

Вопросы автоматизации проектирования инфраструктуры рециклинга

Р. И. Сольнищев¹, Г. А. Куприянов²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина);
Международный институт инжиниринга в экологии и безопасности человека
Санкт-Петербург, Россия
¹remira70@mail.ru, ²science@help-in.ru

Аннотация. Рассматриваются принципы сквозного проектирования инфраструктуры рециклинга твёрдых коммунальных отходов на основе САПР. В составе математического обеспечения данной САПР представлены модели и алгоритмы вычисления детерминированных и вероятностных её характеристик. Показаны направления разработки данной САПР в части программного и информационного обеспечения.

Ключевые слова: охрана природы; проектирование; САПР; моделирование; рециклинг; экология

I. ВВЕДЕНИЕ

Здесь рассмотрены вопросы построения математического обеспечения САПР инфраструктуры рециклинга (ИР), предназначенной для раздельного сбора и утилизации отходов как вторичного сырья в рамках замкнутой системы управления «Природа-Техногеника» (ЗСУПТ) [1]. В соответствии со структурой ИР [4], математические модели ИР используются в дальнейшем на всех этапах её проектирования, осуществляемого инструментарием САПР ИР [2, 3].

II. СКВОЗНОЙ ПРОЦЕСС ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ РЕЦИКЛИНГА КАК ОБЪЕКТА С ВЕРОЯТНОСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Рассмотрим ИР и её компоненты с вероятностными характеристиками на процедурах проектирования и в производстве. Вероятностные математические модели (ММ) на этапах проектирования и производства строятся по отношению к новым переменным – плотностям вероятностей случайных функций. Эти функции являются наиболее полными характеристиками физических, технических, экологических и социальных процессов динамики, представляемых стохастическими ММ.

Сквозной процесс проектирования ИР и подготовки её производства на всех этапах, сопровождаемый стохастическими математическими моделями и вероятностными характеристиками, представлен в виде схемы на рис. 1. Здесь начальные плотности вероятностей случайных функций и величин $P_0(Y_0, \Lambda_0, t_0)$ задаются по априорным или по уточнённым реальным данным. Таковыми являются: данные технического задания на проектирование ИР; данные пересчёта предыдущих

плотностей вероятности, v , в параметры Λ_0 по результатам структурорских расчетов; v , как функция предыдущих плотностей вероятностей, ξ , полученных по результатам испытаний; ξ по предыдущим, полученным по техническим характеристикам комплектующих. Также обозначены: L_k – операторы (математические модели), P_{k0} – начальные значения соответствующих плотностей вероятностей (индекс k принимает значения от 1 до 4).

Математические модели звеньев самой ИР можно представить в виде передаточных функций, как будет показано ниже, или в виде дифференциальных уравнений в форме Коши:

$$\dot{Y} = f(Y, \Lambda, t) \quad (1.1)$$

с начальными условиями Y_0 . Заметим, что пересчёт начальных условий по плотностям вероятностей производится как в прямом, так и в обратном направлении. Именно, при переходе к нулевым начальным условиям для дифференциального уравнения (1.1) имеет место неявная алгебраическая зависимость параметров Λ и начальных условий Y_0 , что даёт возможность установить её и при переходе к плотностям вероятностей и использовать при пересчёте:

$$F(P_{Y_0}, P_\Lambda) = 0 \quad (1.2)$$



Рис. 1. Сквозной процесс проектирования ИР, сопровождаемый стохастическими ММ и вероятностными характеристиками

В отличие от детерминированного подхода при оценке состояния звеньев ИР, начальные условия Y_0 являются случайными величинами с известным законом распределения.

Переход от (1.1) к дифференциальным уравнениям в частных производных относительно плотностей вероятностей осуществляется методами статистической физики. Результат их решения – плотности вероятностей переменных состояния ИР, вычисляемые на каждом этапе её проектирования. По ним могут быть определены математические ожидания и дисперсии искомых переменных состояния звеньев ИР: масс, объёмов, скоростей перемещения вторичных ресурсов и прочих.

III. СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНФРАСТРУКТУРЫ РЕЦИКЛИНГА С ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ

Предлагается подход к математическому моделированию ИР в виде передаточных функций с запаздываниями [4], который предполагает получение выражения для её переходной матрицы, связывающей её входные и выходные величины. Примем в их качестве количественные характеристики (массы, объёмы) раздельно собранных и, соответственно, прошедших через ИР фракций вторичного сырья из состава твёрдых коммунальных отходов (ТКО):

$$\begin{cases} \vec{\mathbf{R}}(p) = \hat{\mathbf{W}}(p) \vec{\boldsymbol{\omega}}(p) \\ \vec{\mathbf{R}}(p) = (y_{nN}(p), \quad n = 1..Q)^T \\ \vec{\boldsymbol{\omega}}(p) = (x_{ji}(p), \quad i = 1..N_j, \quad j = 1..M)^T \end{cases} \quad (2.1)$$

Далее ограничимся рассмотрением ИР без обратных связей, полагая незначительным количество возвращаемых на повторную обработку и хранение вторичных ресурсов. Выходные величины в (2.1) представляются вектором значений, получаемых по результатам перемещения вторичных ресурсов от хранилища к хранилищу, сопровождаемого запаздываниями и иными преобразованиями, каждый компонент которого может быть выражен следующим образом:

$$\begin{cases} y_N(p) = \frac{v_N e^{-p\tau_N}}{1 + T_N p} \cdot \left(\frac{x_N(p)}{A_N + B_N p} + y_{N-1}(p) \right) \\ y_1(p) = \frac{v_1 e^{-p\tau_1}}{1 + T_1 p} \cdot \frac{x_1(p)}{A_1 + B_1 p} \end{cases} \quad (2.2)$$

Можно убедиться, что выражения (2.2) линейны относительно компонент вектора входных величин:

$$y_N(p) = \sum_{k=1}^N Y_k(p) \cdot e^{-p\mu_k} \cdot x_k(p) \quad (2.3)$$

Поэтому из них может быть получена передаточная матрица с коэффициентами при экспонентах в виде дробно-рациональных функций:

$$\hat{\mathbf{W}}(p) = \begin{Bmatrix} Y_{11}(p) \cdot e^{-p\mu_{Q1}} & \dots & Y_{1N}(p) \cdot e^{-p\mu_{1N}} \\ \dots & \dots & \dots \\ Y_{Q1}(p) \cdot e^{-p\mu_{Q1}} & \dots & Y_{QN}(p) \cdot e^{-p\mu_{QN}} \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

Экспоненты в передаточной матрице могут быть заменены их аппроксимациями Паде или разложениями в ряды Маклорена. Передаточную матрицу (2.4) затем целесообразно отобразить во временную область в виде передаточной матрицы с помощью обратного преобразования Лапласа [5] вида (2.5) и использовать в вычислениях, например, с помощью интеграла Дюамеля (2.6) в предположении, что все начальные условия известны:

$$\vec{\mathbf{W}}(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{\hat{\mathbf{W}}(p)}{p} \right] = \frac{1}{2\pi i} \int_{a-i\infty}^{a+i\infty} \hat{\mathbf{W}}(p) \cdot \frac{e^{pt}}{p} dp \quad (2.5)$$

$$\vec{\mathbf{R}}(t) = \hat{\mathbf{W}}(t) \cdot \vec{\boldsymbol{\omega}}(0) + \int_0^t \hat{\mathbf{W}}(t-\tau) \cdot \frac{d}{dt} \vec{\boldsymbol{\omega}}(t) \cdot d\tau \quad (2.6)$$

Наряду со стохастическим вариантом, возможен кусочно-детерминированный вариант применения данного подхода к моделированию ИР:

- параметры звеньев в заданных временных интервалах считаются постоянными, вычисляемыми как математические ожидания соответствующих случайных величин
- существенные изменения какого-либо параметра звена могут дать начало новому временному интервалу
- в заданных интервалах времени ИР представляется в виде линейной детерминированной системы с запаздываниями
- отклик системы на этих интервалах предлагается рассчитывать с помощью интеграла Дюамеля (2.6).

