

Модели оценки характеристик кинематических информационных систем интернета вещей

Т. Н. Астахова

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет

ctn_af@mail.ru

М. О. Колбанев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет / «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

mokolbanev@mail.ru

Аннотация. Одним из направлений цифровой трансформации является создание систем, особенности которых проявляются в конвергенции физических и информационных процессов. К системам такого рода относятся, в частности, киберфизические системы или цифровые двойники. Эта тенденция находит отражение и в технологиях интернета вещей, для организации эффективного функционирования которых все чаще требуется знать не только пространственные координаты сенсорных устройств, но и правила изменения этих координат во времени. Рассматривается специфический класс систем – кинематические информационные системы (КИС) интернета вещей, в которых топология, вероятностно-временные и вероятностно-энергетические характеристики динамически изменяются вследствие перемещений устройств в компактном пространстве. Предложена стохастическая модель движения устройств КИС на основе уравнений Дубинса с аддитивным шумом, имитирующим внешние возмущения. Разработан метод оценки ключевых характеристик системы, включающий глобальное планирование сеансов связи. Проведен комплексный анализ зависимостей потребляемой энергии и временных задержек от скорости, ускорения и направления движения сенсоров. Численные эксперименты показали, что предложенный подход позволяет снизить энергопотребление на 25–30% в условиях неопределенности траекторий по сравнению со статическим методом, обеспечивая при этом выполнение требований к качеству обслуживания.

Ключевые слова: *временные задержки; интернет вещей; киберфизические системы; кинематические информационные системы; оптимизация расписания; стохастическое моделирование; траектория Дубинса; энергоэффективность*

I. ВВЕДЕНИЕ

Цифровая трансформация различных сфер деятельности невозможна без развития технологий интернета вещей (ИВ), ключевым элементом которых являются сенсорные системы [1, 2]. Традиционные решения базируются на стационарных узлах, однако стремительное развитие робототехники, беспилотных летательных аппаратов и автономных транспортных средств обуславливает переход к мобильным архитектурам. Подвижность узлов открывает новые возможности для расширения зоны покрытия и повышения устойчивости сети, но одновременно создает сложные задачи управления ресурсами, особенно энергопотреблением.

Одним из направлений цифровой трансформации является создание систем, особенности которых проявляются в конвергенции физических и

информационных процессов. К системам такого рода относятся, в частности, киберфизические системы или цифровые двойники [3, 4]. Эта тенденция находит отражение и в технологиях интернета вещей, для организации эффективного функционирования которых все чаще требуется знать не только пространственные координаты сенсорных устройств, но и правила изменения этих координат во времени.

В контексте данных исследований целесообразно ввести понятие кинематической информационной системы. Под кинематической информационной системой (КИС) понимается совокупность связанных между собой сенсорных устройств, собирающих данные в ограниченном пространстве и способных к информационному взаимодействию друг с другом и с центром обработки данных, при условии, что их взаимное расположение и характеристики каналов связи являются функциями времени, определяемыми законами кинематики.

Ключевыми характеристиками КИС, подлежащими оценке и оптимизации, являются:

- потребляемая энергия на передачу данных, зависящая от мгновенного расстояния между узлами и центром обработки, которое изменяется вследствие движения;
- временные задержки доставки пакетов, обусловленные очередностью доступа к каналу связи и необходимостью ожидания благоприятных кинематических условий (сближения узлов);
- точность позиционирования, влияющая на достоверность прогноза момента оптимальной передачи;
- пропускная способность канала, меняющаяся в зависимости от скорости относительного движения и угла ориентации антенн;
- вероятность разрыва соединения, возникающая при выходе узлов за пределы зоны покрытия из-за высоких скоростей или непредвиденных маневров.

Зависимость этих характеристик от скорости, направления движения, ускорения и ограничений на маневренность (минимальный радиус поворота) делает задачу управления ресурсами КИС многомерной и стохастической по своей природе.

