

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина)

# МОЛОДЕЖНАЯ ШКОЛА-СЕМИНАР

по проблемам управления в технических системах  
имени А.А. Вавилова

27 мая 2022

## СБОРНИК ДОКЛАДОВ



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

---

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

---

**Молодежная школа-семинар  
по проблемам управления в технических  
системах имени А. А. Вавилова**

*посвященная 100-летию  
со дня рождения ученого*

**27 мая 2022**

Санкт-Петербург  
2022

УДК 681.5(08)

Библиографическое  
описание

Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова, посвященная 100-летию со дня рождения ученого. Ежегод. журн. / Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Электрон. журн. – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. 74 с. – Режим доступа к журн.: –[https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2022/sbornik\\_2022.pdf](https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2022/sbornik_2022.pdf) – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-7629-3045-1

ISBN 978-5-7629-3045-1

© СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022

# Оценка параметров математической модели продольного движения в режимах динамического позиционирования с одновременной оценкой течения

Д. А. Голиков

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
dagolikov37@gmail.com

**Аннотация.** В работе рассматривается задача определения параметров математической модели продольного движения судна в режимах динамического позиционирования. Используются результаты натурных данных системы Navis NavDP4000. Особенность предлагаемого алгоритма заключается в том, что одновременно выполняется оценка продольной составляющей течения, а также на модели анализируется информативность выполняемых калибровочных маневров в зависимости от свойств судна.

**Ключевые слова:** динамическое позиционирование, идентификация, математическая модель движения судна

## I. ВВЕДЕНИЕ

Система динамического позиционирования (принятое сокращение СУ ДП – система управлением динамическим позиционированием) – автоматическая система управления движением судна, обеспечивающая координированное управление средствами управления движением с целью обеспечения следующих режимов: удержание в точке, управление от дрейфа, удержание курса на малых ходах, управление на маршруте, управление вектором скорости и различные специализированные режимы. [2, 3, 4]

Системы динамического позиционирования разрабатываются рядом компаний, среди лидеров – Kongsberg Maritime, ABB, General Electric, Navis Engineering, Praxis Automation Technology. Система динамического позиционирования Navis NavDP4000 – семейство систем классов DP0, DP1, DP2, для управления различными судами.

Алгоритмы обработки данных, управления движением (формирования заданных сил), распределения упоров [6] (требуемых сил по средствам управления) системы ДП требуют иметь настроенную упрощенную математическую модель, которая адекватно отражает: массу судна (как меру инерционности) с присоединенными массами, значения швартовых упоров всех средств управления в зависимости от создаваемых управляющих воздействий  $F_i = F(u_i)$ , а также позиционные гидродинамические характеристики судна [5] (что позволяет адекватно оценивать течение, действующее на судно. Только после того, как встроена математическая модель настроена,

производится настройка собственно алгоритмов управления движением.

Настройка системы динамического позиционирования производится в ходе испытаний. Первый этап – швартовые испытания, во время которых производится калибровка электрических сигналов системы. На втором этапе – в ходе морских испытаний – производится идентификация математической модели и настройка алгоритмов управления движением. Условия проведения испытаний не идеальны, возможно существенное течение и ветер. В отличие от ветра, течение в режимах малых ходов движения судна не измеряется (или измеряется при помощи лага с существенными погрешностями), что не позволяет использовать эти измерения для работы системы. Поэтому, задача быстрого и эффективного определения параметров модели остается актуальной.

Стоит отметить, что в данной работе рассмотрен случай продольного движения судна. Параметры бокового и вращательного движения настраиваются аналогичным образом.

### A. Калибровочный маневр

При настройке продольного движения системы NavDP4000 используется калибровочный маневр, показанный на рис. 1. Калибровочный маневр представляет собой маневр, суть которого заключается в установлении зависимости между рассчитанными по натурным данным параметрами динамики движения судна и полученными путём моделирования. В данном случае – это знакопеременный процесс подачи управляющего сигнала на объект управления с целью сохранения скорости судна в заданных пределах относительно земли.

В ходе маневра записывается положение судна по GPS и курс по компасу. Дискретность записи соответствует измерениям (1 Гц для GPS, 10 Гц для компаса). Также происходит фиксация управляющего воздействия, которое определяется квадратом оборотов двигателя.

В случае, когда главные движители – винторулевые неререверсивные колонки (ВРК), обратная тяга реализуется поворотом ВРК. Чтобы создать тягу вперед, ВРК выставляется с нулевыми углами, чтобы создать

тягу назад – с углами 180°. В процессе поворота ВРК тяга сбрасывается до минимального (по возможности нулевого) значения.

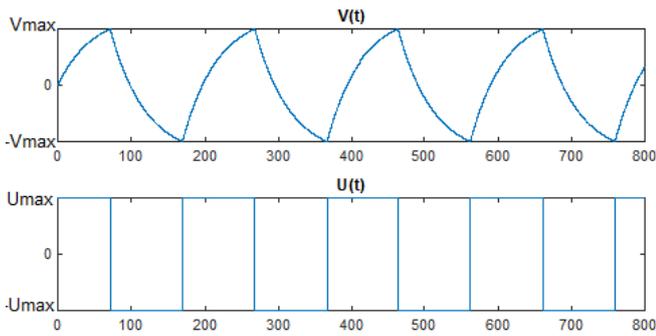


Рис. 1. Калибровочный маневр (продольное движение)

### В. Моделирование движения судна в калибровочном маневре

Рассмотрим продольное движение судна на малых ходах:

$$m \frac{dV_{xg}}{dt} = -R(V_p) + F_u(V_p, U_x(t)) + F_w,$$

где управляющая сила  $F_u$  создается средствами управления, например, винторулевыми колонками, и зависит от управляющего воздействия  $U_x$ , который определяется отношением квадратов подаваемых оборотов  $n$  и максимальных оборотов главного двигателя (ГД):

$$U_x = \frac{n|n|}{n_{\max}^2}$$

а также от скорости набегающего на винт потока  $V_p$ , складывающегося из скорости судна относительно земли  $V_{xg}$  и скорости течения  $V_c$ :

$$V_p = V_{xg} - V_c$$

сопротивление движению  $R(V_p)$  определяется скоростью движения судна относительно жидкости; возмущающая сила  $F_w$  определяется воздействием ветра, течения, волнения.

Тяга гребного винта квадратично зависит от оборотов ГД:

$$T = \rho D^4 n^2 K_1(J),$$

где  $\rho$  – плотность морской воды;  $D$  – диаметр гребного винта;  $K_1$  – безразмерный коэффициент тяги, который в свою очередь зависит от поступи гребного винта  $J$ :

$$J = \frac{V_p}{nD}$$

Упрощенное уравнение имеет вид:

$$\frac{dV_x}{dt} = k_2 (V_x - V_c) |V_x - V_c| + b_1 U_x, \quad (1)$$

где  $k_2$  – гидродинамический коэффициент:

$$k_2 = -\frac{\rho \Omega C_x}{2},$$

где  $\Omega$  – площадь смоченной поверхности;  $C_x$  – коэффициент сопротивления движению судна, который остается постоянным для водоизмещающего режима движения;  $b_1$  – коэффициент управления.

Коэффициент управления  $b_1$  равен тяге, которая подается на движители в швартовом режиме работы, но т. к. исходное динамическое уравнение движения (1) поделено на водоизмещение, то необходимо учесть его при расчете:

$$b_1 = \frac{T_{\max}}{m},$$

где  $T_{\max}$  – максимальная развиваемая суммарная тяга движителей,  $m$  – водоизмещение судна.

Опробуем процедуру оценки параметров  $k_2$ ,  $b_1$  по данным моделирования.

В качестве примера возьмем DP-2 судно NN Algeiba длиной 67 метров, шириной 13 метров, водоизмещением 3015 т, оборудованное двумя винторулевыми колонками мощностью 2x900 кВт (рис. 2). Данное судно относится к типу судов снабжения платформ (offshore support vessel). Основной функцией большинства этих судов является материально-техническое обеспечение и транспортировка товаров, инструментов, оборудования и персонала к морским нефтяным платформам и другим морским сооружениям.



Рис. 2. NN Algeiba. Вид судна

По характеристикам судна были определены следующие эталонные параметры модели:

$$k_2 = -\frac{\rho \Omega C_x}{2} = -0.0014$$

$$b_1 = \frac{T_{\max}}{m} = 0.1033$$

С учетом поворотов винторулевой колонки, продольная тяга, возникающая на винте, рассчитывается:

$$T_{px} = T \cos\left(\frac{\alpha\pi}{180}\right),$$

где  $\alpha$  – угол поворота винторулевой колонки.

### С. Оценивание параметров маневра по данным моделирования

Уравнение (1) линейно по искомым параметрам  $k_2$ ,  $b_1$ , поэтому для их нахождения можно применить метод наименьших квадратов для следующего матричного уравнения:

$$f = F \cdot \theta, \quad (2)$$

где

$$F = [V|V, \quad u]$$

$$f = \left[ \frac{dV_x}{dt} \right]$$

$$\theta = [k_2, \quad b]$$

На самом деле, из-за неидеальности эксперимента уравнение (2) не выполняется, на данном этапе возникает ошибка расчета, которая определяется:

$$e = \left| F \cdot \theta - \frac{dV_x}{dt} \right|$$

Относительная ошибка оценивания коэффициентов:

$$E = \frac{\|e\|}{\left\| \frac{dV_x}{dt} \right\|}$$

В таблице приведены результаты оценки параметров модели на данных моделирования в предположении нулевого течения.

По полученным данным видно, что:

- коэффициент управления  $b_1$  по исследуемой модели определяется хорошо во всех проведенных экспериментах, что свидетельствует об эффективности средств управления;
- гидродинамический коэффициент  $k_2$  определяется хорошо без течения по исследуемой модели, при условии, что максимальная допустимая в эксперименте скорость и управляющий сигнал соразмерны по величине.

ТАБЛИЦА I ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

Опыт №	$U_{max}, \%$	$V_{max}, \text{м/с}$	$V_{теч}, \text{м/с}$	$k_{2м}/k_2$	$b_{1м}/b_1$	$E$
1	0.5	1	0	0.9614	0.9591	0.031
2	0.2	1	0	1.0000	0.9441	0.037
3	0.9	1	0	1.5300	0.9513	0.066
4	0.4	1	0	0.9470	0.9576	0.030
5	0.5	0.5	0	0.8834	0.9745	0.026
6	0.5	1.5	0	1.0078	0.9432	0.039
7	0.5	0.2	0	0.8228	0.9812	0.026
8	0.9	0.5	0	2.1854	0.9553	0.072
9	0.5	1	0.3	0.9833	0.9571	0.040
10	0.5	1	-0.9	1.6255	0.9289	0.084
11	0.5	1	-0.3	1.0607	0.9551	0.041

Введем модификацию в модель, добавив параметр – неизвестное продольное течение. По скорости течения модель не является линейной. Найдем этот параметр  $V_c$  из минимума ошибки оценивания – рис. 3. Точка минимума ошибки соответствует предполагаемому продольному течению, и для этой точки могут быть определены параметры  $k_2$ ,  $b_1$ . Применим эту процедуру к данным натурных испытаний.

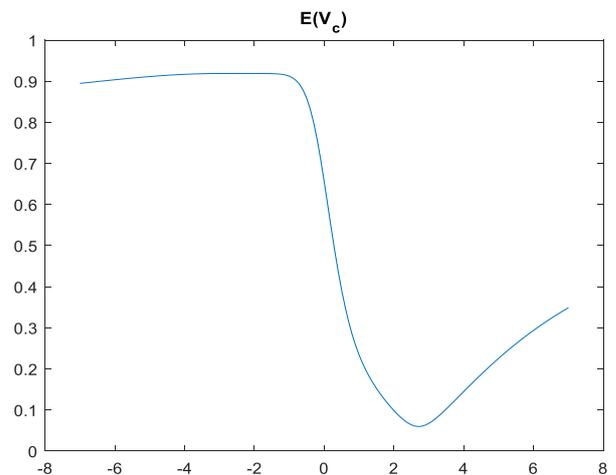


Рис. 3. Пример определения течения по ошибке оценивания параметров

### Расчет параметров движения судна в режиме ДП по натурным данным

В ходе испытаний выполнялись различные калибровочные маневры, в том числе тест, приведенный на рис. 4. Полученные данные о скоростях и ускорениях определены путем обработки данных о координатах судна по GPS и компасу в частотной области.

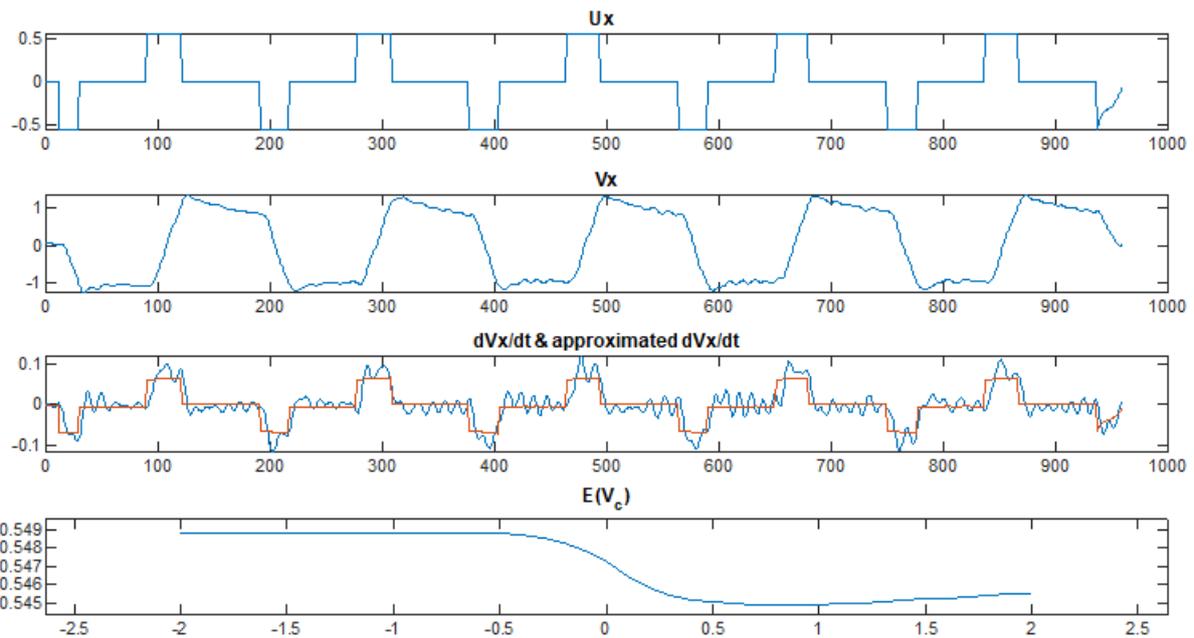


Рис. 4. Пример определения течения по ошибке оценивания параметров

Было получено, что в ходе эксперимента было встречное течение 0.8 м/с, коэффициенты, определенные по натурным данным:  $k_2 = 1.51 \cdot 10^{-3}$ ,  $b_l = 0.123$ , что соответствует  $C_x = 7.59 \cdot 10^{-3}$ .

