

## ПРИМЕНЕНИЕ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА АСУ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Аннотация.** Рассмотрено использование блокчейн-технологий для повышения качества систем управления сложными распределенными динамическими системами. Приведена технология структуризованного блокчейн-реестра. Предложено решение вопроса выбора математического аппарата для реализации данной технологии.

**Ключевые слова:** сложная распределенная динамическая система, блокчейн-технологии, математическое моделирование, система управления, структуризованный (кластеризованный) блокчейн-реестр, СППР, искусственный интеллект.

В настоящее время блокчейн-технологии широко применяются в автоматизированных системах управления (АСУ) динамическими объектами (системами) и технологическими процессами различных технических систем. Дальнейшее их распространение связано с решением ряда проблем и задач, которые относятся не только к области компьютерных наук, но и используемому математическому аппарату, реализованному с помощью соответствующего программно-алгоритмического обеспечения. Комплексное решение таких задач, на стыке указанных направлений, является основой для дальнейшего эффективного прикладного применения данных технологий [1–4].

Под термином «сложная динамическая система (объект)» будем понимать распределенную систему (объект), включающую большое число элементов (или кластеров), параметры которых представляют собой функции времени. При этом допускается, что скорости изменения динамических характеристик как отдельных элементов (субъектов) системы, так и групп субъектов (кластеров) внутри системы, так же, как и изменения характеристик всей системы, могут описываться величинами, значительно (во многих случаях на порядки) отличающимися по модулю.

Сложные динамические объекты (системы) с указанными свойствами, для которых экономическая или иная целесообразность применения блокчейн-технологий не вызывает сомнений, определим как системы А-класса и далее будем предполагать, что исследуемые объекты являются таковыми. Приведем примеры реальных систем из различных областей промышленности, соответствующих указанным ограничениям.

- Система управления некоторым количеством дронов, рассматриваемая как один сложный динамический объект. Для данного объекта (находящихся в состоянии движения дронов) выделим три основных варианта процессов: движения отдельных дронов, отдельных кластеров дронов и всего объекта — совокупности дронов. Флуктуации движения отдельных дронов в составе своей группы представляют собой процессы, скорость которых может существенно отличаться от скорости второй и третьей групп. Полное математическое описание объекта должно учитывать динамику всех процессов в объекте и возможную вариативность по времени. В частности, перемещения выделенных групп дронов в отдельные интервалы времени также могут протекать со значительно большей скоростью, чем скорость, характеризующая движение всего объекта.

- Система управления энергопотреблением некоторого региона, на территории которого размещены многочисленные потребители энергии и ее производители. В этом случае динамика потребления электроэнергии отдельными пользо-

вателями и динамика изменения потребления и выработки электроэнергии в регионе могут характеризоваться скоростями, отличающимися на порядки. Аналогично, для больших по территории регионов это может относиться и к их отдельным подобластям (районам).

В приведенных примерах использование блокчейна необходимо для обеспечения гарантированной защиты информации от искажений и дает возможность четко восстановить (отследить) хронологию процессов. Кроме этого, применение блокчейна позволяет улучшить качество систем управления, повышая их быстродействие, и другие характеристики. В частности, в задаче энергоуправления блокчейн позволит обеспечить учет произведенного и потребленного продукта и более точно рассчитать величины управляющих воздействий.

Для динамических систем большой размерности ускорение реакции систем управления часто оказывается трудной вычислительной проблемой вследствие большого объема вычислений, причем сложность ее решения может существенно возрастать для объектов с локальными (встроенными, автономными) управляющими системами, широко распространенными в последнее время. В целях повышения качества (быстродействия, точности) систем управления сложными динамическими объектами (системами) и для обеспечения их эффективной работы предлагается формировать и использовать структурированный (кластеризованный) электронный распределенный реестр, когда кластеризация данных осуществляется с учетом скорости их изменения. Преимуществами такой схемы организации распределенного электронного реестра являются: уменьшение требуемых характеристик по объему хранения данных, возможности оптимизированной организации баз данных (баз знаний), повышение скорости извлечения необходимых данных.