Также представляет интерес задача об оптимальном управлении полученной системой. Некоторые подходы, которые можно адаптировать к данной задаче, предложены в [6, 7]. И в связи с тем, что ИР зависит от состояния транспортной инфраструктуры, необходимо решение транспортных задач на основе математических моделей логистики [8]. Методы проектирования систем, представленных моделями (2.1), (2.2), рассмотрены в [9]. Отдельным направлением исследования может стать использование математического аппарата нечеткой логики [10] в целях совершенствования методов управления подсистемами ИР.

IV. РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАРИЯ САПР ИР

Физически ИР как подсистема ЗСУПТ [1] входит в её замкнутый контур как подсистема рециклинга отходов, где она занимает место между потребителями готовой продукции и заготовителями вторичных ресурсов,

связанных обратными связями через рынки и поставщиков вторичных ресурсов и их покупателей – изготовителей продукции и рынки её сбыта (рис. 2).

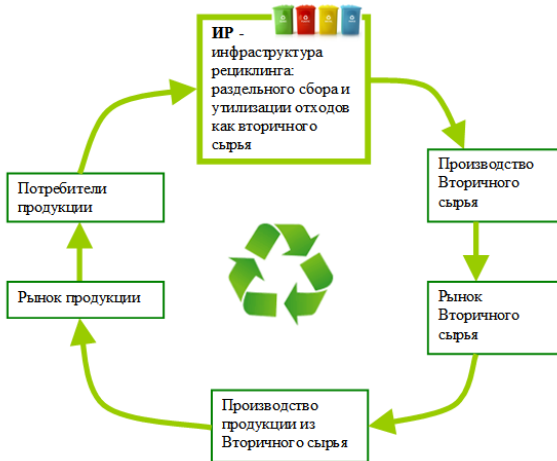


Рис. 2. Место ИР в замкнутом цикле в качестве контура ЗСУПТ

Как объект проектирования ИР может быть представлена следующими подсистемами:

- входные: «умные» контейнеры и контейнерные площадки, автоматизированные пункты приёма и машины обратного вендинга;
- передаточные: специализированные транспортные средства и системы, парки и депо; специализированные склады и логистические центры; перерабатывающие предприятия и сортировочные станции;
- выходные: склады и центры приёма обработанного передаточными подсистемами ИР вторичного сырья.

Обеспечить моделирование, анализ и синтез технологических и логистических процессов, получение решений, обеспечивающих функционирование подсистем ИР, поможет соответствующий инструментарий САПР. Рассмотрим прототип программного обеспечения (ПО) инструмента САПР ИР для моделирования и визуализации структуры ИР, на основе которой затем предполагается автоматизированное построение математических моделей, в частности – передаточной матрицы (2.4). Графический интерфейс пользователя изображён на рис. 3. В процессе эксплуатации данного ПО пользователь размещает на схеме в интерактивном режиме объекты (узлы, «nodes») трёх типов, соответствующих перечисленным выше подсистемам:

- входные, соответствующие входным величинам в (2.1). На рис. 3 показан как “Smart Waste Container”
- передаточные, по взаимосвязи которых должна быть построена унифицированная матрица (2.4). На рис. 3 показан как “Supply Chain Item”.

- выходные, соответствующие выходным величинам в (2.1). На рис. 3 показан как “Result”.

Для размещения объектов на схеме используется стандартная техника «drag-and-drop». Помимо самих узлов пользователь создаёт и связи между ними. Он соединяет узлы линиями, а именно – кривыми Безье с указанием направления связи, которые отображаются при захвате входов и выходов по этой технике. На рис. 4. показана визуализация структуры ИР размерности 2 x 6. Звенья ИР крупным планом показаны на рис. 5.