## II. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая повсеместное использование систем автоматического управления, можно сделать вывод, что задача оптимизации нахождения неизвестных параметров является очень актуальной в наше время. В данной работе была реализована оценка параметров продольного движения судна в условиях динамического позиционирования с одновременной оценкой течения, определение которого является практически невозможным при движении на малых ходах. Оценка проводилась с помощью моделирования реальных маневров судна NN Algeiba в среде MATLAB. Материалом исследований послужили натурные данные испытаний системы Navis NavDP4000. Выявлено, что рассмотренный метод работает не только на идеальной модели, но и применим к реальным испытаниям, путем определения течения, сопоставляя эталонные коэффициенты и коэффициенты рассчитанные при

минимальной ошибке оценивания течения. Выявлено, что коэффициенты, определенные по натурным данным очень близки к эталонно-рассчитанным по характеристикам судна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] J. Dang, H. Laheik, Hydrodynamic Aspects of Steerable Thrusters. Drunen, the Netherlands, September 28-30, 2004.
- [2] H. Fay, Dynamic Positioning Systems, Principles, Design and Applications. Paris, France: Editions Technip, 2005.
- [3] Лукомский Ю.А., Чугунов В.С. Системы управления морскими подвижными объектами: Учебник. Л.: Судостроение, 1988. 272 с., ил.
- [4] Амбросовский В.М., Корнев А.С. Лукомский Ю.А., Шпекторов А.Г. Координированное управление морскими подвижными объектами / под ред. Ю.А. Лукомского. СПб: Изд-во СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2016. 128 с.
- [5] Амбросовский В.М., Амбросовская Е.Б. Математические модели движения переднего хода МПО для отладочных стендов // Деп. рук. ВИНТИ от 14.06.2018 (N62-B2018).
- [6] A. Proskurnikov, E. Ambrosovskaya. Thrust ability diagrams for multi-thruster marine vessels // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), Arezano, 19–21 сентября 2012 года. Arezano, 2012. P. 152-157. DOI 10.3182/20120919-3-IT-2046.00026. EDN SLGIBP.

# Колесная одометрия мобильного робота

П. В. Абрамов<sup>1</sup>, С. М. Богданова<sup>2</sup>, А. П. Бондарчук<sup>3</sup>, Е. А. Келлер<sup>4</sup>

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

<sup>1</sup>pvaabramov@etu.ru, <sup>2</sup>smbogdanova@etu.ru, <sup>3</sup>apbondarchuk@etu.ru, <sup>4</sup>lizz\_kell2016@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается решение задачи колесной одометрии для мобильного робота с полным управлением и полным приводом. Для этого была подробно и с полным выводом формул решена прямая задача кинематики. Так как данные для колесной одометрии поступают с энкодеров, установленных на всех колесах робота, то была проведена фильтрация данных фильтром скользящей средней и  $\alpha\beta$ -фильтром. Приведены графики ошибки от коэффициента ошибки.

**Ключевые слова:** колесная одометрия, прямая задача кинематики, мобильный робот, фильтр

## I. ВВЕДЕНИЕ

Одометрия – это средство оценки перемещения в пространстве. Существуют различные виды одометрии: колесная одометрия, визуальная одометрия, стереовизуальная одометрия, лидарная одометрия, радарная одометрия. У всех видов есть свои достоинства и недостатки, но в нашем мобильном роботе применяется колесная одометрия. Колесная одометрия – это использование данных о движении приводов для оценки перемещения [1]. Была выбрана эта технология, так как она имеет множество достоинств для сферы применения нашего робота. Например, такие как: высокая точность измерений ориентации и местоположения в отличие от других систем, у которых есть помехи; непрерывность снятия данных; недорогая реализация. В колесной одометрии используем энкодеры на каждом колесе для считывания угла поворота колес. Но так как данные с энкодеров зашумлены, то необходимо их фильтровать. Gersdorf, В. И Frese, Udo используют фильтр Калмана для того, чтобы сгладить данные и убрать шумы [2]. В рассмотрении этой проблемы и при написании статьи [3–4] также применяют фильтр Калмана.

Рассматриваемый робот имеет 4WS4WD (4 Wheel Steer, 4 Wheel Drive, 4; полное управление, полный привод) кинематику. Система 4WS4WD – это технология, которая обеспечивает независимое управление всех четырех колес мобильного робота [5]. Поэтому в отличие от роботов, которые за основу берут кинематику Аккермана и дифференциальной системой и характерной для нее кинематикой, решение задачи колесной одометрии будет нетривиальным.

## II. ПРЯМАЯ ЗАДАЧА

Для того, чтобы оценить местоположение мобильного робота первоначально необходимо определить скорость, угол отклонения и угловую скорость вращения. Перейдем к решению этой задачи. Так как энкодеры расположены на всех четырех колесах, то мы получаем их углы и скорости. Поэтому решением

прямой задачи кинематики будет определение угла отклонения, угловой скорости и линейной скорости центра масс мобильного робота по полученным четырем углам отклонения колес и скоростям их вращения с энкодеров.

Отметим то, что есть три варианта движения мобильного робота:

- робот движется прямолинейно (угловая скорость  $\omega = 0$ , скорость центра масс робота  $V \neq 0$ );
- робот вращается вокруг собственной оси (угловая скорость  $\omega \neq 0$ , скорость центра масс робота  $V = 0$ );
- смешанное движение робота (угловая скорость  $\omega \neq 0$ , скорость центра масс робота  $V \neq 0$ ).

На рис. 1 представлена схема четырехколесного мобильного робота со схематическим решением прямой задачи кинематики. Он движется под углами отклонения переднего левого, переднего правого, заднего левого и заднего правого колес к горизонтальной оси своей базы –  $\delta_{FL}$ ,  $\delta_{FR}$ ,  $\delta_{RL}$ ,  $\delta_{RR}$  и при линейных скоростях переднего левого, переднего правого, заднего левого и заднего правого колес –  $V_{FL}$ ,  $V_{FR}$ ,  $V_{RL}$ ,  $V_{RR}$ . Эти данные мы будем получать с датчиков.

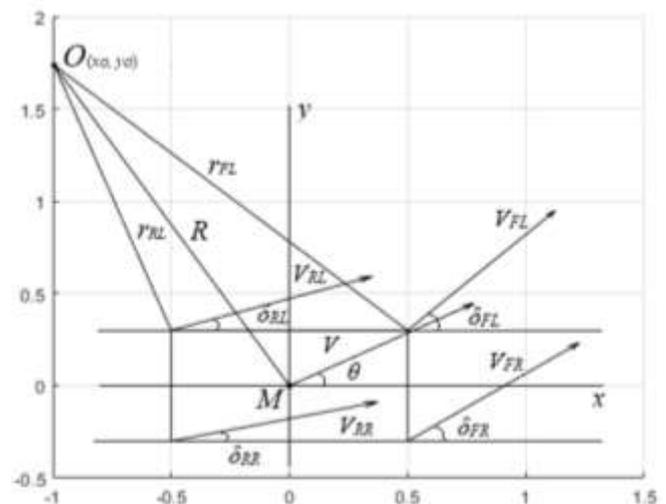


Рис. 1. Схема мобильного робота для решения прямой задачи кинематики

На рис. 1 представлены следующие условные обозначения:  $(x, y)$  – система координат;  $M$  – центр масс робота;  $O$  – центр вращения;  $(x_0, y_0)$  – координаты центра вращения;  $\theta$  – угол отклонения центра масс;  $R_2$  – радиус вращения центра масс;  $V$  – линейная скорость центра масс робота;  $r_{FL}$ ,  $r_{RL}$  – радиусы вращения

переднего левого и заднего левого колес мобильного робота соответственно.

Первоначально решим графически прямую задачу кинематики. Сначала определим координаты центра вращения робота. Выбираем два любых колеса и строим перпендикуляры к углам отклонения колес, потому что они являются касательными к радиусам вращения колес. Это будет центр вращения мобильного робота  $O$  с координатами  $(x_o, y_o)$ . Для примера возьмем переднее левое и заднее левое колеса. Центр вращения определяется по двум колесам, так как данные с энкодеров приходят с шумом и радиусы вращения всех четырех колес не пересекутся в одной точке. Далее проводим прямую из центра вращения мобильного робота к его центру масс, это будет радиус вращения  $R$  или радиус кривизны траектории. Под прямым углом к нему направляем курс отклонения мобильной базы, это будет угол отклонения  $\theta$ .

Теперь перейдем к аналитическому решению прямой задачи кинематики. Общей точкой для радиусов вращения двух колес будет центр вращения мобильного робота  $O$ . Поэтому, воспользовавшись уравнением прямой, координатами переднего левого и заднего левого колеса запишем систему для них:

$$\begin{cases} \frac{W}{2} = \operatorname{tg} \left( \delta_{FL} + \frac{\pi}{2} \right) \cdot \frac{L}{2} + b_{FL} \\ \frac{W}{2} = \operatorname{tg} \left( \delta_{RL} + \frac{\pi}{2} \right) \cdot \left( -\frac{L}{2} \right) + b_{RL} \end{cases} \quad (1)$$

где  $b_{FL}, b_{RL}$  – смещение по оси  $y$  для переднего левого и заднего левого колес.

Выразим  $b_{FL}, b_{RL}$  из уравнений системы (1) и найдем координату  $x_o$ , исходя из того, что при пересечении радиусы вращения имеют общую точку. Получаем:

$$x_o = \frac{\left( \frac{W}{2} + \operatorname{tg} \left( \delta_{RL} + \frac{\pi}{2} \right) \cdot \frac{L}{2} \right) - \left( \frac{W}{2} - \operatorname{tg} \left( \delta_{FL} + \frac{\pi}{2} \right) \cdot \frac{L}{2} \right)}{\operatorname{tg} \left( \delta_{FL} + \frac{\pi}{2} \right) - \operatorname{tg} \left( \delta_{RL} + \frac{\pi}{2} \right)} \quad (2)$$

Подставив (2) и  $b_{FL}$  в уравнение прямой, найдем  $y_o$ :

$$y_o = \operatorname{tg} \left( \delta_{FL} + \frac{\pi}{2} \right) \cdot x_o + \left( \frac{W}{2} + \operatorname{tg} \left( \delta_{RL} + \frac{\pi}{2} \right) \cdot \frac{L}{2} \right)$$

Отсюда получили координаты точки вращения мобильного робота. Выше было сказано, что ее мы вычисляем по двум радиусам вращения колес, поэтому для большей точности вычислим координаты точки вращения для всех пар колес, а потом усредним все полученные значения.

Определим радиус вращения для дальнейшего решения прямой задачи кинематики:

$$R = \sqrt{x_o^2 + y_o^2} \quad (3)$$

Из полученных значений формулы (3) и вариантов движения робота определим три случая при решении прямой задачи кинематики.

Если  $R = \infty$ , тогда:

$$\begin{cases} \theta = \delta_{FL} \\ V = V_{FL}, \text{ при } R = \infty, \\ \omega = 0 \end{cases}$$

где  $\omega$  – угловая скорость центра масс.

Если  $R = 0$ , тогда:

$$\begin{cases} \theta = 0 \\ V = 0 \\ \omega = \frac{V_{FL}}{r_{FL}}, \text{ при } R = 0; \end{cases}$$

Так как все угловые скорости равны, то применив формулу  $R = V/\omega$  можно найти угловую скорость для центра масс. Для этого найдем радиус вращения любого из колес. Для примера определим для переднего левого колеса:

$$r_{FL} = \sqrt{\left( \frac{L}{2} - x_{o\text{ср}} \right)^2 + \left( \frac{W}{2} - y_{o\text{ср}} \right)^2},$$

где  $x_{o\text{ср}}, y_{o\text{ср}}$  – усредненные координаты центра вращения.

Во всех остальных случаях:

$$\begin{cases} R = R, \text{ при } x_o > 0, y_o > 0 \text{ и } x_o < 0, y_o > 0 \\ R = -R, \text{ при } x_o < 0, y_o < 0 \text{ и } x_o > 0, y_o < 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \theta = \operatorname{arctg} \left( \frac{x_o}{y_o} \right), \text{ при } x_o > 0 \text{ и } y_o > 0 \\ \theta = \operatorname{arctg} \left( \frac{-x_o}{y_o} \right), \text{ при } x_o < 0 \text{ и } y_o > 0 \\ \theta = \operatorname{arctg} \left( \frac{-x_o}{-y_o} \right), \text{ при } x_o < 0, y_o < 0 \\ \theta = \operatorname{arctg} \left( \frac{x_o}{-y_o} \right), \text{ при } x_o > 0 \text{ и } y_o < 0 \end{cases}$$

Определим линейную скорость и угловую скорость центра масс мобильного робота через угловую скорость.

Получаем его угловую скорость вращения:

$$\omega = \frac{V_{FL}}{r_{FL}} \quad (4)$$

Следовательно, из формулы (4) и  $R = V/\omega$  получаем скорость центра масс мобильного робота:

$$V = \omega \cdot R.$$

Таким образом, из решения прямой задачи кинематики получаем угол отклонения, угловую скорость и линейную скорость центра масс мобильного робота, которые необходимы для решения задачи одометрии.

### III. КОЛЕСНАЯ ОДОМЕТРИЯ

Теперь переходим к решению задачи колесной одометрии. Под ее решением будем понимать оценку текущего положения центра масс мобильного робота в глобальной системе координат по полученным значениям из прямой задачи кинематики.

На рис. 2 схематично представлен четырехколесный мобильный робот, который перемещается в глобальной системе координат –  $(x, y)$ , при этом у него есть локальная система координат –  $(x_r, y_r)$ ; также другие обозначения:  $M$  – центр масс робота;  $(x_M, y_M)$  – координаты центра масс;  $\theta$  – угол отклонения центра масс в координатах робота;  $V$  – линейная скорость центра масс робота;  $\sigma$  – угол отклонения центра масс в глобальных координатах.