С учетом отмеченных особенностей рассматриваемого класса систем структуризация соответствующих распределенных электронных реестров (блокчейн-реестров) должна выполняться в соответствии с разделением на кластеры, объединяющие элементы, близкие по скорости изменения их динамических характеристик (рис. 1). При этом в зависимости от решаемой задачи (на уровне моделирования динамики или вычисления управляющих воздействий для отдельного элемента, кластера, системы в целом) обращение центра управления происходит непосредственно к тому кластеру ( $CM1, \dots, CMN$ ) блокчейн-реестра, который хранит необходимую базу данных.

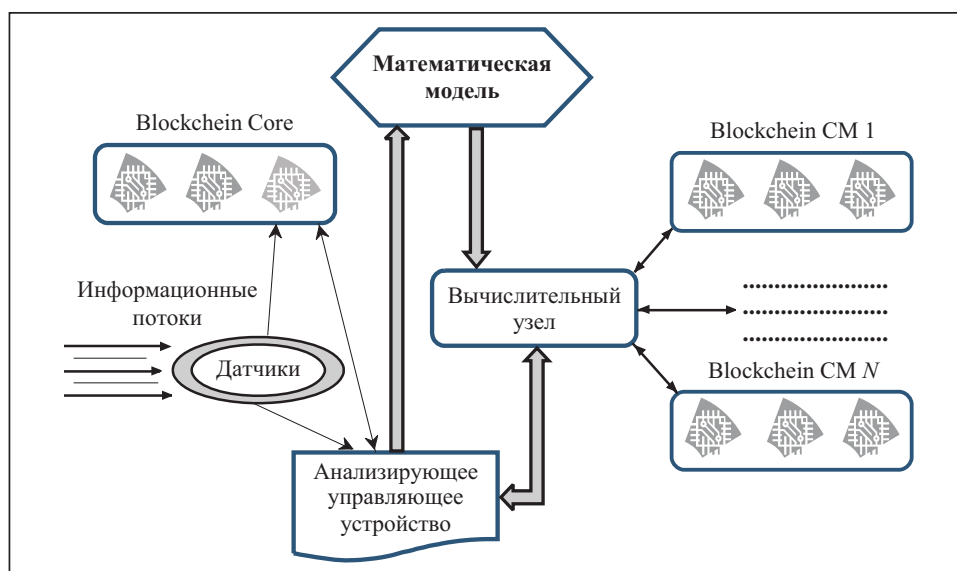


Рис. 1

Такая технология, включающая в себя структурированный распределенный реестр и соответствующий порядок обращений к блокчейн-реестру, оптимизирует работу управляющего центра и уменьшает время отклика. Однако реализация данного подхода (далее называемого технологией кластеризованного, структурированного блокчейна) — формирования и использования структурированного по скорости динамических характеристик многоуровневого блокчейна — связана с решением ряда проблем применяемого математического и программно-алгоритмического обеспечения, в частности с использованием специальных методов декомпозиции, реализующих корректное разделение данных по реестрам и формирование задаче-ориентированных реестров.

Принципиально организация баз данных должна обеспечить возможность формирования полной модели всего объекта, позволяющей при необходимости вычислять (находить) решение задачи управления объектом с учетом всех отдельных процессов, связанных с «первичными» элементами. Возникновение такой задачи в ряде случаев может быть обусловлено тем, что возможны ситуации, когда управление, оптимальное для конкретного кластера, может быть неоптимальным для объекта (системы) в целом.

Рассмотрим применение одного из методов декомпозиции — метода понижения порядка [4] — для решения указанной задачи: расчета оптимального управления сложной динамической системой при использовании технологии структурированного блокчейна.

Полную модель объекта сформируем в виде

$$\dot{v} = \varphi(v, u, t) \quad (1)$$

где  $v$  — вектор фазовых переменных, описывающий динамику процессов, относящихся к объекту,  $u$  — вектор управления. При этом все поступающие данные, описывающие состояние объекта, заносятся в блокчейн-реестр, поскольку полагаем, что исследуемый объект является объектом А-класса.

Учитывая дискретный характер происходящих событий, уравнение (1) перепишем в виде

$$v_{k+1} = v_k + \vartheta f(v_k, u_k, t_k),$$

где  $\vartheta$  — интервал дискретизации, на котором полагаем параметры всего объекта (всех составляющих его элементов) постоянными величинами; искомый вектор управления  $u$  также будем считать постоянным на  $t$ , принадлежащем  $\vartheta$ .