Частным случаем КИС являются кинематические сенсорные системы (КСС), ориентированные на сбор

данных. Существующие методы оптимизации в КСС часто опираются на детерминированные модели движения (например, траектории Дубинса), предполагая идеальное следование заданному пути [5]. Однако в реальных сценариях на подвижные узлы действуют стохастические возмущения: порывы ветра, неровности рельефа, погрешности навигации. Игнорирование этих факторов приводит к существенному росту энергозатрат, так как запланированные сеансы связи могут происходить на расстояниях, значительно превышающих прогнозные.

Целью данной работы является разработка моделей оценки ключевых характеристик кинематических информационных систем интернета вещей, которые комплексно учитывают точность позиционирования, временные задержки и энергоэффективность в условиях стохастических возмущений траекторий движения узлов.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: формализация понятия КИС и выделение её основных характеристик; разработка стохастической модели движения узлов на базе уравнений Дубинса; создание алгоритма оптимизации сеансов связи; проведение численного эксперимента для оценки влияния кинематических параметров на энергопотребление и задержки.

Объектом исследования является кинематическая информационная система с топологией «звезда», состоящая из центра управления и обработки информации (ЦУОИ) и множества подвижных узлов $N = \{1, 2, \dots, n\}$. Предметом исследования выступают вероятностно-временные и энергетические характеристики информационного взаимодействия.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ

Предположим, что в двумерном пространстве \mathbb{R}^2 КИС расположен ЦУОИ, который принимает данные от сенсорных узлов и передает их на некоторую цифровую платформу. Взаимодействие между сенсорами и ЦУОИ реализуется при помощи радиотехнологий. Сенсорные узлы имеют автономные источники питания с конечным запасом энергии. ЦУОИ получает питание от сети электропитания. В общем случае энергия расходуется на выполнение цифровых операций: сохранения и обработки, для обеспечения механического движения и для передачи/приема радиосигналов. Отметим, что в настоящей работе не учитывается расход энергии на выполнения операций цифровой обработки данных и обеспечения механического движения. Предполагается, что основным потребителем энергии является технология передачи и приема радиосигналов, которые переносят данные между сенсорными узлами. Требуемая для этого мощность зависит от расстояния между приемной и передающей антеннами, таким образом, что при увеличении расстояния в два раза требуемая мощность может увеличиться в четыре, 8 и более раз. Таким образом, вопрос оптимизации энергопотребления представляет собой ключевую и актуальную проблему, требующую комплексного подхода.

Формально КИС может быть представлена как граф $G(t) = (V, E(t))$, где V – множество узлов, а $E(t)$ – множество ребер, существующих в момент времени t .

В отличие от статических сетей, в КИС множество ребер $E(t)$ является функцией времени и зависит от координат узлов $(x_i(t), y_i(t))$. Связь между узлами i и ЦУОИ возможна только если расстояние между ними не превышает радиус передачи R :

$$\rho_i(t) = \sqrt{(x_i(t) - x_{\text{ЦУОИ}})^2 + (y_i(t) - y_{\text{ЦУОИ}})^2} \leq R \quad (1)$$

Изменения координат узлов определяет устойчивость топологии сети. Если устройства перемещаются хаотично, частота разрывов связей возрастает, что приводит к увеличению энергозатрат на повторную маршрутизацию и росту временных задержек доставки данных. Поэтому критически важным становится учет кинематических ограничений самих устройств (максимальная скорость, минимальный радиус разворота).

Для описания движения узлов КИС предложено использовать модель, основанную на уравнениях Дубинса. Данная модель описывает движение объектов с неголономными ограничениями, таких как колесные роботы или транспортные средства, которые не могут двигаться боком и имеют ограниченный радиус поворота.

Однако в реальных условиях на движение влияют внешние возмущения (неровности поверхности, порывы ветра, ошибки одометрии). Для учета этих факторов в модель введен аддитивный шум, таким образом стохастическая модель движения узла i описывается системой стохастических дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} dx_i(t) &= v_i \cos \theta_i(t) dt + \sigma_{x,i} dW_{x,i}(t), \\ dy_i(t) &= v_i \sin \theta_i(t) dt + \sigma_{y,i} dW_{y,i}(t), \\ d\theta_i(t) &= \omega_i(t) dt + \sigma_{\theta,i} dW_{\theta,i}(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $x_i(t), y_i(t)$ – координаты i -го узла в двумерном пространстве; t – время, v_i – линейная скорость, θ_i – угол ориентации, ω_i – угловая скорость i -го узла, $W_{x,i}, W_{y,i}, W_{\theta,i}$ – винеровские процессы, dt – дифференциал времени; dW – дифференциал винеровского процесса, а σ – параметры интенсивности шума. Использование данной модели позволяет оценивать вероятностные характеристики пребывания узла в зоне покрытия шлюза или другого узла сети, что существенно влияет на модель энергопотребления, потому как расстояние до ЦУиОИ становится случайной функцией времени.

III. МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК

На основе модели движения формируются целевые функции для оценки ключевых характеристик КИС.

A. Энергоэффективность

Мгновенная мощность передачи $P_r^i(t)$ определяется по формуле Фрииса [6]:

$$P_r^i(t) = \frac{P_r(t)}{G_{tr} G_r} \left(\frac{4\pi \rho_i(t)}{\lambda} \right)^2,$$

где $P_r(t)$ – мощность сигнала на входе приемной антенны центра управления и обработки информации в момент времени t ; $P_r^i(t)$ – мощность передачи i -го узла; G_{tr}, G_r – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн соответственно; λ – длина волны сигнала.

Поскольку координаты узлов являются случайными процессами, требуемая мощность передачи $P_{tr}^i(t)$ для обеспечения заданного порога приема $P_r^{\min}(t)$ также становится случайной величиной. Для целей оптимизации расписания целесообразно использовать математическое ожидание мощности передачи:

$$\bar{P}_i(t_k) = \mathbb{E} \left[\frac{P_r^{\min}}{G_{tr} G_r} \left(\frac{4\pi\rho_i(t_k)}{\lambda} \right)^2 \right],$$

где $\mathbb{E}[\cdot]$ – оператор математического ожидания; t_k – момент начала k -го временного слота. Вычисление математического ожидания в аналитическом виде затруднено из-за нелинейности зависимости мощности от расстояния. Поэтому для оценки $\bar{P}_i(t_k)$ используется метод статистических испытаний (Монте-Карло). Генерируется множество реализаций траекторий движения узлов согласно модели (2), для каждой реализации вычисляется расстояние по формуле (1) и соответствующая мощность. Среднее значение по всем реализациям принимается в качестве оценки стоимости передачи для данного узла в данный временной слот.

В. Алгоритм оптимизации расписания сеансов связи.

Задача формирования расписания передачи данных формулируется как задача о назначениях. Необходимо сопоставить каждый сенсорный узел с уникальным временным слотом внутри цикла передачи таким образом, чтобы суммарное ожидаемое энергопотребление системы было минимальным.

Введем бинарную переменную x_{ik} , равную 1, если i -му узлу назначается k -й временной слот, и 0 – в противном случае. Целевая функция оптимизации имеет вид:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \bar{P}_i(t_k) \cdot x_{ik}, \quad (3)$$

где N – количество сенсорных узлов в системе; $\bar{P}_i(t_k)$ – оценка математического ожидания мощности передачи для i -го узла в k -м слоте.

Ограничения задачи обеспечивают уникальность назначения:

$$\sum_{k=1}^N x_{ik} = 1, \forall i = 1, \dots, N, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ik} = 1, \forall k = 1, \dots, N. \quad (5)$$

Уравнение (4) гарантирует, что каждый узел передаст данные ровно один раз за цикл. Уравнение (5) гарантирует, что в каждом временном слоте будет работать только один узел, исключая коллизии.

Для решения задачи (3)–(5) применяется венгерский алгоритм [7], что позволяет пересчитывать оптимальное расписание в режиме реального времени на каждом цикле работы системы, адаптируясь к обновленным данным о начальном положении узлов и параметрах шумов.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Численные эксперименты проводились для сети из 10 сенсорных узлов, движущихся по траекториям Дубинса с аддитивным шумом (рис. 1). Временной цикл был разделен на 10 равных временных окон. Координаты узлов рассчитывались на основе интегрирования уравнений движения. Расстояние до ЦУОИ определялось евклидовой метрикой (рис. 2). Пусть известны: начальное положение и ориентация каждого i -го узла – (x_i, y_i) ; координаты ЦУОИ (головного узла); частота передачи $f=8,68 \cdot 10^8$ Гц; коэффициенты усиления антенны: $G_{tr}, G_r = 1$; мощность, принимаемой антенны $P_r^{\min} = 2,2 \cdot 10^{-11}$ Вт.