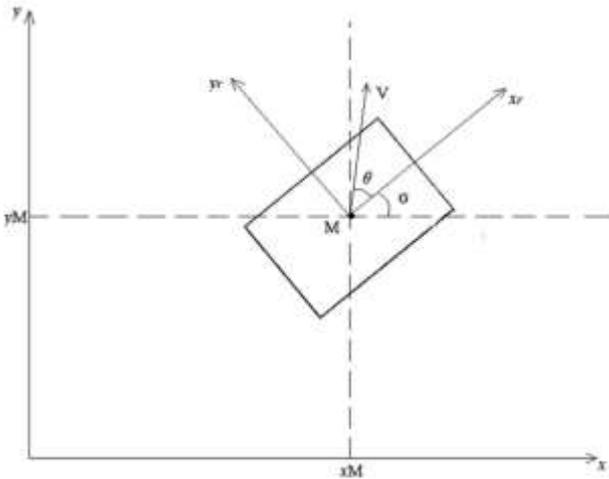


Рис. 2. Схема мобильного робота в глобальных координатах для решения задачи колесной одометрии

Перейдем к аналитическому решению задачи колесной одометрии. Первоначально спроецируем полученную линейную скорость  $V$  из прямой задачи, которая находится под углом отклонения  $\theta$ , на локальную ось координат мобильного робота  $(x_r, y_r)$ . Получим систему уравнений скоростей:

$$\begin{cases} V_{x_r} = V \cdot \cos(\theta) \\ V_{y_r} = V \cdot \sin(\theta) \end{cases}$$

Таким образом, полученные скорости будут иметь направление по осям координат  $(x_r, y_r)$  мобильного робота. Теперь необходимо спроецировать эти скорости на глобальную систему координат  $(x, y)$ . Запишем уравнения в форме производных, а также определим производную угла поворота  $\sigma$ :

$$\begin{cases} \dot{x}_M = V_{x_r} \cos(\sigma) - V_{y_r} \sin(\sigma) \\ \dot{y}_M = V_{x_r} \sin(\sigma) + V_{y_r} \cos(\sigma) \\ \dot{\sigma} = \omega_2 \end{cases} \quad (5)$$

Для решения системы дифференциальных уравнений (5) применим метод Эйлера, при нулевых начальных условиях. Метод Эйлера – это простейший численный метод решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Чтобы узнать координаты мобильного робота в будущем, то есть состояние системы дифференциальных уравнений, необходимо к настоящему состоянию системы прибавить изменение, которое произошло за  $\Delta t$ , то есть производную. Значит, оценкой положения робота будет система (6), которая определяется по формуле Эйлера:

$$\begin{cases} x = x_0 + \Delta t \cdot \dot{x}_M \\ y = y_0 + \Delta t \cdot \dot{y}_M \\ \sigma = \sigma_0 + \Delta t \cdot \dot{\sigma} \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, мы получаем координаты и угол движения мобильного робота. Для их дальнейшего определения необходимо вновь в качестве начальных условий задать значения, полученные при решении системы дифференциальных уравнений, то есть из системы (6):

$$\begin{cases} x_0 = x \\ y_0 = y \\ \sigma_0 = \sigma \\ \Delta t = const \end{cases} \quad (7)$$

И далее снова подставив (7) в систему (6) найдем искомые координаты и угол положения робота в глобальных координатах  $(x, y)$  в следующий момент времени.

В результате получаем решение системы дифференциальных уравнений, то есть оценку положения центра масс мобильного робота в глобальных координатах. Следовательно, получено решение навигационной задачи – определение собственного положения робота на основе колесной одометрии.

### IV. ФИЛЬТРАЦИЯ

Данные приходящие с энкодеров, установленных на всех 4 колесах мобильного робота, приходят с шумом, поэтому необходимо применять фильтры. Для моделирования движения робота и снятия данных, а также для решения прямой задачи кинематики была написана программа в среде Matlab. Были составлены матрицы из значений углов и скоростей колес и к ним добавлена случайная матрица, умноженная на коэффициент шума.

Определим графически зависимость ошибки угла отклонения, радиуса и скорости центра масс робота от коэффициента ошибки при применении фильтра скользящего среднего и  $\alpha\beta$ -фильтра. Будем выполнять программу несколько раз с разными коэффициентами шума.

Применим к углам отклонения четырех колес и их скоростям, значения которых зашумлены, фильтр скользящего среднего.

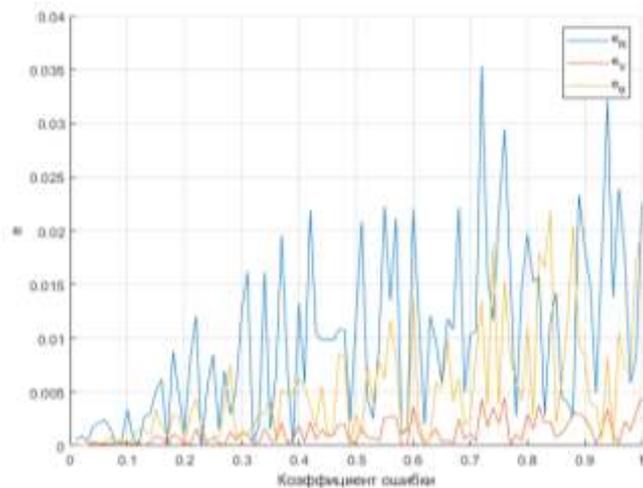


Рис. 3. Графики зависимостей ошибки скорости и радиуса вращения и угла отклонения центра масс мобильного робота от коэффициента ошибки при применении фильтра скользящего среднего (13 отсчетов).

По рис. 3 видим, что максимальная погрешность получаемых данных не превышает 4 %. Полученным данным можно доверять при всех коэффициентах ошибки. Но недостатком большого количества отсчетов является большая задержка фильтра.

Применим еще один фильтр к входящим сигналам для решения прямой задачи кинематики —  $\alpha$ -фильтр. Попробуем настроить  $\alpha$ -фильтр, чтобы на всем промежутке изменения коэффициента ошибки можно было доверять полученным данным.

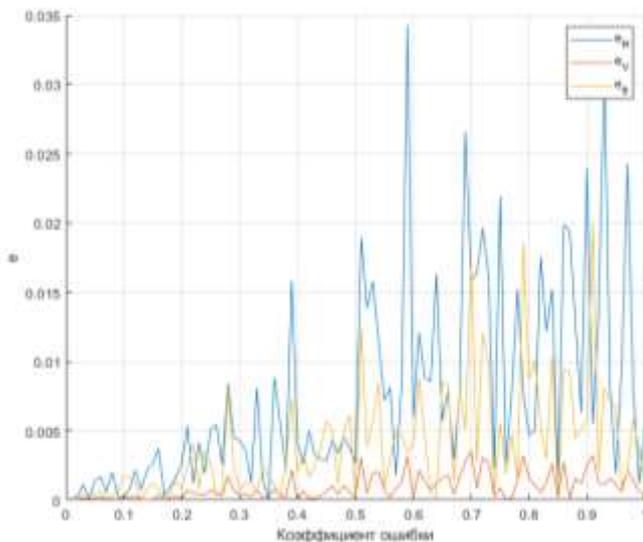


Рис. 4. Графики зависимостей ошибки скорости и радиуса вращения и угла отклонения центра масс мобильного робота от коэффициента ошибки при применении  $\alpha$ -фильтра

По рис. 4 видим, что максимальная погрешность не превышает 3,5 %. Ошибка вычисления скорости и радиуса вращения и угла отклонения центра масс мобильного робота уменьшилась при всех коэффициентах от 0 до 1.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, была рассмотрена прямая задачи кинематики мобильного робота с использованием технологии 4WS4WD и его колесная одометрия. Показан процесс решения схематически на рисунках и аналитически с выводом формул кинематики робота с полным управлением и полным приводом. Проведена фильтрация входных сигналов различными фильтрами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Studwood.net. [Электронный ресурс] – Одометрия как основа для навигации мобильных роботов. – URL: [https://studwood.net/570647/informatika/odometriya\\_osnova\\_navigatsii\\_mobilnyh\\_robotov](https://studwood.net/570647/informatika/odometriya_osnova_navigatsii_mobilnyh_robotov). (Дата обращения: 10.05.2022).
- [2] Gersdorf B., Frese Udo. (2013). A Kalman filter for odometry using a wheel mounted inertial sensor. ICINCO 2013 - Proceedings of the 10th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. 1. 388-395.
- [3] Zacharie M. (2011). GPS and Discrete Kalman Filter for Indoor Robot Navigation. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 5, 1635-1641.
- [4] Fazekas M., Gáspár P., & Németh B. (2021). Calibration and Improvement of an Odometry Model with Dynamic Wheel and Lateral Dynamics Integration. Sensors, 21(2), 337.
- [5] Spentzas K.N., Alkhazali I., Demic M. "Kinematics of four-wheel-steering vehicles," Forschung im ingenieurwesen. 2001. pp. 211-216.

# Исследование биологической очистки на предприятии ИДАВАНГ Агро по моделям нитрификации, денитрификации и ASM1

А. В. Андреев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
a-sanya01@mail.ru

**Аннотация.** Представлено исследование модели нитрификации и денитрификации с целью установления применимости полученных параметров как к самим указанным моделям, так и к полной модели ASM1.

**Ключевые слова:** нитрификация, денитрификация, кислород, бактерии-нитрификаторы, гетеротрофы

## I. ВВЕДЕНИЕ

В животноводческом комплексе ИДАВАНГ Агро, занимающимся выращиванием свиней есть потребность очистки стоков. Разумеется, система очистки на рассматриваемом производстве уже присутствует. Однако, несмотря на ее эффективность (параметры после очистки соответствуют ПДУ) и оригинальное техническое решение она имеет недостаток – сразу же после предварительной фильтрации (очистки стоков от механических примесей), то есть на начальных стадиях очистки от химических примесей, в атмосферу здания предприятия выделяется аммиак. Данное явление в течение длительного времени негативно сказывается на самой технике, потому персоналу периодически приходится заниматься поиском проблемы и своевременно ее исправлять. Разумеется из-за остановки процесса на данном этапе в течение продолжительного времени процессы могут встать и на механическом этапе. Подробнее сама система очистки описана в [1].

Следовательно, в качестве альтернативы, имеет смысл рассмотреть биологическую очистку стоков, которая лишена данного недостатка, после этапа механической фильтрации. Следует отметить, что такой тип очистки уже применялся на предприятии, однако тогда оно носило иное название под другим собственником.

## II. МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРЕДПРИЯТИЯ

В качестве базовой модели биологической очистки принимается модель активного ила 1 (Active Sludge Model 1 или ASM1). В виду сложности ее математической модели имеет смысл для начала рассмотреть процессы нитрификации и денитрификации по-отдельности.

Для рассмотрения моделей с предприятия были получены следующие данные:

- $S_o^{BX} = 6 \text{ г/м}^3$  – входная концентрация растворенного кислорода,

- $S_{nh}^{BX} = 30 \text{ г/м}^3$  – входная концентрация аммонийного азота,
- $S_{no}^{BX} = 18.6 \text{ г/м}^3$  – входная концентрация нитратного азота,
- $S_{цел}^{BX} = 6.5 \text{ экв/м}^3$  – входное значение щелочности,
- $V = 2700 \text{ м}^3$  – объем реактора (единственный параметр, известный с времен применения биологической очистки на предприятии).

Константы насыщения, гидролиза, распада, параметры фракций, коэффициенты прироста, максимальные удельные скорости роста, корректирующие факторы скорости роста веществ и бактерий были взяты из [2], который также применялся в качестве руководства по анализу моделей.

## III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ МОДЕЛИ НИТРИФИКАЦИИ

Для начала следует установить, применимы ли полученные входные параметры к рассматриваемым моделям.

Согласно [2], у модели нитрификации существуют три состояния равновесия.

Первое состояние равновесия соответствует отсутствию очистки, параметры загрязнений при нем равны входным. То есть, для достижения очистки необходимо обеспечивать неустойчивость этого состояния. Для неустойчивости достаточно выполнения одного из трех условий:

- $S_o^{BX} > S_o^{BX min}$ ;
- $S_{nh}^{BX} > S_{nh}^{BX min}$ ;
- $Q^{BX} < Q^{BX max}$ .

При имеющихся входных параметрах объекта и константах из [2] граничные значения следующие:

- $Q^{BX max} = 1878.677 \text{ м}^3/\text{сут}$ ;
- $S_o^{BX min} = -0.18495 \text{ г/м}^3$ ;
- $S_{nh}^{BX min} = 30 \text{ г/м}^3$ .

Следует отметить, что значения  $S_o^{BX min}$ ,  $S_{nh}^{BX min}$  также зависят от расхода входного субстрата  $Q$ . Поскольку на предприятии не применяется биологическая очистка, то

для расчета представленных выше значений было взято  $Q_{max}^{BX}$ . Притом, как было указано ранее, для неустойчивости первого состояния равновесия достаточно выполнения одного из условий. Также заметим, что  $S_o^{BX} < 0$ , то есть  $S_o^{BX} > S_o^{BX min}$  всегда в виду того, что физические параметры концентраций не могут иметь отрицательные значения.

Таким образом, можно сделать вывод, что входные параметры объекта при входном расходе субстрата в промежутке  $Q^{BX} \in (0; 1878.677] \text{ М}^3/\text{СУТ}$  обеспечивают неустойчивость первого состояния равновесия, то есть обеспечивают возможность очистки, для модели нитрификации.

Второе состояние равновесия при устойчивости соответствует очистке. Сама устойчивость определяется условием:

$$S_{nh}^{BX} > S_{nh min}^{BX}$$

Потому, если входная концентрация аммонийного азота ниже минимальной, то очистка невозможна. Как было отмечено ранее, при  $Q^{BX} = Q_{max}^{BX}$  минимальная концентрация аммонийного азота  $S_{nh min}^{BX} = 30 \text{ Г}/\text{М}^3$ . То есть модель находится на границе устойчивости. Однако при  $Q^{BX} < Q_{max}^{BX}$  имеющаяся входная концентрация аммонийного азота всегда больше минимального значения. Например, при  $Q^{BX} = 1800 \text{ М}^3/\text{СУТ}$  минимальная входная концентрация аммонийного азота  $S_{nh min}^{BX} = 13.0625 \text{ Г}/\text{М}^3$ . Таким образом, из установленного ранее промежутка допустимого входного расхода субстрата исключается его максимальное значение:  $Q^{BX} \in (0; 1878.677) \text{ М}^3/\text{СУТ}$  для обеспечения очистки.

Третье состояние равновесия физически недостижимо, поскольку для него должно выполняться условие: либо  $S_o^{BX} > 0$  и  $S_{nh}^{BX} < 0$ , либо  $S_o^{BX} < 0$  и  $S_{nh}^{BX} > 0$ .

#### IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ МОДЕЛИ ДЕНИТРИФИКАЦИИ

Согласно [2], у модели денитрификации также существует три состояния равновесия.

Первое состояние равновесия, аналогично состоянию равновесия при нитрификации, должно быть неустойчивым для обеспечения очистки. Для этого достаточно выполнения одного из четырех условий:

- $S_s^{BX} > S_s^{BX min}$ ;
- $S_{no}^{BX} > S_{no min}^{BX}$ ;
- $Q^{BX} < Q_{max}^{BX}$ ;
- $S_o^{BX} < S_o^{BX max}$ .

На данном этапе трудность составляют следующие факторы: для модели денитрификации имеется свой диапазон допустимых входных значений субстрата, также, неизвестно  $S_s^{BX}$  – концентрация растворенного биологически разлагаемого органического вещества (не измеряется на предприятии в виду отсутствия биологической очистки).