Полагаем, что целью управления является решение стандартной оптимизационной задачи

$$J(u) \rightarrow \underset{u \in U}{\text{extremum}},$$

где

$$J(u) = \int_0^T F(v, u, t) dt.$$

Перейдя к дискретным величинам, запишем [2]

$$J(u) = \vartheta \sum_{k=0}^{N-1} F(v_k, u_k, t_k).$$

Пусть каким-либо известным методом (например, с помощью вычислительных алгоритмов, реализующих теорему Хилленко [5]) определены собственные числа матрицы  $A$ , соответствующей линеаризованному (кусочно-линеаризованному) представлению модели объекта (1), и для них справедливы соотношения

$$\lambda_1 \gg \lambda_2 \gg \dots \gg \lambda_n.$$

Рассмотрим решение задачи оптимального управления объектом для простейшего случая, когда в заданной модели можно выделить два кластера: быстрых и медленных процессов. Тогда, следуя методу понижения порядка [4] и выполнив декомпозицию исходной модели, представим ее в виде

$$\dot{v}_1 = f_1(v_1, v_2, u, t), \quad \dot{v}_2 = f_2(v_1, v_2, u, t).$$

Для каждой субмодели, полученной декомпозицией, сформируем блокчейн-реестр, содержащий базу данных, соответствующую результатам расчета по субмодели.

Соответственно при расчете отдельных составляющих решения или отдельных переменных обращение будет выполняться к той части блокчейна (к тому реестру), которая содержит данные, отвечающие этой субмодели.

Отметим, что после формирования векторов переменных  $v_1$  и  $v_2$  заполнение общего блокчейн-реестра можно осуществлять по кластерам в соответствии с принятым пользователем решением по выбору границы разделения.

Далее, перейдя к вырожденным переменным, запишем

$$f_1(v_1^0, v_2^0, u^0, t) = 0. \quad (2)$$

Задачу оптимального управления для нахождения  $u(t) = u^0(t)$  перепишем в виде

$$J(u^0) \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$v_2^0 = f_2(v_1^0, v_2^0, u^0, t), \quad (4)$$

$$(v^0, u^0) \in G,$$

где соотношение (4) используется как дополнительное ограничение.

Применив равенство (2) в соответствии с общей схемой метода понижения порядка [4], определим быстро меняющиеся составляющие искомого решения и, используя их для уточнения найденного решения, перейдем к новой оптимизационной задаче

$$J(u^1) \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$v_2^1 = f_2(v_1^1, v_2^1, u^1, t), \quad (6)$$

$$f_1(v_1^1, v_2^1, u^1, t) = 0, \quad (7)$$

$$(v^1, u^1) \in G.$$

В соотношениях (5)–(7)  $u^1$  будет учитывать влияние быстро изменяющихся составляющих решения.

В частном случае, если исследуемый объект можно описать тихоновской системой [2, 5]

$$\mu \dot{v}_1 = f_1(v_1, v_2, u, t, \mu), \quad \dot{v}_2 = f_2(v_1, v_2, u, t, \mu),$$

то разделение данных по кластерам реестров в ряде случаев можно выполнить в соответствии с разделением по векторам  $v_1$  и  $v_2$ .

Независимо от формы представления исходной жесткой динамической модели объекта кластеризация распределенного электронного реестра обеспечит повышение быстродействия, так как дает возможность управляющему центру работать с декомпозиционными моделями, а использование декомпозиционных методов, в частности метода понижения порядка, позволит корректно ассемблировать полученные по отдельным субмоделям результаты. Поскольку блок-

чейн-технология обеспечит не только повременной сбор данных, но и гарантированную точность полученной информации, а оптимальное управление объектом предполагает динамическое формирование данных для входящих в нее кластеров (в общем случае их количество и состав могут быть различными на разных интервалах времени), использование блокчейна становится необходимым для обеспечения эффективного управления в режиме реального времени.