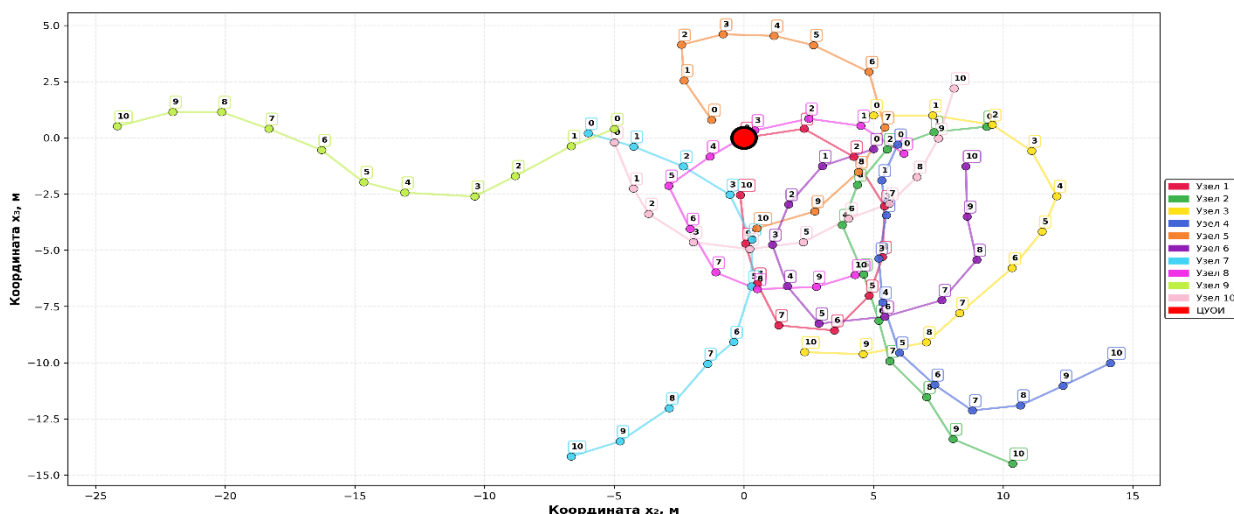


Рис. 1. Траектории движения сенсорных узлов

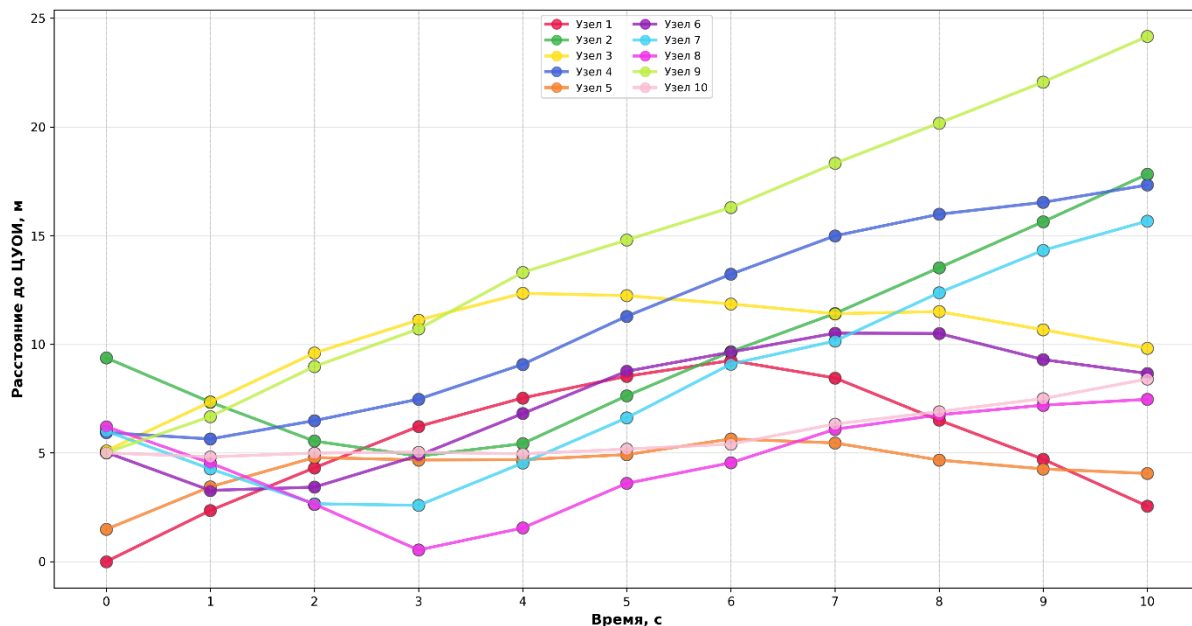


Рис. 2. Зависимость расстояния от времени

Параметры движения: линейная скорость $v=5$ м/с, максимальная угловая скорость $\omega_{\max}=1$ рад/с. Проведено сравнение двух стратегий распределения временных слотов:

- статическая. Закрепление слотов за узлами неизменно на всех циклах (базовый сценарий).
- стохастическая. Оптимизация расписания с использованием предложенной стохастической модели и оценкой математического ожидания мощности. Интенсивность шумовых возмущений варьировалась в диапазоне $\sigma \in [0; 0,5]$ для имитации различных условий внешней среды (от спокойной до турбулентной) (рис. 3). Для оценки математического ожидания в стохастической стратегии использовалось 1000 реализаций траекторий на шаг планирования. Результаты усреднения по 100 циклам работы системы представлены на рис. 4.

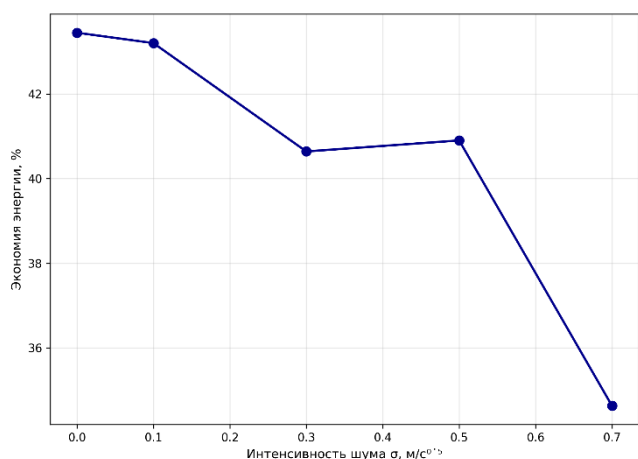


Рис. 3. Зависимость эффективности оптимизации от уровня стохастических возмущений

Анализ результатов показывает, что при отсутствии возмущений ($\sigma=0$) детерминированная стратегия