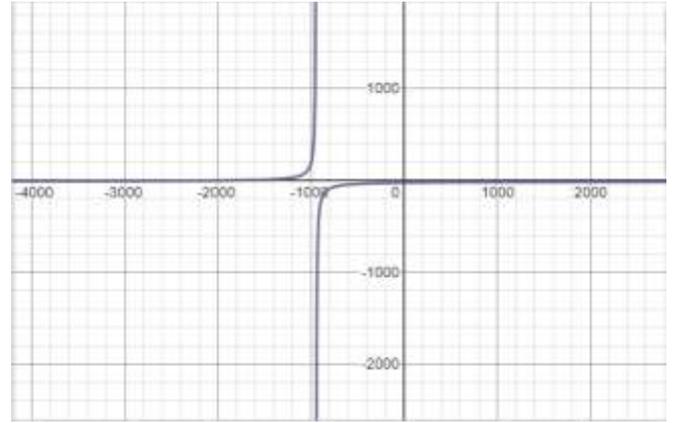


Рис. 1. График системы из уравнений (1) и (2)

При попытке рассмотреть параметры  $Q_{max}^{BX}$  и  $S_s^{BX min}$  в виде системы алгебраических уравнений с применением имеющихся параметров получается следующая система функций:

$$Q_{max}^{BX} = \frac{-945.881 * S_s^{BX min} - 25110}{S_s^{BX min} + 15} \quad (1)$$

$$S_s^{BX min} = \frac{-15 * Q_{max}^{BX} - 25110}{Q_{max}^{BX} + 945.881} \quad (2)$$

Построим по данной системе график, который отображен на рис. 1. Как видно на данном графике, если  $Q_{max}^{BX} > 0$ , то  $S_s^{BX min} < 0$  и наоборот. Данное явление объясняется самими уравнениями: так, чтобы  $Q_{max}^{BX} > 0$  согласно уравнению (1) необходимо, чтобы  $S_s^{BX min} > -26.547$ , а чтобы  $S_s^{BX min} > 0$  согласно уравнению (2) необходимо соблюдение условия  $Q_{max}^{BX} > -1674$ , также согласно уравнениям (1) и (2)  $Q_{max}^{BX} \neq -945.881$  и  $S_s^{BX min} \neq -15$ , в результате чего на графике присутствует разрыв, следовательно невозможно достичь состояния, при котором и  $Q_{max}^{BX} > 0$ , и  $S_s^{BX min} > 0$ . Таким образом придется подобрать параметр загрязнения  $S_s^{BX}$ , который выше ПДК. Пусть  $S_s^{BX} = 100 \text{ Г}/\text{М}^3$ .

Теперь, используя параметры перейдем к нахождению граничных значений. Для начала найдем максимальный объем:

$$Q_{max}^{BX} = -1040.8529 \text{ М}^3/\text{СУТ},$$

видно, что максимальный объем отрицателен, что соответствует ранее рассмотренной системе из уравнений (1) и (2). Следовательно, невозможно добиться выполнения условия  $Q^{BX} < Q_{max}^{BX}$ . Примем  $Q^{BX} = 1800 \text{ М}^3/\text{СУТ}$ , удовлетворяющее процессу нитрификации, для расчета иных параметров. Таким образом:

- $S_s^{BX min} = -18.9775 \text{ Г}/\text{М}^3$ ;
- $S_{no min}^{BX} = -18.4536 \text{ Г}/\text{М}^3$ ;
- $S_o^{BX max} = 0.684645 \text{ Г}/\text{М}^3$ .

Поскольку  $S_s^{BX} > S_s^{BX min}$  всегда при имеющихся значениях (физические параметры концентраций не могут иметь отрицательные значения), то первое состояние равновесия неустойчиво. Отметим, что

$S_{o\max}^{BX} = 0.684645 \text{ Г/М}^3$ , когда в случае рассматриваемого объекта  $S_o^{BX} = 6 \text{ Г/М}^3$ .

Для устойчивости второго состояния равновесия необходимо выполнение условия:

$$S_{no}^{BX} > S_{no\min}^{BX}$$

как было установлено, при  $Q^{BX} = 1800 \text{ М}^3/\text{сут}$  минимальная концентрация  $S_{no\min}^{BX} = -18.4536 \text{ Г/М}^3$ . То есть  $S_{no}^{BX} > S_{no\min}^{BX}$  всегда (по той же причине, что и  $S_s^{BX} > S_{s\min}^{BX}$  всегда).

Третье состояние равновесия, как и в случае нитрификации, физически недостижимо, поскольку для него должно выполняться условие: либо  $S_s^{BX} > 0$  и  $S_{no}^{BX} < 0$ , либо  $S_s^{BX} < 0$  и  $S_{no}^{BX} > 0$ .

## V. ПОЛУЧЕНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведем моделирование систем нитрификации и денитрификации при помощи программного пакета MATLAB. Для нитрификации результаты моделирования представлены на рис. 2 при  $Q^{BX} = 1800 \text{ М}^3/\text{сут}$ , и на рис. 3 при  $Q^{BX} = 900 \text{ М}^3/\text{сут}$ . Моделирование производилось при начальных условиях, где концентрация бактерий-нитрификаторов равна 0.01 (сухая загрузка ила в реактор), щелочность – 6.5ph. Все остальные концентрации – нулевые. Следует отметить, что различные установившиеся значения аммонийного азота на рисунках зависят исключительно от того, что мы управляем процессом очистки в модели нитрификации посредством изменения входной концентрации аммонийного азота при постоянном  $Q^{BX}$ .

Моделирование на рис. 2 показывает, что при  $Q^{BX} = 1800 \text{ М}^3/\text{сут}$  минимальное значение входной концентрации аммонийного азота  $S_{nh\min}^{BX} = 13.0625 \text{ Г/М}^3$ . Если входная концентрация этого значения ниже, то концентрации бактерий-нитрификаторов убывают со временем и очистка не производится – концентрации загрязнителей достигают входных значений. Если входная концентрация аммонийного азота выше минимального, то бактерии-нитрификаторы растут.

Моделирование на рис. 3 показывает, что при  $Q^{BX} = 900 \text{ М}^3/\text{сут}$  минимальное значение входной концентрации аммонийного азота  $S_{nh\min}^{BX} = 0.939655 \text{ Г/М}^3$ . Однако, как можно заметить, из-за более быстрой скорости реакции, в отличие от моделирования на рис. 2, при превышении минимальной входной концентрации аммонийного азота видно, как бактерии-нитрификаторы влияют на растворенный кислород, поскольку они существуют, питаются им. Однако из-за их присутствия нитратный азот превышает входное значение, поскольку сами бактерии-нитрификаторы опосредованно участвуют в образовании.

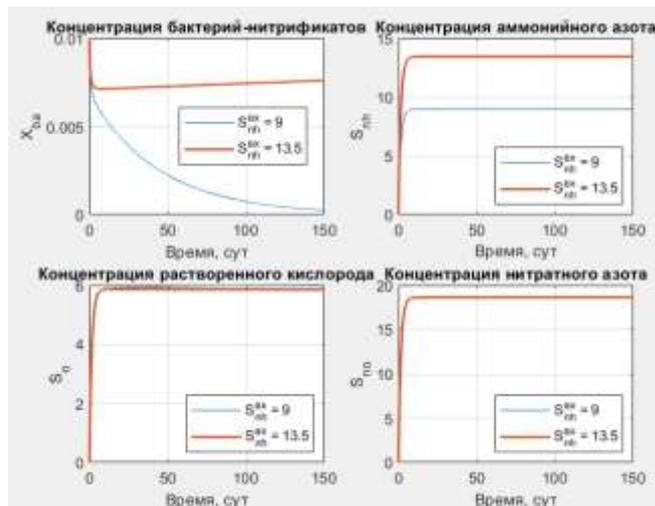


Рис. 2. Процессы нитрификации при  $Q^{BX} = 1800 \text{ М}^3/\text{сут}$

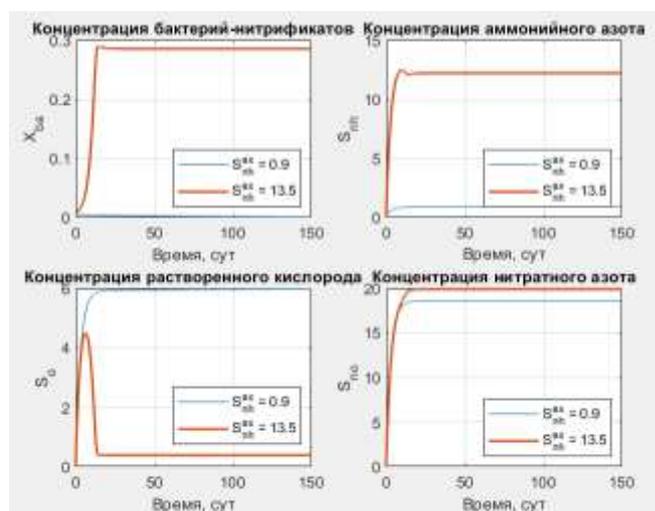


Рис. 3. Процессы нитрификации при  $Q^{BX} = 900 \text{ М}^3/\text{сут}$  данного вида азота

Для денитрификации результаты моделирования представлены на рис. 4 при  $Q^{BX} = 1800 \text{ М}^3/\text{сут}$ . Моделирование производилось при начальных условиях, где концентрация гетеротрофов равна 0.01, а концентрация взвешенного органически медленно разлагаемого вещества – 0.0001 (сухая загрузка ила в реактор), щелочность – 6.5ph. Примечание: РБОВ – Растворенное Биологически Разлагаемое Органическое Вещество. На данном рисунке видно, что при текущей входной концентрации кислорода невозможно обеспечить очистку, поскольку данная концентрация выше  $S_{o\max}^{BX} = 0.684645 \text{ Г/М}^3$ , потому биомасса гетеротрофов не растет. Как было сказано в пункте III,  $S_s^{BX} > S_{s\min}^{BX}$  и  $S_{no}^{BX} > S_{no\min}^{BX}$  при принятых значениях, то есть первое состояние равновесия неустойчиво, а второе устойчиво, причем в случае первого состояния равновесия должно быть достаточно выполнения одного условия. Однако, как оказалось при моделировании,

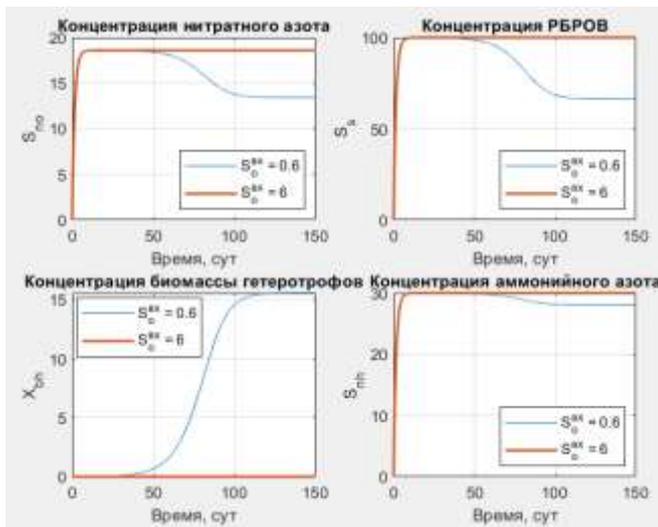


Рис. 4. Процессы денитрификации при  $Q^{BX} = 1800 \text{ M}^3/\text{сут}$

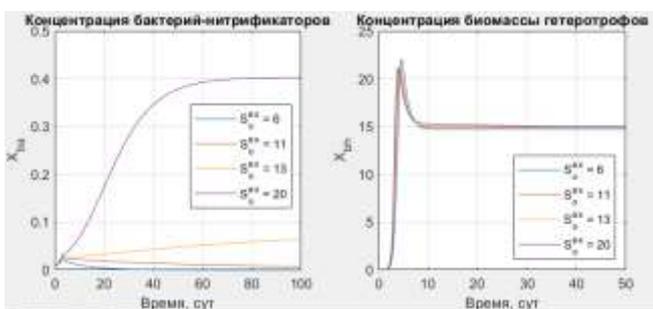


Рис. 5. Изменение популяции организмов в полной модели ASM1 при  $Q^{BX} = 450 \text{ M}^3/\text{сут}$

выполнение условия  $S_o^{BX} < S_o^{BX_{max}}$  влияет на возможность очистки (то есть делает первое состояние равновесия неустойчивым) в модели денитрификации, вне зависимости от выполнения иных условий, как можно видеть при  $S_o^{BX} = 0.6 \text{ Г}/\text{M}^3$  – гетеротрофы растут. В результате чего концентрации нитратного азота, РБРОВ и аммонийного азота понижаются, поскольку гетеротрофы питаются как РБРОВ, так и двумя видами азота. Следовательно, очистка в модели денитрификации при постоянном объеме управляется изменением максимальной входной концентрацией кислорода.

Поскольку при моделировании процессов денитрификации в MATLAB было установлено, что на очистку критически влияет условие  $S_o^{BX} < S_o^{BX_{max}}$ , то примем  $S_o^{BX} = 0.6 \text{ Г}/\text{M}^3$  и рассчитаем граничное значение входного расхода субстрата:

$$Q_{max}^{BX} = 2067.32401 \text{ M}^3/\text{сут}$$

Таким образом, для модели денитрификации  $Q^{BX} \in (0; 2067.32401) \text{ M}^3/\text{сут}$ .

Наконец, на рис. 5 отображено моделирование полной модели ASM1 при  $Q^{BX} = 450 \text{ M}^3/\text{сут}$ . Большие входные параметры расхода субстратов  $Q^{BX}$  из предыдущих моделей не брались, поскольку одним из

ограничений на модель ASM1 является скорость роста – она должна позволять развиваться обоим видам организмов, при большом  $Q^{BX}$  скорость становится высокой и бактерии-нитрификаторы не успевают возрасти. Как можно видеть, в отличие от модели денитрификации  $S_o^{BX_{max}}$  значительно выше (биомасса гетеротрофов растет при значениях в разы больше максимального для модели денитрификации), причем минимальное входное значение кислорода для бактерий-нитрификаторов тоже выше ( $S_o^{BX_{min}} \in (11; 13) \text{ Г}/\text{M}^3$ ), хотя у модели нитрификации всегда наблюдалось выполнение условия  $S_o^{BX} > S_o^{BX_{min}}$ , поскольку  $S_o^{BX_{min}} < 0$ . Разумеется, это связано с тем, что равновесные состояния «сдвигаются» в виду объединения процессов в одну систему. Следует отметить, что в случае рассматриваемого объекта  $S_o^{BX} = 6 \text{ Г}/\text{M}^3$ . Следовательно, чтобы достичь условия  $S_o^{BX} > S_o^{BX_{min}}$  для исследуемого объекта придется рассматривать иные значения  $Q^{BX}$  с целью найти такое, при котором данное условие выполняется.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа моделей нитрификации, денитрификации и ASM1 можно отметить:

- очистка в модели нитрификации управляется изменением входной концентрации аммонийного азота, а бактерии-нитрификаторы питаются за счет кислорода и производят нитратный азот;
- очистка в модели денитрификации управляется изменением входной концентрации кислорода, а гетеротрофы питаются РБРОВ, аммонийным и нитратом азотом;
- в случае полной модели ASM1 условия, отвечающие за рост организмов, сохраняются, однако сами значения при тех же параметрах могут отличаться из-за объединения процессов в одну систему.

В дальнейшем следует рассмотреть, как можно добиться выполнения условия  $S_o^{BX} > S_o^{BX_{min}}$ , если для объекта  $S_o^{BX} = 6 \text{ Г}/\text{M}^3$ . Данное исследование можно выполнить путем рассмотрения равновесных состояний модели ASM1 при последовательном изменении параметра  $Q^{BX}$  (все остальные параметры фиксированы). Если удовлетворительное значение для роста бактерий-нитрификаторов будет найдено, то данные объекта полностью подходят модели ASM1, иначе придется изменять или уточнять информацию касательно данных с объекта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Андреев А.В. Система очистки сточных вод на предприятии ИДАВАНГ Агро // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова [Электрон. журн.] Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021, С. 8-11. – Режим доступа к журн.: [https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2021/sbomik\\_2021.pdf](https://vavilovschool.etu.ru/assets/files/2021/sbomik_2021.pdf)
- [2] Грудяева Е.К., Душин С.Е. Моделирование управляемых процессов биологической очистки сточных вод. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 231 с.