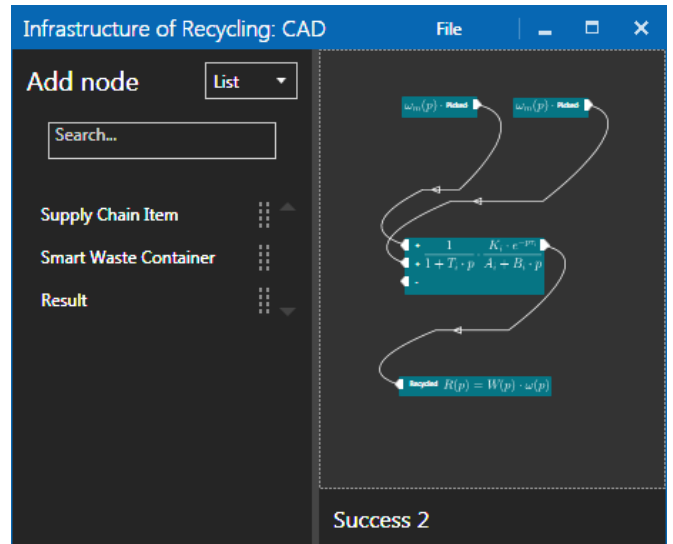


Рис. 3. Прототип графического интерфейса пользователя ПО инструмента САПР для моделирования ИР

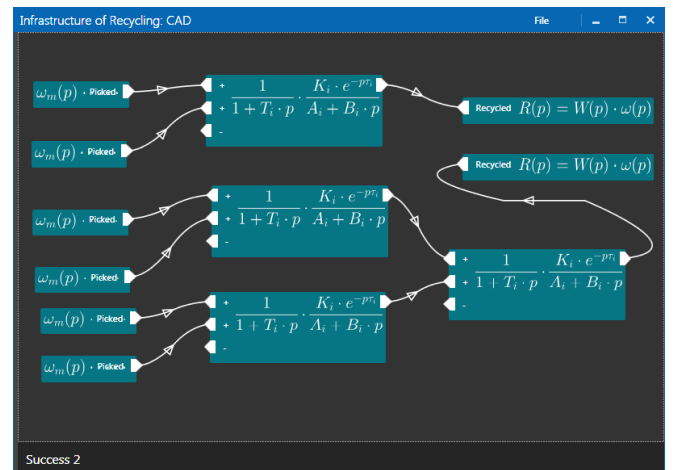


Рис. 4. Визуализация структуры ИР для построения математических моделей в ПО САПР ИР

Хранение информации о структуре ИР как об ориентированном графе предполагается в базе данных как составной части информационного обеспечения САПР ИР. Также целесообразна разработка соответствующего открытого формата данных.