демонстрирует эффективность, обеспечивая экономию около 29,8 % энергии по сравнению со статическим распределением [8]. Однако с ростом уровня неопределенности эффективность детерминированного метода снижается. Игнорирование стохастических отклонений приводит к тому, что узлы передают данные в моменты, когда реальное расстояние оказывается больше прогнозного, что требует экспоненциального роста мощности сигнала.

Предложенная стохастическая модель позволяет компенсировать этот эффект. За счет учета вероятностного разброса траекторий алгоритм назначает слоты с запасом, выбирая моменты времени, когда вероятность нахождения узла в зоне благоприятной связи максимальна. При максимальном уровне шума в эксперименте ($\sigma=0,5$) выигрыш стохастического метода над детерминированным составил дополнительно 12–15 % энергопотребления.

Внедрение стохастической модели движения в задачу оптимизации сеансов связи позволяет повысить робастность кинематической информационной системы. Ключевым преимуществом подхода является учет не только среднего положения узла, но и дисперсии его возможного местоположения.

Важно отметить, что вычислительная сложность метода возрастает за счет необходимости проведения серии моделирований для оценки математического ожидания. Однако использование эффективных схем численного интегрирования (например, метод Эйлера–Маруямы [9]) и полиномиальная сложность венгерского алгоритма позволяют укладываться в временные ограничения циклов управления для сетей среднего размера (до 50–100 узлов).