# Применение Aruco меток для управления перевернутым маятником

Л. С. Братченко, Г. А. Гаврилов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

IamOnyfriy@gmail.com, george.gavrilov269@gmail.com

**Аннотация.** Рассматривается вопрос допустимости применения визуальных маркеров Aruco в системах автоматического управления, для примера взята модель перевернутого маятника. Рассмотрены методы детектирования маркеров и извлечения данных для управления. Сделаны выводы, проведён анализ быстрейшего действия и код решения

**Ключевые слова:** компьютерное зрение, Aruco markers, системы управления

## I. ВВЕДЕНИЕ

В системах автоматического управления всегда использовались передовые достижения технологического прогресса. Развитие микропроцессорных систем породило рынок сложных цифровых устройств, в частности цифровых видеокамер. Высокотехнологичные средства видеозаписи стали доступны и широко используются в самых разнообразных сферах человеческой деятельности. Нашли они своё место и в теории автоматического управления.

Допустимость применения видеокамер в качестве датчиков уже была неоднократно доказана (например, [1]), в данной статье рассматривается вопрос применения специальных маркеров, наносимых на управляемые объекты.

## II. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Прежде всего, кратко представим систему, на который будет протестирован метод.

К рассмотрению была принята модель перевернутого маятника на каретке, описанная следующими уравнениями в форме Коши:

$$\frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta};$$

$$\frac{d\dot{\theta}}{dt} = \ddot{\theta} = \frac{(M+m)g\sin\theta - ml\dot{\theta}^2\sin\theta\cos\theta - f\cos\theta}{D};$$

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x};$$

$$\frac{d\dot{x}}{dt} = \ddot{x} = \frac{ml^2\dot{\theta}^2\sin\theta + lf - mgl\sin\theta\cos\theta}{D};$$

$$D = lM + lms\sin^2\theta \neq 0;$$

На основе математической модели была построена модель в системе Simulink (рис. 1). Для стабилизации маятника и положения каретки в систему были введены

два ПИД-регулятора. Для симуляции задержки были включены два звена запаздывания, реализованных блоками transport delay, с одинаковым временем задержки, они имитируют временные потери, связанные с анализом изображения камерой и передачей пакетов.

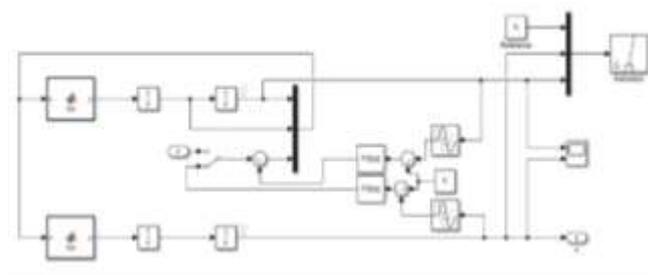


Рис. 1. Модель перевернутого маятника в системе Simulink

В лабораторных условиях существует установка перевернутого маятника на каретке, при моделировании были взяты физические параметры именно этого стенда, а именно:

- $L - 0.6$  м
- $m - 1$  кг
- $M - 0.4$  кг

## III. ARUCO МАРКЕРЫ

Aruco маркеры или Aruco метки – это фидуциальный маркер, который размещается на изображаемом объекте в кадре. Он представляет собой чёрный квадрат с ярко выраженными границами, внутри которого располагается белый узор, однозначно его идентифицирующий. Впервые были описаны в статье «Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion» [2] 2014 года. Разработаны в Университете дополненной реальности Кордовы. Aruco маркеры нашли широкое применение в областях, связанных с компьютерным зрением, благодаря тому, что они помогают быстро и точно детектировать и идентифицировать объект в кадре, отмеченный маркером.

В данном исследовании Aruco маркеры применяются для определения положения верхушки маятника и каретки, так как управление в системе происходит по углу отклонения стержня и положению каретки, также метки помещаются на края установки, обозначая её границы. Кроме того, использование Aruco маркеров позволяет классифицировать отмеченные объекты в кадре, выделяя группы по идентификатору.

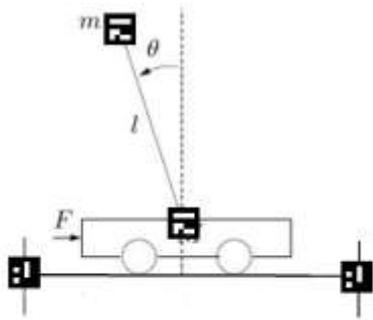


Рис. 2. Принципиальная схема размещения маркеров

#### IV. АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для анализа изображений, размеченных маркерами, были написаны скрипты на языке программирования Python с использованием библиотек OpenCV [3] и Aruco. Для оценки быстродействия и эффективности работы алгоритмов был сформирован тестовый dataset из 1000 файлов с разным количеством и положением меток, разрешением и ориентацией изображений.

Скрипт извлекает из изображения данные об управляемых переменных системы. Метки в верхней и нижней частях стержня позволяют вычислить угол отклонения, а метки на краях оси каретки задают центр и позволяют отследить движение каретки относительно него.

В качестве алгоритма обнаружения была выбрана стандартная функция библиотеки opencv detectMarkers.

Анализ данных показал, что:

1. Количество нанесённых меток никак не отражается на скорости обработки изображения.
2. Фон, на котором расположена размеченная контролируемая система, должен иметь минимальное количество углов и выступов. Наличие лишних предметов на заднем плане значительно увеличивает количество ложных обнаружений и иногда даже мешает распознанию настоящих маркеров в кадре, что в свою очередь отрицательно сказывается на быстродействии.
3. Разрешение изображения оказывает значительное влияние на быстродействие программы.

#### V. ТРЕБОВАНИЯ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

Эксперименты проводились на базе компьютера с операционной системой Windows 10, процессором Intel Core i3 2.30GHz и 4 гигабайтами доступной программе оперативной памяти

В результате проведённых экспериментов были сформулированы следующие технические требования.

1. Оптимальным качеством съёмки по соотношению разрешения к производительности является 720 p.
2. Для более эффективной работы «датчика» стоит удалить из кадра все посторонние предметы имеющие острые углы.

Был также сформирован дополнительный набор данных для финальных тестов, состоящий из 100 изображений размеченной модели маятника. На

каждой такой картинке скрипт должен был обнаружить все метки и вычислить угол отклонения стержня. Эксперимент был повторён 10 раз, а показатели частоты кадров и затраченного на обработку времени занесены в таблицу.

Наименьшая частота съёмки по приведённым тестам 49 кадров в секунду, что соответствует 20,4 миллисекундам на обработку одного кадра.

ТАБЛИЦА I ПОКАЗАТЕЛИ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ НА ТЕСТОВЫХ ДАННЫХ

Номер измерения	Время, с	FPS, кадров/секунду
1	2.008	49
2	1.274	78
3	1.316	75
4	1.240	80
5	1.040	96
6	0.954	104
7	0.946	105
8	0.909	109
9	0.930	107
10	0.940	106

Теперь, имея диапазон задержек, производимых камерой, можно перенести их на маятник.

Возьмём время запаздывания заведомо большее, чем даёт камера в системе на случай непредвиденных проблем на транспортном уровне или в процессе интерпретации.

Параметры системы закономерно изменяются при изменении запаздывания. Ниже визуализированы изменения допустимых начальных условий отклонения стержня маятника от вертикальной оси (рис. 3). Так:

- при задержке равно 0 максимальный начальный угол отклонения, при котором система возвращается в устойчивое положение, 1.2 радиана;
- при 100 миллисекундах задержки угол уменьшается до 0.5 радиан;
- при 50 миллисекундах задержки угол может достигать 1.1 радиана.

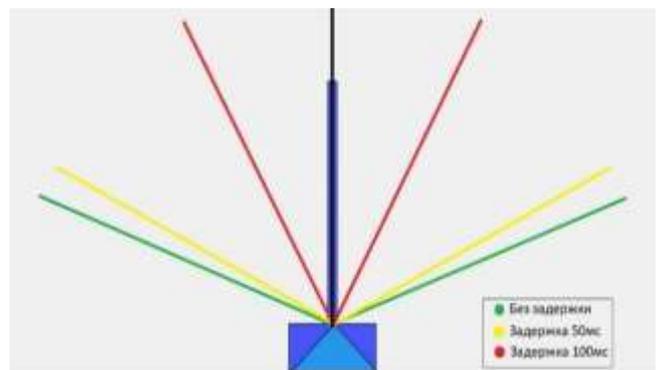


Рис. 3. Допустимое отклонение маятника при разных значениях задержки регулирования

Очевидно, что задержка, создаваемая камерой, позволяет модели перевернутого маятника оставаться устойчивой.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения исследования и множества экспериментов, было выяснено, что Агисо маркеры подходят для разметки объектов в кадре и дальнейшего высокочастотного (30, 60 FPS и выше) детектирования.

Так как создаваемая видеоанализом задержка регулирования позволяет системе оставаться устойчивой, можно утверждать, что контроль управляемых переменных для модели перевёрнутого маятника с применением Агисо маркеров возможен и допустим. Более того, частоту кадров можно значительно поднять, снизив разрешение изображений или изменив среду исполнения программы на более мощную. Кроме того,

применимость к выбранной тестовой модели позволяет задуматься, к какому ещё классу задач теории автоматического управления применим этот метод, и как его можно улучшить.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Благовещенская М.М., Иванов Я.В. Система автоматического регулирования с цифровой видеокамерой // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2010. Т. 16. №. 4. С. 776-779.
- [2] Garrido-Jurado S. et al. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion // Pattern Recognition. 2014. Т. 47. №. 6. С. 2280-2292.
- [3] <https://opencv.org>

# Структура веб-приложения формирования композиций полимерных материалов для вторичной переработки

Т. С. Гончарова<sup>1</sup>, А. С. Разыграев<sup>2</sup>

кафедра Систем автоматизированного проектирования и управления

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

<sup>1</sup>tatyana.sergeevnaa@mail.ru, <sup>2</sup>rozaa@yandex.ru

**Аннотация.** В статье представлена структура веб-приложения формирования полимерных материалов для вторичной переработки. Веб-приложение позволит исследователю (управленческому персоналу предприятий/технологам/студентам/преподавателям) с использованием базы знаний совместимости полимерных материалов формировать композиции для вторичной переработки из заданных полимерных материалов и в качестве результата выводить полученные композиции, а также ссылки на литературные источники, в которых описаны технологические параметры комбинации полимерных материалов и условия их переработки.

**Ключевые слова:** веб-приложение, вторичная переработка, полимерные материалы, комбинации для вторичной переработки

## I. ВВЕДЕНИЕ

Объемы производства и потребления полимерных пленок увеличиваются с каждым годом [1]. Но отходы полимерной продукции становятся настоящей проблемой, так как их утилизация крайне затруднительна. С экологической точки зрения наиболее выигрышным способом утилизации является вторичная переработка.

Веб-приложение разрабатывается для решения одной из наиболее сложных задач вторичной переработки – подбора композиций совместимых полимерных материалов для вторичной переработки.

Концепция веб-приложения помогает решить проблему кроссплатформенности, возможности дистанционного использования, что удобно для предприятий, представительства которых расположены удаленно, кроме этого, установка и обновление веб-приложения проще и дешевле.

Веб-приложение формирования полимерных материалов поможет:

- сэкономить время технолога, так как задача подбора совместимых полимерных материалов становится автоматизированной;
- снизить вероятности ошибки в подборе материалов и порчи сырья из-за человеческого фактора;
- сэкономить затраты сырья на экспериментальное установление совместимости полимерных материалов.

## II. СТРУКТУРА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ

Веб-приложение основано на базе клиент-серверной архитектуры: вычислительная часть и хранение информационного обеспечения реализовано на серверной стороне приложения, на клиентской стороне расположены интерфейсы. Взаимодействие клиента с сервером осуществляется посредством HTTP-запросов. Такое разделение позволяет значительно снизить требования к программному и аппаратному обеспечению пользователя. Структура веб-приложения представлена на схеме (рис. 1).

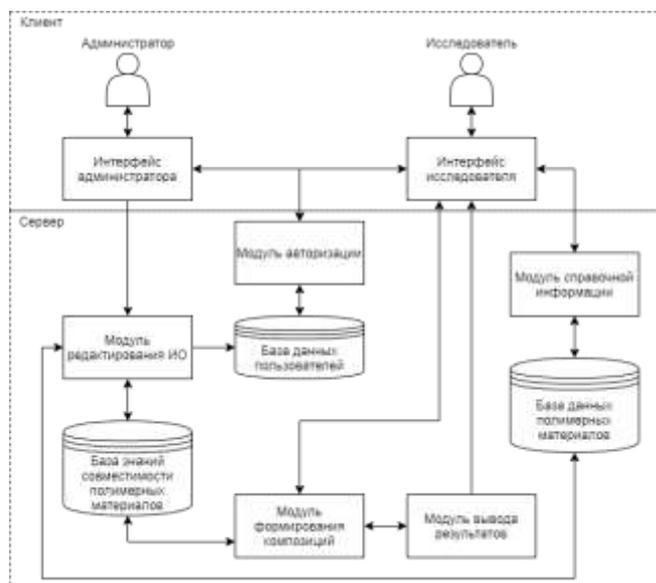


Рис. 1. Структура веб-приложения формирования композиций полимерных материалов для вторичной переработки

### A. Серверная часть веб-приложения

Серверная часть веб-приложения включает в себя:

- модуль формирования композиций, в котором реализована основная функция приложения – создание композиций полимерных материалов для вторичной переработки при заданных исследователем материалах, совместимость которых необходимо установить;
- модуль вывода результатов, который после формирования композиций с использованием базы знаний совместимости полимерных

материалов передает на часть клиента полученные схемы, содержащие возможные композиции для вторичной переработки и литературные источники, содержащие подробное описание процесса вторичной переработки и технологические параметры;

- модуль справочной информации, отображающий информацию о полимерах с их параметрами;
- модуль редактирования информационного обеспечения, в котором реализована возможность редактирования базы знаний совместимости полимерных материалов, базы данных полимерных материалов и базы данных пользователей через интерфейс администратора;
- модуль авторизации, выводящий страницу при запуске веб-приложения, где пользователь должен ввести логин и пароль для авторизации в системе;
- базу знаний совместимости полимерных материалов, содержащую полимерные материалы (полные и сокращенные наименования) и литературные источники, описывающие технологию переработки с указанием наименования источника, авторов и страниц [2];
- базу данных полимерных материалов, содержащую сокращенные наименования полимерных материалов, параметры и их значения;
- базу данных пользователей, содержащую логины и пароли для авторизации.

### В. Клиентская часть веб-приложения

Клиентская часть веб-приложения разделена на интерфейсы администратора и исследователя.

После авторизации под учетной записью исследователя, открывается основное окно приложения, где пользователь может ввести сокращенные названия полимерных материалов, совместимость которых необходимо установить, и просмотреть полученные композиции с указанием возможных пропорций полимеров и литературных источников, в которых описаны технологические параметры и условия вторичной переработки.