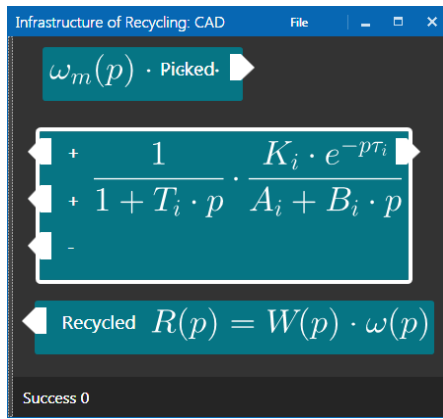


Рис. 5. Визуализация звеньев ИР крупным планом

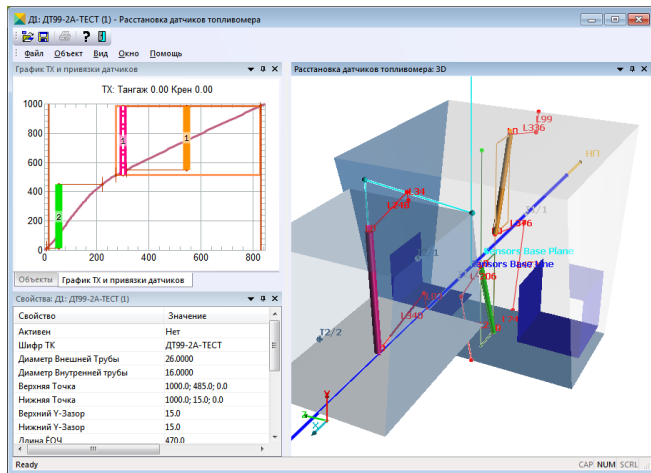


Рис. 6. Графический интерфейс ПО САПР топливоизмерительных систем летательных аппаратов «Расстановка датчиков топливомера»

На настоящем этапе разработки САПР хранение данных обеспечивается файлами формата JSON, который содержит список узлов с их идентификаторами, координатами (как на структурной схеме, так и геококация) и типами (входные, передаточные, выходные) и список соединений с идентификаторами узлов и индексами входов и выходов.

В заключение следует отметить необходимость создания ПО САПР и для конструкторского проектирования подсистем ИР. Ранее разработан инструмент САПР топливоизмерительных систем летательных аппаратов «Расстановка датчиков топливомера» [11], ПО которого может быть адаптировано к решению задач проектирования «умных» контейнеров и остальных компонент инфраструктуры в части геометрического моделирования и инженерных расчётов. В его составе реализована, в частности, 3D-визуализация

триангулированных поверхностей, а также автоматический расчёт и визуализация размеров между базами отсчёта и относительно них (рис.6).

V. ПЕРСПЕКТИВЫ

Описанные выше подходы к созданию САПР инфраструктуры рециклинга состоят в развитии предложенных математических моделей, методов, алгоритмов и прототипов. Помимо математического и программного обеспечения, необходима разработка информационного обеспечения САПР ИР. В частности, процесс проектирования ИР требует создания базы знаний, которая должна включать информацию о начальных условиях, начальных законах распределения всех используемых величин и о методах расчётов, полученных по результатам математического моделирования. Также представляется уместным децентрализованное, общедоступное и защищённое от изменений для повышения достоверности хранение данных о состоянии эксплуатируемой ИР в blockchain, что даст возможность непрерывно пользоваться ими для уточнения её параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Сольнищев Р.И., Коршунов Г.И. Системы управления «природо-техногенника». СПб.: Политехника, 2013. 205 с.
- [2] Куприянов Г.А., Сольнищев Р.И. Задачи проектирования и эксплуатации природоохранной инфраструктуры как единой сложной системы. // Тез. докл. на XXI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2018).
- [3] Куприянов Г.А., Сольнищев Р.И. Проектирование инфраструктуры раздельного сбора и утилизации вторичного сырья. // Тез. докл. на I Международной конференции «Управление муниципальными отходами как важный фактор устойчивого развития мегаполиса» (WASTE'2018).
- [4] Куприянов Г.А., Сольнищев Р.И. Подходы к математическому моделированию инфраструктуры раздельного сбора и утилизации вторичного сырья. // Тез. докл. на XXII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2019).
- [5] Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. -М.: Наука, 1971, 288 с.
- [6] Живоглядов В.П. Об оптимальном дуальном управлении объектами с чистым запаздыванием, Автомат. и телемех., 1964, том 25, выпуск 1, 54–66
- [7] Ульрих М. О некоторых вероятностных методах автоматического управления, Автомат. и телемех., 1964, том 25, выпуск 1, 67–72
- [8] Тюхтина А.А. Математические модели логистики, Транспортная задача: Учебно-методическое пособие. Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. Нижний Новгород, 2016. 65 стр.
- [9] Сольнищев Р.И. Автоматизация проектирования систем автоматического управления. М.: Высшая школа, 1991.
- [10] Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления: монография / В. И. Гостев. К.: Радиоаматор, 2008. 972 с.
- [11] Г.А. Куприянов. Вопросы автоматизации проектирования топливоизмерительных систем летательных аппаратов в интересах безопасности // Доклад на конференции IEN'S'2007