На рис. 5 представлена матрица ожидаемой мощности и оптимальное расписание для информационного взаимодействия каждого узла с ЦУОИ.

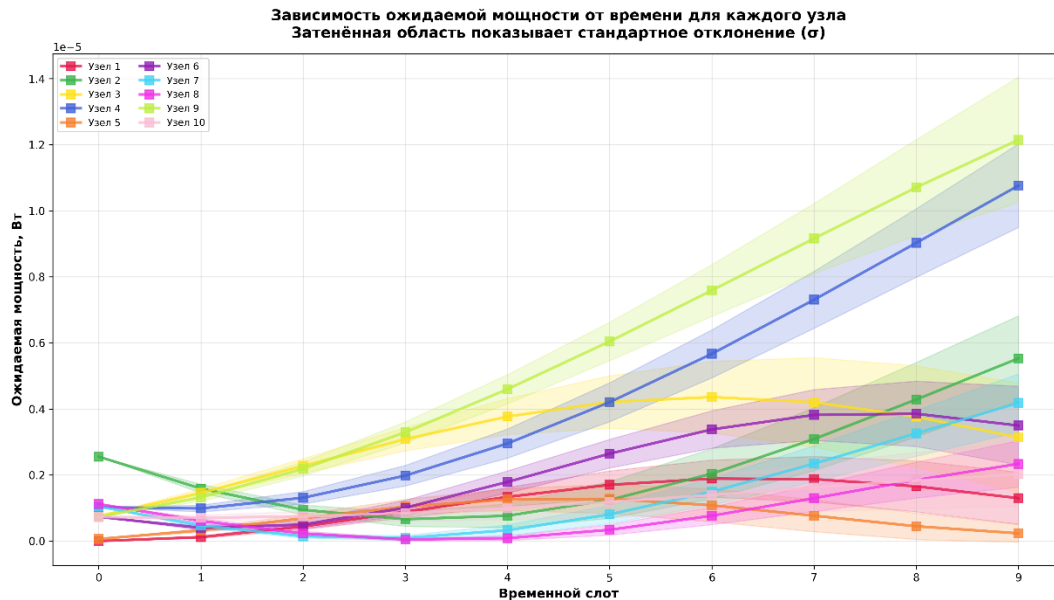


Рис. 4. Зависимость ожидаемой мощности от времени

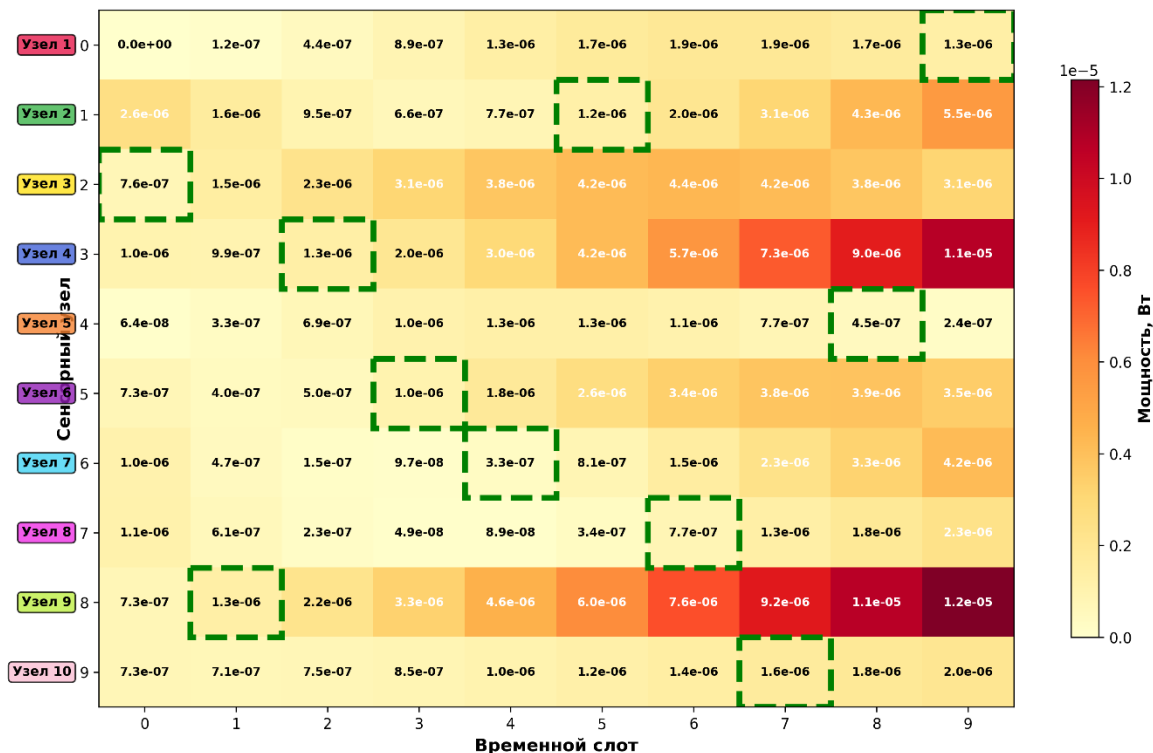


Рис. 5. Матрица ожидаемой мощности и оптимальное расписание

Учет стохастичности становится критически важным для систем, функционирующих в нестабильных средах (подводные аппараты, беспилотники в условиях ветра, наземные роботы на пересеченной местности).

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен новый класс систем – кинематические информационные системы (КИС) интернета вещей. Введено формальное определение КИС, учитывающее динамическое изменение топологии сети вследствие перемещения узлов в пространстве. Предложена стохастическая модель движения устройств на основе уравнений Дубинса с аддитивным шумом, позволяющая учитывать внешние возмущения (ветер,

неровности рельефа, погрешности навигации) и неголономные ограничения подвижных объектов.

Разработан метод оценки и оптимизации характеристик системы, сочетающий глобальное планирование сеансов связи с помощью венгерского алгоритма и локальную оценку энергозатрат на основе метода статистических испытаний (Монте-Карло). Такой подход позволяет формировать расписание передачи данных с учетом вероятностного разброса траекторий, минимизируя математическое ожидание потребляемой мощности.

Проведенный анализ зависимостей потребляемой энергии и временных задержек от кинематических

параметров сенсоров подтвердил эффективность подхода. Численные эксперименты показали снижение энергопотребления на 25–30% по сравнению со статическим распределением временных слотов. Кроме того, представлено преимущество стохастической модели перед детерминированной в условиях неопределенности: при высоком уровне шумовых возмущений выигрыш в энергоэффективности составляет дополнительно 12–15% за счет учета дисперсии местоположения узлов.