Структура информационных потоков заметно усложняется, если исследуемый объект описывается моделью со ступенчатым пограничным слоем [4]. В этом случае может потребоваться многократное решение задачи определения числа быстро и медленно меняющихся составляющих искомого решения [6] и для пограничного слоя будут справедливы соотношения

$$\left| \frac{dv_m}{dt} \right|_{t \geq \tau_{nci}(m)} \ll \left| \frac{dv_m}{dt} \right|_{t < \tau_{ncj}(m)},$$

где  $\tau_{nci}(m)$ ,  $\tau_{ncj}(m)$  — подынтервалы пограничного слоя для  $m$ -й переменной.

Наличие ступенчатого пограничного слоя является основанием для соответствующей кластеризации распределенного электронного реестра, когда разделение базы данных в соответствии со скоростью изменения производных искомым переменных приводит к созданию реструктуризованного блокчейна.

Как отмечено в [4], система уравнений

$$\dot{v}_l = f_l(v_j, t) \quad (l, j = \overline{k+1, n}), \quad (8)$$

полученная из исходной системы (1) подстановкой в каждое  $(k+1)$ -е, ...,  $n$ -е уравнение соотношений

$$v_i(t) = w_i(t) + \Omega_i(v'_q(t), \dots, v'_n(t)), \\ (i = \overline{1, k}; q = \overline{k+1, n}),$$

где функции  $\Omega_i$  — решения подсистемы уравнений

$$f_i(v', t) = 0 \quad (i = \overline{1, k}),$$

полученной из  $k$  первых уравнений системы (1) для  $\dot{v}_i = 0$  (при  $w_i = 0$ ), также оказывается жесткой и алгоритмы метода понижения порядка, разработанные для систем с однородным пограничным слоем, становятся неприменимы. В этом случае необходимо рассматривать систему уравнений (8) как исходную и преобразовывать ее аналогично системе (1). Последовательно осуществляя указанные операции, будем преобразовывать вновь получаемые подсистемы уравнений до тех пор, пока на каком-то, предположим  $s$ -м, шаге не получим нежесткую подсистему.

Таким образом, понижение порядка математических моделей рассматриваемого класса в этом случае выполняется последовательным исключением групп уравнений, размерности которых определяются числом быстро изменяющихся составляющих решения с производными одного порядка по модулю.

Выражения для определения  $v_i^r(t)$  в этом случае имеют вид [4]

$$v_i^r(t) = W_i(t) - \Omega_i^r(v_{q(r)}^r(t), \dots, v_n^r(t)) \\ (i = \overline{K_{r-1} + 1, K_r}).$$

где  $\Omega_i^r$  — решения вырожденной относительно  $v_i$  исходной системы уравне-

ний на  $(r-1)$ -м шаге

$$f_i^{r-1}(v^{r-1}, t) = 0.$$

Отметим, что реализация и использование технологии реструктуризованного блокчейна создает основу для построения оптимальных по быстродействию систем прогнозирования и поддержки принятия решений (СППР) [7–9]. Развитие данного вопроса требует отдельного рассмотрения. Однако заметим, что формирование базы данных, где установлено соответствие между параметрами и коэффициентами упрощенных субмоделей, рассчитанными управляющими воздействиями, полученным результатом и хронологией событий, позволяет, определяя множество Парето, сразу исключать однозначно неоптимальные решения. Тем самым достигается повышение быстродействия СППР за счет высвобождения вычислительного ресурса для расчета приемлемых вариантов и создается основа для перехода от СППР к системе управления с искусственным интеллектом. При необходимости восстановления хронологии событий использование реструктуризованного блокчейна позволяет оптимизировать время выборки поисковых данных.

Технология структуризованного распределенного электронного реестра является инструментом, целесообразность применения которого в каждом конкретном случае — выбор пользователя. Ее эффективность определяется особенностями объекта и спецификой решаемой задачи [10, 11]. В общем случае увеличение размерности математической модели, что, как правило, повышает степень ее жесткости, обуславливает использование такой технологии. При этом преимущества блокчейна расширяются на задачи, эффективный расчет которых требует применения декомпозиционных методов системного анализа.