Для удобства исследователя, при необходимости добавления дополнительного полимера для создания композиции, приложение формирует несколько схем возможных композиций, чтобы исследователь мог выбрать подходящую.

Исследователь также может просматривать страницу справочной информации о полимерах с описанием их параметров.

После авторизации под учетной записью администратора открывается окно редактирования информационного обеспечения (рис. 2).

Администратор может:

- редактировать базу данных полимерных материалов, а именно (таблицу полимерных материалов, таблицу параметров полимерных

материалов, таблицу значений параметров полимерных материалов);

- редактировать графовую базу знаний совместимости полимерных материалов (добавлять и удалять полимерные материалы, добавлять и удалять связи, прописывая литературные источники);
- редактировать базу данных пользователей.

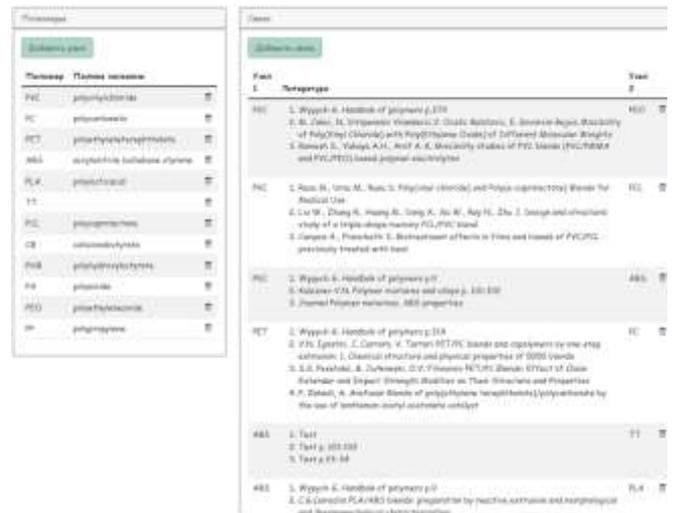


Рис. 2. Панель редактирования базы знаний совместимости полимерных материалов через интерфейс администратора

### С. Модуль формирования композиций полимерных материалов

Целевая задача веб-приложения – формирование композиций полимерных материалов и отображение результата в удобном и понятном для исследователя формате. Алгоритм формирования композиций представлен в виде блок-схемы (рис. 3).

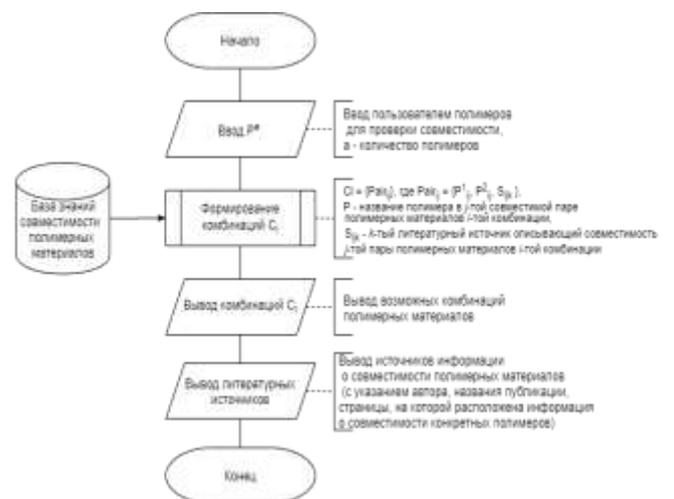


Рис. 3. Блок-схема алгоритма формирования композиций полимерных материалов

Для создания композиции пользователь должен ввести названия полимерных материалов на боковой панели. В приложении предусмотрена возможность изначального задания более двух исходных полимерных материалов для формирования композиции.

После задания полимерных материалов выполнится запрос к базе знаний совместимости полимерных

материалов, определяются существующие композиции и выведутся на экран.

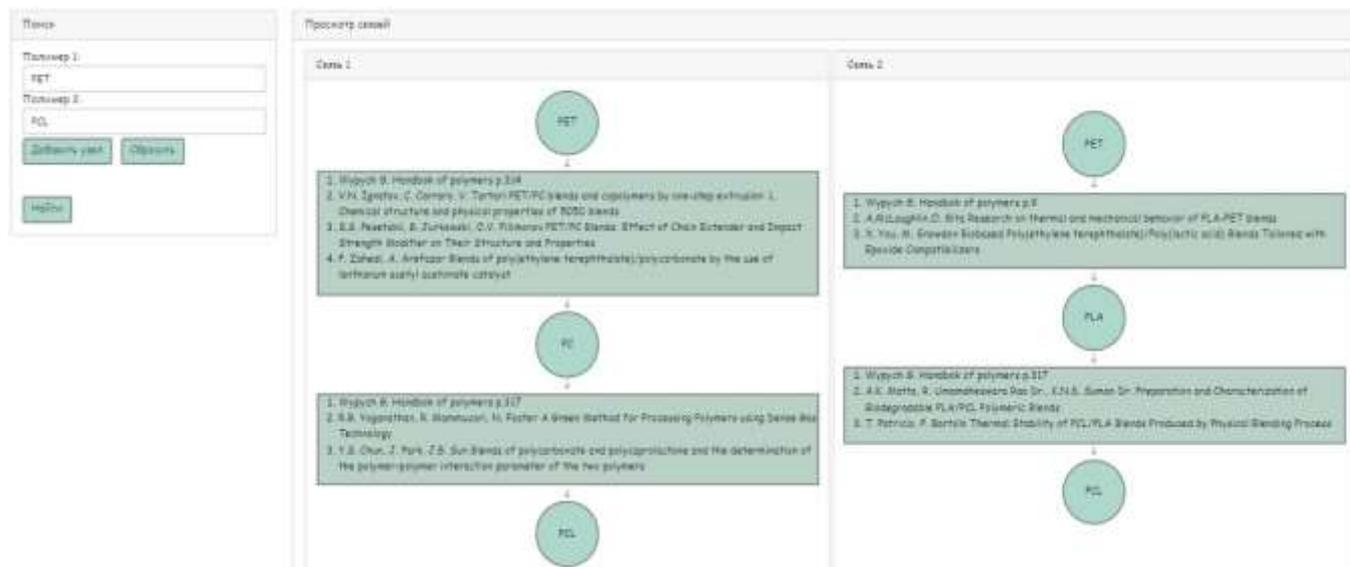


Рис. 4. Пример формирования композиции полимерных материалов

Введенные исследователем полимерные материалы могут быть совместимы как напрямую, так и исключительно при добавлении дополнительного полимера. Во втором случае, при выводе результата, будет отображено несколько возможных композиций для того, чтобы исследователь мог выбрать подходящую.

### III. ТЕСТИРОВАНИЕ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ

Для проверки работоспособности веб-приложения были выбраны полимерные материалы PET (полиэтилентерефталат) и PCL (поликапролактон). Согласно источнику Handbook of Polymers, Wypych G. [3] эти полимерные материалы совместимы при добавлении PC (поликарбоната) или PLA (полилактида).

При задании исходных полимерных материалов PET и PCL, веб-приложение сформировало соответствующие схемы композиций полимерных материалов (рис. 4), что подтверждает его работоспособность.

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведено описание структуры веб-приложения формирования композиций полимерных материалов для вторичной переработки, позволяющего исследователю с использованием базы знаний

совместимости полимерных материалов формировать композиции для вторичной переработки из заданных полимерных материалов. Описаны основные модули и компоненты структуры, алгоритм создания композиций полимерных материалов, работоспособность веб-приложения подтверждена приведенным тестовым примером.

В будущем планируется развитие функционала веб-приложения, в том числе добавление фильтрации по типу оборудования для вторичной переработки, вывод состава сформированных композиций с уточнением пропорций.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Waste.ru. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=423>. Дата обращения: 13.05.2022.
- [2] Информационное обеспечение программного комплекса для формирования композиций полимерных материалов для вторичной переработки / Т.С. Гончарова, А.С. Разыграев // Неделя науки-2022: Тез. докл. XII научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых., Санкт-Петербург, 20-22 апр. 2022 / СПбГТИ(ТУ), 2022. С. 202.
- [3] Wypych G. Handbook of polymers [Текст] / G. Wypych. Toronto: ChemTec Publishing, 2012. 686 с.

# Математическое моделирование роста опухоли

О. А. Графина

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
grafina3@gmail.com

**Аннотация.** Статья посвящена исследованиям существующих математических моделей роста раковых клеток.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, рост опухоли

## I. ВВЕДЕНИЕ

Математические модели и компьютерное моделирование используются для изучения раковых заболеваний. Математические модели помогают понять развитие и рост опухоли, с их помощью можно оптимизировать и персонализировать схемы лечения, прогнозировать эффективность методов лечения и их комбинаций. Математическое моделирование играет важную роль в исследованиях рака при анализе огромных объемов полученных данных, проверке различных гипотез, подтверждении экспериментальных наблюдений и изучении динамического поведения сложных систем.

## II. КЛАССИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РОСТА ОПУХОЛИ

Классические модели роста опухоли основываются на основе экспоненциального или логистического законов роста. Рассмотрим их подробнее.

Простейшей моделью описания роста опухоли является мальтузианская модель, названная так в честь английского экономиста и демографа Томаса Мальтуса. Суть модели – экспоненциальный рост с постоянным темпом. Такая модель часто используется для описания темпов роста популяции одного вида. Модель имеет форму:

$$\frac{dV}{dt} = rV,$$

где  $V$  – объем опухоли,  $r$  – параметр роста,  $t$  – время. Такая модель предполагает неограниченный объем ресурсов.

В. Коллинз предложил свой вариант модели роста опухоли, которую назвал экспоненциальной [1]. Эта модель имеет следующий вид:

$$\frac{dV}{dt} = rV^b, r > 0, b > 0,$$

где  $r$  – параметр собственного роста. Рост ускоряется с увеличением параметра  $b$ .

Также к экспоненциальным моделям относится модель Гомперца, названная в честь английского математика Бенджамина Гомперца. Модель представляет собой сигмовидную функцию, которая описывает рост как наиболее медленный в начале и конце периода. Представляя опухоль как скопление клеток в замкнутом

пространстве и учитывая, что доступность питательных веществ ограничена, можно описать модель в следующем виде:

$$\frac{dV}{dt} = a e^{-\beta t} V, a > 0, \beta > 0,$$

где  $a$  – внутренний параметр роста, а  $\beta$  – параметр замедления роста. Данная модель была успешна использована для моделирования роста рака молочной железы и легких.

Экспоненциальные модели хорошо описывают рост опухоли в определенный промежуток времени. Но объем опухоли будет стремиться к бесконечности, если темп роста будет оставаться положительным, что нереалистично. Объем может увеличиться только до определенного уровня, поскольку ресурсы, необходимые для роста клеток, ограничены. Динамику поведения опухоли при торможении роста можно описать логистическими функциями. Рассмотрим их ниже.

Карл Людвиг фон Бергаланфи, австрийский биолог, предложил уравнение, описывающее рост биологического организма. Эта модель, модифицированная для описания роста опухоли, основана на том, что рост опухоли пропорционален площади поверхности, поскольку питательные вещества проникают через поверхность, а гибель клеток пропорциональна размеру опухоли.

Уравнение имеет вид:

$$\frac{dV}{dt} = aV^{\frac{2}{3}} - bV,$$

где  $V$  – объем опухоли,  $a$  – параметр роста,  $b$  – параметр замедления роста. Объем опухоли будет стремиться к уровню насыщенности модели.

Пьер Франсуа Ферхюльст, бельгийский математик, ознакомившись с теорией Мальтуса, построил модель роста популяции в условиях ограниченности ресурсов и назвал её «логистической». Модель предполагает линейное уменьшение относительных темпов роста с увеличением численности и описана следующим уравнением:

$$\frac{dV}{dt} = aV \left( 1 - \frac{V}{K} \right),$$

где  $a$  – скорость роста,  $K$  – максимальный размер популяции, «емкость популяции».

В ситуации достаточного объёма ресурсов опухоль растет примерно экспоненциально; в противном случае экспоненциально убывает.

Модель Ричарда является расширением модели Ферхюльста и описана в следующем виде:

$$\frac{dV}{dt} = aV \left( 1 - \left( \frac{V}{K} \right)^\alpha \right),$$

где  $\alpha$  – положительная степень.

Эта модель ведет себя точно так же, как логистическая модель. Однако в этой модели система может быть стабилизирована быстрее.

Обобщенная логистическая модель может быть записана в виде:

$$\frac{dV}{dt} = aV^\alpha \left( 1 - \left( \frac{V}{K} \right)^\beta \right)^\gamma,$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  – неотрицательные показатели,  $a$  – параметр скорости роста. Из этой обобщенной уравнения можно вывести все модели, описанные выше, соответствующим образом выбрав значения  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ .

Логистические уравнения хорошо описывают рост опухоли во многих наблюдаемых случаях и до сих пор эффективно используются.

### III. СОВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛИ РОСТА ОПУХОЛИ

Современные модели, как правило, более специализированные и создаются под конкретную локализацию раковой опухоли. Опухоли, в свою очередь, подразделяются на солидные и инвазивные.

Солидные опухоли имеют четкую локализацию, форму и границы. Рост солидной опухоли можно представить как экспоненциальное или геометрическое расширение.

Например, рассмотрим модель на основе клеточных автоматов [2]. Клеточные автоматы – это модели, которые позволяют описать тот же класс ситуаций, что и дифференциальные уравнения. В данной работе исследуется модель плоскоклеточного ороговевающего и неороговевающего рака. Плоскоклеточный рак возникает в тех местах, где присутствуют «плоские» клетки – в эпителии. Ороговевающий и неороговевающий рак различаются по степени агрессивности: опухоль с ороговеванием относительно медленно развивается и метастазирует, в то время как неороговевающий рак быстро разрушает ткани и метастазирует по всему организму.

В рассматриваемой модели авторами были разработаны три алгоритма клеточных автоматов для описания развития различных опухолей эпителиальных тканей: моделирование на тканевом уровне, где рассматривалась зависимость структуры опухоли от обеспеченности ресурсами, и моделирование на клеточном уровне, где рассматривалась модель роста опухоли, зависящая от концентрации питательных веществ в условиях ограниченного доступа, и мутационная модель, где число опухолевых очагов зависит от вероятности мутаций.

Полученные результаты в целом совпали с экспериментальными данными, за исключением небольшой погрешности.

Клеточные автоматы позволили авторам описать геометрическое распространение модели и алгоритмически описать поведения опухоли под

воздействием различных факторов, несмотря на затрудненность обобщения и интерпретации полученных результатов.

Для примера модели, описывающую динамику роста злокачественной солидной опухоли, рассмотрим работу Жуковой И.В. и Колпака Е.П. [3]. В рассматриваемой модели учитываются три вида клеток: нормальные, делящиеся и погибшие. К делящимся – относятся непрерывно делящиеся клетки опухоли. Модель представляет собой задачу Коши для системы дифференциальных уравнений и строится на следующих предположениях:

- отсутствует апоптоз у делящихся клеток;
- нормальные клетки в отсутствие делящихся размножаются по логистическому закону;
- делящиеся клетки оказывают ингибирующее влияние на нормальные клетки, погибшие клетки оказывают ингибирующее влияние на нормальные и делящиеся.

