Sakharov, V.I. Varfolomeev, N.N. Bakharev, V.A. Belyakov, E.N. Bondarchuk, P. Brunkov, F. Chernyshev, V. Davydenko, V.V. Dyachenko, A.A. Kavin, S. Khitrov, N.A. Khromov, E. Kiselev, A. Konovalov, V. Kornev, G. Kurskiev, A.N. Labusov, E.G. Zhilin. *Nuclear Fusion*, **57**, 066047 (2017). DOI: 10.1088/1741-4326/aa69e0
- [19] V. Dokouka, P. Korenev, Yu. Mitrishkin, E. Pavlova, M. Patrov, R.R. Khayrutdinov. *Phys. Atomic Nuclei*, **80**, 1298 (2017). DOI: 10.1134/S1063778817070055
- [20] В.Н. Вапник. *Statistical learning theory* (John Wiley & Sons, NY., 1998), v. 2, p. 831–842.
- [21] I.B. Yadikin, N.N. Bakhtadze, V.A. Lototsky, E.M. Maximov, E.A. Sakrutina. *IFAC-PapersOnLine*, **49** (12), 355 (2016).
- [22] N. Bakhtadze, E.M. Maximov, R.T. Valiakhmetov. *IFAC Proceedings Volumes*, **41** (2), 46 (2008).
- [23] N.N. Bakhtadze, V.A. Lototsky, R.T. Valiakhmetov. *IFAC Proceedings Volumes*, **41** (2), 4280 (2008).
- [24] N. Bakhtadze, A. Cheresheko, D. Elpashev, A. Suleykin, A. Purto. *IFAC-PapersOnLine*, **55** (2), 19 (2022).
- [25] N. Bakhtadze, V. Lototsky, V. Pyatetsky, A. Lototsky. In: *Applied Modern Control*. Ed. by N. Bakhtadze (IntechOpen, 2018). DOI: 10.5772/intechopen.79655
- [26] W.S. Yeo, A. Saptoro, P. Kumar, M. Kano. *J. Process Control*, **128**, 103025 (2023).
- [27] J. Zhao, L. Itti. *Pattern Recognition*, **74**, 171 (2018).
- [28] R.M. Marcacini, J.C. Carnevali, J. Domingos. *23rd International Conference on Pattern Recognition (ICPR)* (Cancun, Mexico, 2016), p. 2521. DOI: 10.1109/ICPR.2016.7900015
- [29] Ю.В. Митришкин, А.Е. Коньков, П.С. Корнев. *Материалы 16-й Международной конференции «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (конференция Пятницкого)* (ИПУ РАН, М., 2022), с. 286.
- [30] M. Singh, E. Fuenmayor, E.P. Hinchy, Yu. Qiao, N. Murray, D. Devine. *Appl. System Innovation*, **4** (2), 36 (2021). DOI: 10.3390/asi4020036