Использование блокчейн-технологий для динамических систем А-класса дает возможность повысить качество управления за счет применения точных данных, размещенных в распределенных цифровых реестрах. Декомпозиционные методы позволяют сформулировать задачу оптимального управления в стандартном виде, что обеспечивает возможность применить для ее решения математический аппарат системного анализа. Методы декомпозиционного типа позволяют перейти к созданию и использованию технологии реструктуризованного блокчейна, что улучшает характеристики систем управления за счет обращения к конкретным кластерам, содержащим данные, соответствующие решаемой задаче. Такой подход является необходимым шагом внедрения систем искусственного интеллекта, поскольку позволяет, формируя базу знаний неоптимальных решений, высвобождать ресурс управляющего органа для поиска и просчета приемлемых решений в случае возникновения непредвиденных ситуаций в динамике объекта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Helebrandt P., Bellus M., Ries M., Kotuliak I., Khilenko V. Blockchain adoption for monitoring and management of enterprise networks. *IEEE 9th Ann. Inform. Technology, Electronics and Mobile Communic. Conf., IEMCON 2018*. Vancouver, BC, Canada, 2018. P. 1221–1225.
2. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. Москва: Наука, 1981. 487 с.
3. Conte de L.D., Stalick A.Q., Jillepalli A.A., Haney M.A., Sheldon F.T. Blockchain: properties and misconceptions. *Asia Pacific Journal of Innovation and Entrepreneurship*. 2017. Vol. 11, N 3. P. 286–300.
4. Грищенко А.З., Хиленко В.В. Метод понижения порядка и исследование динамических систем. Киев: Учеб.-метод. кабинет высшего образ., 1988. 163 с.
5. Еругин Н.П. Книга для чтения по общему курсу дифференциальных уравнений. Изд. 3-е, перераб. и доп. Москва: Наука и техника, 1979. 744 с.

6. Грищенко А.З., Хиленко В.В. Определение числа быстрых и медленных движений при декомпозиции линейных динамических моделей произвольно большой размерности. *Кибернетика и системный анализ*. 1991. № 6. С. 3–9.
7. Хиленко В.В., Стржеleckи Р., Котуляк И. Решение проблемы динамической адаптивности систем искусственного интеллекта, осуществляющих управление динамическими техническими объектами. *Кибернетика и системный анализ*. 2018. Т. 54, № 6. С. 17–27.
8. Khilenko V. Use of adequate simplification methods for speed and accuracy. *CriMiCo 2001-11th Intern. Conf. increase in controlling systems of integrated telecommunication networks*, Sevastopol (Ukraine), 10–14 Sept. 2001. P. 259–261.
9. Khilenko V. Using algorithms of decomposition for computation of linear stochastic models. *Cybernetics and System Analysis*. 2001. Vol. 37, Iss. 4. P. 596–599.
10. Akhmetov B., Lakhno V., Malyukov V., Zhumadilova M., Kartbayev T. Decision support system about investments in smart city in conditions of incomplete information. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019. Vol. 10, Iss. 2. P. 661–670.
11. Lakhno V., Malyukov V., Domrachev V., Stepanenko O., Kramarov O. Development of a system for the detection of cyber attacks based on the clustering and formation of reference deviations of attributes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3, Iss. 9(87). P. 43–52.

*Надійшла до редакції 18.04.2019*

### **В.В. Хиленко**

#### **ЗАСТОСУВАННЯ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ АСК СКЛАДНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ**

**Анотація.** Розглянуто використання блокчейн-технологій для підвищення якості систем керування складними розподіленими динамічними системами. Наведено технологію структурованого блокчейн-реєстру. Запропоновано вирішення питання вибору математичного апарату для реалізації такої технології.

**Ключові слова:** складна розподілена динамічна система, блокчейн-технології, математичне моделювання, система керування, структурований (кластерований) блокчейн-реєстр, СППР, штучний інтелект.

### **V.V. Khilenko**

#### **APPLICATION OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGIES TO IMPROVE THE QUALITY OF ACS OF COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS**

**Abstract.** The use of blockchain technologies to improve the quality of control systems of complex distributed dynamic systems is considered. The technology of structured blockchain registry is proposed. A solution to the problem of choosing a mathematical apparatus for the implementation of this technology is proposed.

**Keywords:** complex distributed dynamic system, blockchain technologies, mathematical modeling, control system, structured (clustered) blockchain registry, DSS, artificial intelligence.

#### **Хиленко Владимир Васильевич,**

доктор техн. наук, профессор кафедры Национального университета биоресурсов и природопользования Украины, Киев, e-mail: vkhilenko@ukr.net.