Как следует из анализа модели, концентрация погибших клеток непрерывно растет, концентрация делящихся клеток сначала растет, а затем начинает убывать. Концентрация нормальных клеток монотонно уменьшается. Полученная модель хорошо описывает динамику роста солидной злокачественной опухоли.

В качестве модели роста определенно локализованной раковой опухоли рассмотрим модель, созданную для описания роста раковой опухоли молочной железы [4]. Модель основана на экспоненциальной модели роста и состоит из системы линейных и нелинейных детерминированных уравнений. Отличием этой модели является то, что авторы учитывали не только рост самой модели, но и появление и рост её метастазов. «Естественная» скорость роста метастазов аналогична «естественной» скорости роста первичной опухоли и описывается экспоненциальным законом. Период появления первой метастатической опухолевой клетки совпадает с двадцатым удвоением первичной опухоли. Предложенная модель корректно описывает рост первичной опухоли, облегчает понимание периода возникновения и формирования вторичных отдаленных метастазов. При сравнении с экспериментальными данными было выявлено, что модель обладает высокой предсказательной способностью.

Более сложную задачу представляет собой описание модели роста инвазивной опухоли. Инвазивная опухоль состоит из подвижных клеток, которые могут мигрировать. Инвазия – необходимое условие для развития метастазов. Соответственно, подход к моделированию инвазивной опухоли отличается от подхода к моделированию солидных опухолей, которые растут за счет клеточной пролиферации, и включает в себе клеточную подвижность.

Рассмотрим на эту тему модель с учетом дихотомии миграции и пролиферации [5]. Модель основана на следующих предположениях:

- в случае избытка питательных веществ опухоль неограниченно возрастает. Когда концентрация питательных веществ падает ниже критического

уровня, опухоль начинает перемещаться по ткани в поиске области с достаточно высоким уровнем питательных веществ для возможности пролиферации, если опухоль её не находит, то погибает;

- питательные вещества нужны в большей степени пролиферирующим клеткам;
- кровеносная сеть вокруг опухоли уже частично или полностью разрушена;
- приток метаболитов определяется диффузией от удаленных источников.

Данная модель изучает зависимость скорости роста/распространения инвазивной опухоли в зависимости от параметров модели. В первую очередь была рассмотрена зависимость скорости от клеточных параметров, таких как скорость деления и скорость гибели. Исходя из данной модели, скорость распространения инвазивной опухоли падает с увеличением скорости гибели ее клеток в областях с нехваткой кислорода, а скорость роста опухоли увеличивается пропорционально скорости деления её клеток.

Данная модель плохо описывается начальный этап роста опухоли, но хорошо учитывает микроокружение модели и предоставляет хорошую возможность для моделирования химиотерапии.

#### IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ХИМИОТЕРАПИИ

Моделирование роста опухоли помогает проанализировать воздействие различных видов лечения. Для моделирования воздействия химиотерапии используются другие законы. В данной работе для описания этих законов будет использоваться терминология, принятая в англоязычной литературе.

Skipper law гласит, что время удвоения опухоли постоянно, воздействие химиотерапии на клетки опухоли протекает согласно кинетике первого порядка, и фиксированная часть опухолевых клеток погибает независимо от размеров опухоли.

Модель Skipper-Schabel-Wilcox состоит в том, что при условии одинакового воздействия лекарственных препаратов погибнет одна и та же доля опухолевых клеток, а не одно и то же число, в популяциях самых различных размеров. Эта модель привела к возникновению гипотезы Log-Kill, которая утверждает, что соотношение погибших и выживших клеток следует логарифмическому закону.

Гипотеза Norton-Simon отличается от логарифмической теории и гласит, что при воздействии химиотерапии опухолевые клетки погибают со скоростью, прямо пропорциональной скорости роста опухоли в начале лечения.

Гипотеза Goldie-Coldman предсказывает, что часть опухолевых клеток будет устойчива к любому химиотерапевтическому воздействию. При росте опухоли растет и доля резистентных клеток. Чем больше опухоли или чем больше отсрочка начала химиотерапии, тем более резистентных клетки. Предполагается, что лучшей стратегией лечения будет чередование циклов двух разных химиотерапевтических препаратов [6].

Данные законы, модели и гипотезы действуют не во всех случаях, если судить по экспериментальным данным, и не дают возможности оптимизировать или индивидуализировать лечение. Несмотря на это, модели помогают изучать поведение опухоли и открывают возможности разработки эффективных схем лечения.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В большинстве работ, посвященных математическим моделям роста опухоли, анализируется рост солидной опухоли. Сольдные опухоли имеют неизменный очаг воспаления, обладают низкой способностью к перемещению и растут в основном за счет деления клеток, что делает их удобным объектом для изучения.

Главной задачей математического моделирования остается разработка оптимального управления сложными биологическими системами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Collins V.P., Loeffler R.K., Tivey H. Observations on growth rates of human tumors. 76(5):988-1000. PMID: 13362715. 1956 г.
- [2] Калиничева М.М., Котин В.В., Писаренко Е.М. Моделирование роста опухоли эпителиальных тканей с использованием алгоритмов клеточных автоматов // Альманах клинической медицины. 2008 г. Т. 17, № 1. С. 179–182.
- [3] Жукова И.В., Колпак Е.П. Математическая модель солидной опухоли. // Естественные и математические науки в современном мире. 2013 г. №13. С. 18-25.
- [4] Тюрюмина Э.Я. Незнанов А.А. Объединенная математическая модель роста первичной опухоли и первичных метастазов рака молочной железы (IV стадия РМЖ) //Сборник трудов 39-й междисциплинарной школы-конференции ИПФИ РАН «Информационные технологии и системы 2015». 2015 г. С. 38-51.
- [5] Колобов А.В., Анашкина А.А., Губернов В.В., Полежаев А.А. Математическая модель роста опухоли с учетом дихотомии миграции и пролиферации. // Компьютерные исследования и моделирование. Т. 1. № 4. 2009 г. С. 415-422.
- [6] Mathematical models for cancer growth [электронный ресурс]. – URL: <https://callaix.com/tumorgrowth> (Дата обращения 05.05.2022).

# Разработка цифрового осциллографа

Ф. А. Десятириков<sup>1</sup>, Е. А. Саков, В. Г. Деревянко, С. А. Зуев

Воронежский государственный университет

<sup>1</sup>science2000@ya.ru

**Аннотация.** Данная работа посвящена проектированию и реализации цифрового осциллографа. Разработан прототип осциллографа без внешнего аналогово-цифрового преобразователя. В техническом решении использована плата Arduino UNO R3 на базе микроконтроллера ATmega328p с тактовой частотой 16 МГц и OLED экран с диагональю 0.97 дюйма.

**Ключевые слова:** осциллограф, Arduino, прототипирование

## I. ВВЕДЕНИЕ

Техника осциллографирования получила чрезвычайно широкое распространение при измерениях, настройке и испытаниях во многих областях науки и техники. Осциллограф во многих случаях является основным прибором, без которого невозможен ремонт и настройка радиоаппаратуры. Он позволяет непосредственно на экране наблюдать форму исследуемого сигнала и производить необходимую оценку его параметров. Для одновременного исследования нескольких электрических сигналов применяют многолучевые или многоканальные осциллографы. Осциллографы широко используют для исследования не только электрических, но и неэлектрических величин, предварительно преобразованных в пропорциональные им электрические сигналы.

Основным достоинством осциллографа, обеспечившим ему широкое распространение, является наглядность изображения на экране исследуемого процесса, особенно полезная при исследованиях и измерениях быстропеременных, импульсных и других кратковременных процессов.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Осциллограф – регистрирующий прибор, предназначенный для исследования (наблюдения, записи, измерения) амплитудных и временных параметров электрического сигнала, подаваемого на его вход, и наглядно отображаемого непосредственно на экране либо регистрируемого на фотоленту.

Сфера применения осциллографов достаточно велика. С помощью этого прибора проводят измерения напряжения, тока, мощности, полного сопротивления, параметров катушек индуктивности, фазы и частоты, модуляции, а также исследование импульсов, электронных ламп, частотных и фазовых характеристик приемников и усилителей, проводятся магнитные исследования. Кроме того, осциллографы применяются для исследования и измерения неэлектрических величин, например, давления и коротких промежутков времени. При помощи осциллографа можно контролировать качество поверхности и форму деталей и изделий.

В настоящее время широко используются электронно-лучевые (аналоговые) и цифровые осциллографы.

Периодические сигналы произвольной формы эффективно исследуются электронно-лучевыми осциллографами, параметры которых за последнее время достигли высокого уровня. Блок-схема простейшего электронно-лучевого осциллографа включает: электронно-лучевую трубку, блок питания, блок временной развертки, который предназначен для перемещения светящегося пятна по экрану трубки с определенной (регулируемой) скоростью. Это перемещение обычно производится по горизонтальной оси, которая носит название «оси времени» или оси X. Если одновременно с этим заставить пятно перемещаться перпендикулярно к оси времени так, чтобы это перемещение было пропорционально измеряемой величине, то прочерчиваемая светящимся пятном на экране трубки кривая (ее называют осциллограммой) позволит судить не только о самой измеряемой величине, но и о законе ее изменения во времени. Ось, в направлении которой перемещается пятно за счет исследуемой величины, носит название «оси явления» или оси Y. Можно несколько изменить способ получения осциллограммы, заставив пятно перемещаться по оси X не в зависимости от времени, а в зависимости от какого-либо другого параметра. Кроме перечисленных трех блоков применяются также усилители напряжения в канале оси X и в канале оси Y, а также делители, обеспечивающие снижение напряжения.

Современные осциллографы снабжаются рядом дополнительных устройств, предназначенных главным образом для обеспечения удобств в эксплуатации прибора и повышения точности измерений. Управление процессом регистрации электрического сигнала посредством данного типа осциллографа производится в ручном режиме. Ещё один тип осциллографа – цифровой, в котором аналоговый исследуемый сигнал сразу во входном блоке оцифровывается с помощью аналогово-цифрового преобразователя (заменяется последовательностью цифровых эквивалентов) и запоминается в дискретной памяти. Зафиксированный в памяти исследуемый процесс может быть затем использован любым образом, в том числе и для отображения формы процесса. Запоминание цифровых эквивалентов мгновенных значений исследуемого сигнала намного упрощает задачу измерения и обработки параметров сигнала.

Получение и хранение информации в цифровом виде позволило в цифровых осциллографах (ЦО) перейти к новому типу индикаторов – плоским матричным экранам. Дискретность экрана при этом естественным образом согласуется с дискретной формой представленной информации. Использование плоских

матричных экранов в ЦО снижает габариты и массу устройства, устраняет источник питания высокого напряжения и резко сокращает число органов управления экраном [1].

Наряду с повышением точности осциллографирования и измерения, особенно однократных сигналов, ЦО позволяет полностью автоматизировать процесс измерения, легко осуществлять дистанционное и машинное управление режимами работы, проводить математическую и логическую обработку информации [2, 3].

Указанные несомненные преимущества данного типа осциллографа – возможность записи сигнала, математической обработки, многоканальная регистрация и др. – способствуют постепенному вытеснению аналоговых осциллографов цифровыми.

Таким образом, целью нашей работы было – разработать проект портативного цифрового осциллографа с учетом минимизации его перспективной стоимости, а также произвести прототипирование найденных решений.

Объектом исследования являлась цифровая платформа Arduino. Предметом исследования являлось изучение возможности реализации портативного осциллографа. Методы исследования – системный анализ, инструментальный, модели и методы программирования.

### III. СЕРВИСЫ ПЛАТФОРМЫ ARDUINO

Arduino – это платформа для быстрой разработки электронных устройств и экспериментов в области электроники, робототехники, автоматики и автоматизации процессов. Платформа удобна, имеет простотой язык программирования, а также открытую архитектуру и программный код, благодаря чему пользуется огромной популярностью во всем мире. Устройство программируется без использования USB программаторов.

Микроконтроллер программируется при помощи языка Arduino и среды разработки Arduino.

Язык программирования представляет собой язык C++ с фреймворком Wiring, он имеет отличия в написании кода с некоторыми особенностями. Облегчает написание работающей программы имеющийся комплект библиотек Arduino, включающий в себя объекты и функции.

Программирование целиком ведется через собственную программную оболочку Arduino IDE. В этой оболочке имеется текстовый редактор, менеджер проектов, препроцессор, компилятор и инструменты для загрузки программы в микроконтроллер. Оболочка написана на основе проекта Processing на Java, работает под Windows, Mac OS X и Linux.

Основанные на Arduino проекты устройств могут работать самостоятельно, или взаимодействовать с программным обеспечением на компьютере. Платы могут быть куплены в сборе или собраны пользователем самостоятельно. Программная часть состоит из бесплатной программной оболочки (IDE) для написания программ, их компиляции и программирования

аппаратуры. Аппаратная часть представляет собой набор смонтированных печатных плат, которые продаются официальным производителем, либо сторонними производителями.

На базе Arduino устройства могут получать информацию посредством различных датчиков об окружающей среде, а также могут управлять различными исполнительными устройствами.

### IV. РАЗРАБОТКА ОСЦИЛЛОГРАФА НА ПЛАТЕ ARDUINO

В настоящее время актуальной является задача импортозамещения в электронике и программной инженерии. С этой целью была предпринята попытка отработки заместительной программной реализации для Arduino UNO R3 при решении задачи для создания портативного осциллографа.

Таким образом, объектом исследования являлось автоматизированное электронное измерительное устройство. Предметом исследования являлось улучшение технической компоновки устройства и обеспечение его программным кодом. Реализация прототипа устройства состояла из нескольких этапов.

На первом этапе был произведен выбор функциональности будущего устройства. Основное внимание было уделено функциям просмотра формы сигнала в реальном времени и возможности изменения времени заполнения буфера отрисовки.

На втором этапе для реализации выбранного на первом этапе функционала были сформулированы требования к органам управления и устройству вывода. Эти требования сводились к следующему:

1. Переключение режимов буфера.
2. Сброс текущего показателя буфера.
3. Отрисовка данных буфера.

На третьем этапе работы анализ различных вариантов решения показал, что оптимальная архитектура соответствует представленной на рис. 1.

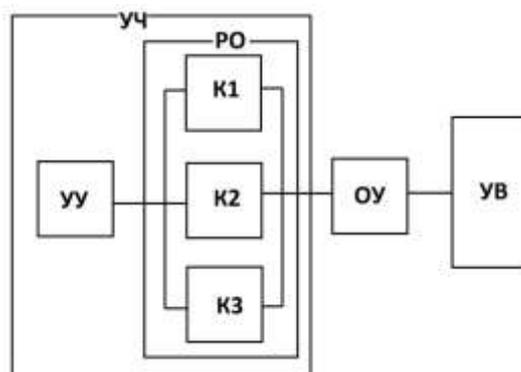


Рис. 1. Архитектура устройства

Здесь: УУ – устройство управления. УЧ – управляющая часть, РО – регулирующий орган, ОУ – объект управления (измерительная система), УВ – устройство вывода, S – измеряемый сигнал.