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением модели на трехмерное пространство для сценариев использования беспилотных летательных аппаратов, а также интеграцией моделей цифровых двойников для предиктивного управления сетью и оценки масштабируемости алгоритма на сети размером более 100 узлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Vermesan O., Friess P. (ed.). *Digitising the industry internet of things connecting the physical, digital and VirtualWorlds*. CRC Press, 2022. 337 p.
- [2] Astakhova T. et al. A model for estimating energy consumption seen when nodes of ubiquitous sensor networks communicate information to each other // *CEUR Workshop Proceedings*, 2019.
- [3] ISO/TR 24464–2025 – Automation systems and integration – Industrial data – Visualization elements of digital twins. <https://www.iso.org/standard/88262.html>
- [4] SO/IEC 30141:2024 – Internet of Things (IoT) – Reference architecture. <https://www.iso.org/standard/88800.html>
- [5] Dubins L.E. On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents // *American Journal of mathematics*, 1957. V. 79(3). P. 497-516.
- [6] Friis H.T. et al. A note on a simple transmission formula // *Proc. IRE*. 1946. V. 34 (5). P. 254-256.
- [7] Kuhn H.W. The Hungarian method for the assignment problem // *Naval research logistics quarterly*. 1955. T. 2(1-2). P. 83-97.
- [8] Астахова Т.Н., Колбанёв М.О., Советов Б.Я. Метод оптимизации сеансов связи в кинематической сенсорной системе // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2026, с. 145–153. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-145-153
- [9] Кузнецов Д.Ф. *Стохастические дифференциальные уравнения: теория и практика численного решения с программами в среде MATLAB / Издание шестое, перераб. и дополн.* Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2018. 1073 p.