Управляющая часть УЧ содержит 3 кнопки: масштабирование по времени в сторону увеличения (K1),

то же – в сторону уменьшения (K2), сброс (K3). Устройство вывода информации о сигнале S представляет собой OLED экран с диагональю 0.97 дюйма. ОУ построена на плате Arduino UNO R3 на базе микроконтроллера ATmega328p с тактовой частотой 16 МГц.

Четвёртый этап состоял в написании кода для оцифровки сигнала в измерительной части системы, а также для вывода результатов на дисплей.

Средой разработки выбрана Arduino IDE на основании следующего: открытость, простота, нативная поддержка выбранного микроконтроллера. Программный код написан на языке C++. Использован фреймворк Arduino.

Задача отрисовки данных на дисплей решена с помощью библиотеки Adafruit\_SSD1306.

Для низких значений времени отрисовки кадра используются регистры прескейлера микроконтроллера. Их значения устанавливаются согласно нормативным параметрам.

```

if (mode < 7) {
  // if mode < 7 we using hardware ADC prescaler
  if (mode & 1)
    sbi(ADCSRA, ADPS0);
  else
    cbi(ADCSRA, ADPS0);
  if (mode & 2)
    sbi(ADCSRA, ADPS1);
  else
    cbi(ADCSRA, ADPS1);
  if (mode & 4)
    sbi(ADCSRA, ADPS2);
  else
    cbi(ADCSRA, ADPS2);
} else {
  sbi(ADCSRA, ADPS0);
  sbi(ADCSRA, ADPS1);
  sbi(ADCSRA, ADPS2);
}

```

Данный программный продукт является структурной составляющей технической реализации цифрового осциллографа.

## V. ПРОТОТИПИРОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Реализация найденных решений доведена нами до уровня прототипа цифрового осциллографа.

Все элементы устройства расположены в корпусе. Типовая процедура прототипирования корпуса состоит в следующем [4]. Корпус был создан в программе Siemens NX 10. Программа использует ядро геометрического моделирования Parasolid. Зная размеры аккумулятора и имея в свободном доступе чертеж платы Arduino UNO, сначала был создан чертеж самого корпуса. Далее в программе была выбрана плоскость для создания в ней чертежа прямоугольника, вытягиванием получен параллелепипед. В плоскости, перпендикулярной начальной, были сделаны отверстия под разъёмы. В начальной плоскости созданы опоры, на которых должна держаться плата. После этого была загружена 3D-модель

платы и в «сборке» прикреплена к корпусу, выполнены неровности под плату. После этого файл сохранен в формате .stl и распечатан на 3D-принтере.

На рис. 2 представлен общий вид разработанного изделия в корпусе и показано внутреннее устройство портативного осциллографа (для иллюстрации масштаба приложена бытовая спичка).



Рис. 2. Прототип цифрового осциллографа

На входе осциллографа предусмотрен разъём BNC (показан справа), который предназначен для подключения измерительного щупа с делителем.

Для питания осциллографа в корпус установлен литий-ионный аккумулятор со стабилизатором напряжения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена методика разработки портативного осциллографа, реализованного на основе Arduino UNO R3 на базе микроконтроллера ATmega328p с тактовой частотой 16 МГц. Синтезированный осциллограф не использует внешний аналого-цифровой преобразователь, а только плату Arduino.

В результате предложено техническое решение задачи по оцифровке сигнала и выводу его на OLED экран в реальном времени.

Написан программный код (на языке C++ в среде разработки Arduino IDE), реализующий заданный функционал.

Данный осциллограф не является профессиональным инструментом, однако он хорошо подойдет для образовательных целей при изучении основ электроники.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дьяконов В.П. Современная осциллография и осциллографы. Москва: Солон-Пресс, 2005. 320 с.
- [2] Akimov V.I., Polukazakov A.V., Zuev S.A., Desyatirikov F.A. "Development of Statistical Models of Systems and Automation Tools for Modeling and Forecasting Technological Processes" in Proc. 2022 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2022 ElConRus), Doi: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755833
- [3] Кийко В.В. Программная оболочка PSpice control shell, программа моделирования Pspice и программный осциллоскоп probe. Екатеринбург: Издательство УГТУ, 2001. 36 с.
- [4] Desyatirikov F.A., Khripunov Yu.V. "Metalens Concept for Focusing Wi-Fi Radiation" in Proc. 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2020 ElConRus), Doi: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039010

# Сравнительный анализ решений для контейнеризации

Г. М. Дибиров<sup>1</sup>, И. Н. Бабков<sup>2</sup>, М. М. Ковцур<sup>3</sup>  
Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича  
<sup>1</sup>gamid\_dibirov@internet.ru, <sup>2</sup>ib9809@mail.ru, <sup>3</sup>maxkovzur@mail.ru

**Аннотация.** На сегодняшний день невозможно представить какой-либо крупный программный продукт, обходящийся без технологий виртуализации. Большие масштабы развёртывания, затратность ресурсов памяти, проблемы совместности и т.п. привели к появлению нового типа виртуализации – контейнеризации. Данная статья отражает основные отличия средств контейнеризации, учитываемые при выборе реализации технологии.

**Ключевые слова:** контейнеризация, виртуализация, Docker, Podman, LXC, безопасность

## I. ВВЕДЕНИЕ

Контейнеризация стала основной тенденцией в разработке программного обеспечения в качестве альтернативы или дополнения к виртуализации. Она включает в себя инкапсуляцию или упаковку программного кода и всех его зависимостей, чтобы он мог работать единообразно и последовательно в любой инфраструктуре. Технология быстро развивается, что является ощутимым преимуществом для разработчиков, а также для общей инфраструктуры программного обеспечения (ПО).

На сегодняшний день имеется более десятка реализаций механизма контейнеризации. Наиболее известными решениями являются Docker, LXC (Linux Container) и Podman. Все три механизма имеют открытый исходный код, работают на ОС Linux, однако Docker и Podman предусматривают возможность установки дополнительных средств мини-виртуализации для работы на Windows и MacOS.

С точки зрения популярности Docker продолжает держать первенство в технологиях контейнеризации. Статистика запросов в интернете по Docker явно показывает огромный разрыв, в среднем на два порядка относительно других технологий. Кроме того, в отличие от других технологий, Docker имеет равномерную плотность запросов, что говорит о каждодневном интересе к данному механизму.

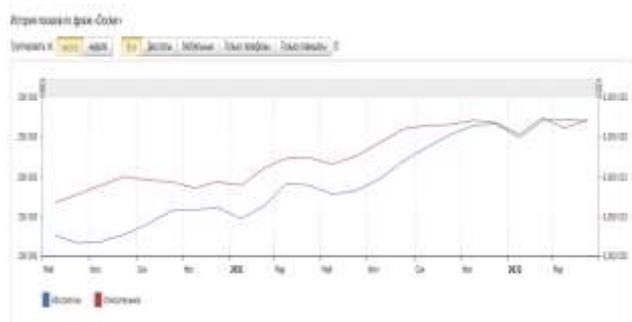


Рис. 1. График истории показов по фразе «Docker» в Яндекс Wordstat

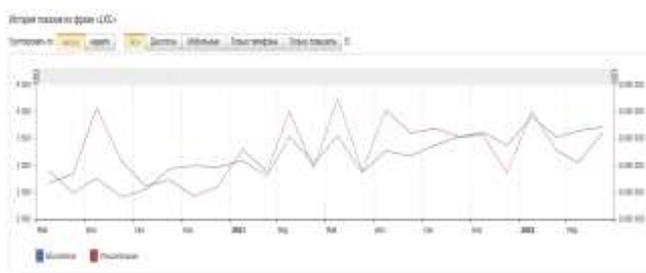


Рис. 2. График истории показов по фразе «LXC» в Яндекс Wordstat

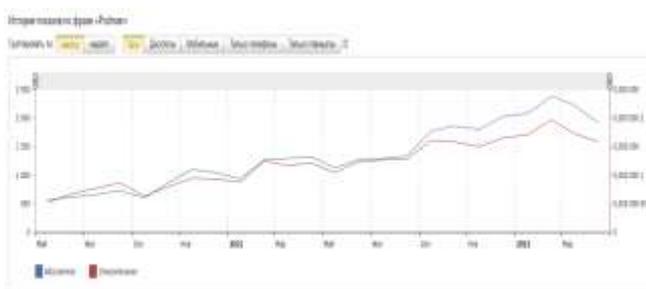


Рис. 3. График истории показов по фразе «Podman» в Яндекс Wordstat

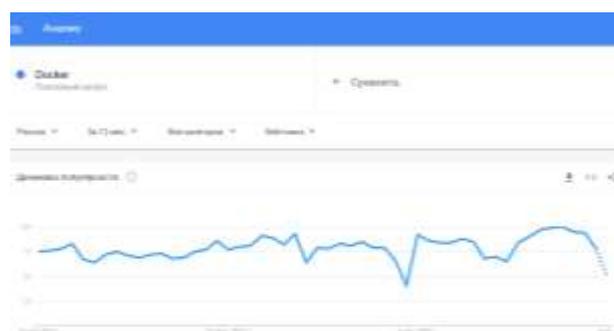


Рис. 4. График динамики популярности фразы «Docker» в Google Trends за 12 месяцев

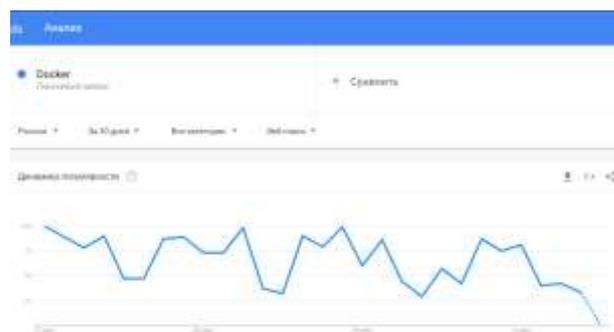


Рис. 5. График динамики популярности фразы «Docker» в Google Trends за 30 дней

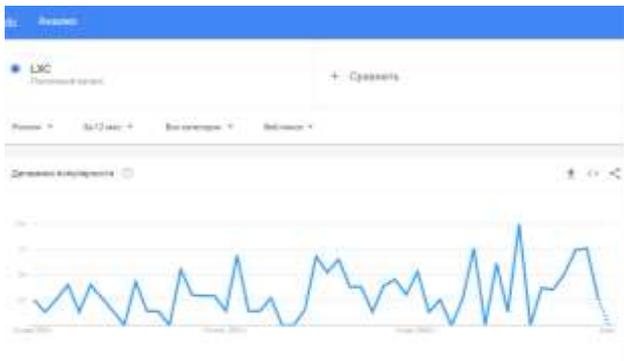


Рис. 6. График динамики популярности фразы «LXC» в Google Trends за 12 месяцев

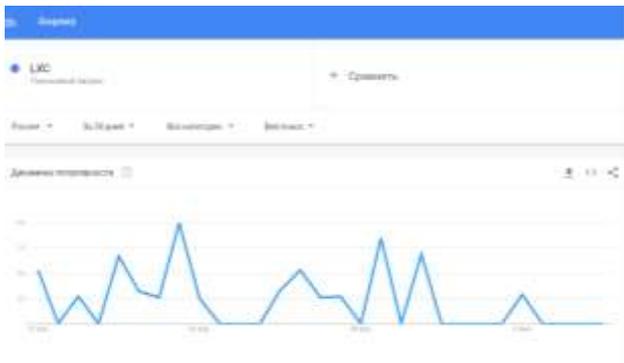


Рис. 7. График динамики популярности фразы «LXC» в Google Trends за 30 дней

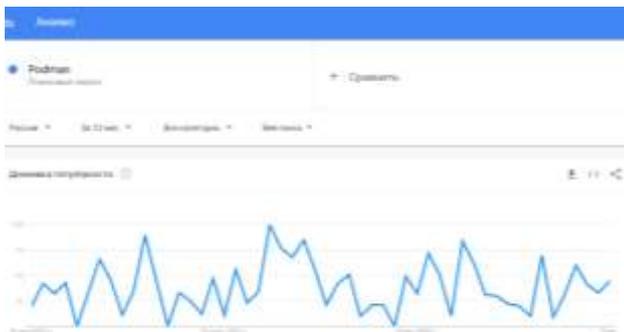


Рис. 8. График динамики популярности фразы «Podman» в Google Trends за 12 месяцев

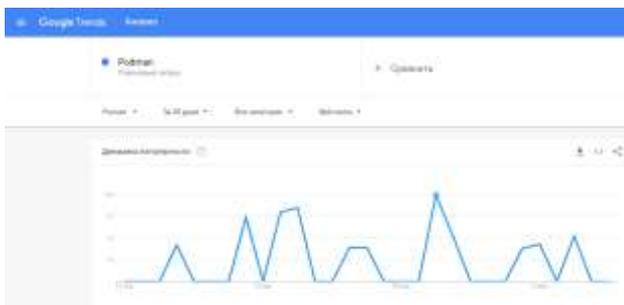


Рис. 9. График динамики популярности фразы «Podman» в Google Trends за 30 дней

Docker стал своего рода популяризатором контейнеризации в мире IT, удерживая лидерство и по сей день. Podman по сути является продолжением технологии Docker с некоторыми интересными особенностями.

## II. СРАВНЕНИЕ DOCKER И LXC

Контейнеры Linux (LXC) более гибки в дизайне. Они немного ближе к виртуальным машинам – можно настроить и установить что-либо с LXC так же, как и с VMs. Функции ядра, такие как chroot, sgroups, и namespaces могут быть использованы для создания виртуальной среды LXC. Эти механизмы ядра помогают контролировать использование ресурсов и видимость процессов в остальной части системы.

Контейнеры Docker изначально были разветвлены из проекта LXC. Однако разница заключается в дизайне: контейнеры Docker были разработаны специально для приложений микросервисов. Это сильно отличает их от виртуальных машин. Docker прост в использовании для разработчиков; абстракция сетей, хранения и ведения журнала делает его таким, что разработчикам не требуется никаких предварительных знаний о Linux.

Простота, которую Docker предлагает разработчикам, – это то, что сделало его таким популярным. Обе платформы просты в использовании, но ориентированы на разные аудитории.

LXC отличается большей скоростью загрузки по сравнению с виртуальной машиной – ему не нужно упаковывать всю ОС и полную настройку машины с сетевыми интерфейсами, виртуальными процессорами и жестким диском.

Контейнеры Docker также имеют небольшой вес, что значительно повышает их скорость. Docker добавляет дополнительный уровень к абстрактному хранилищу и сети, но в большинстве случаев не возникает значительных проблем с производительностью, вызванных этим. Создание и запуск контейнера Docker занимает несколько секунд. Поскольку Docker может работать на существующей ОС, которая уже инициализирована, можно загрузить контейнер из его образа почти мгновенно.

По умолчанию Docker поддерживает многоуровневые контейнеры. Это означает, что результирующий контейнер представляет собой последовательную комбинацию изменений, внесенных в файловую систему, аналогичную истории Git. Слои могут загружаться параллельно, что может дать преимущество в скорости при одновременном запуске многих контейнеризированных приложений на нескольких машинах.

Один момент, который идет в пользу Докера, – это тенденция создавать distroless образы докеров. С distroless у пользователя есть минимум – только его приложение, скомпилированный код и необходимая привязка. Изображения LXC направлены на репликацию дистрибутивов Linux, таких как Ubuntu, Debian или Alpine. Тот факт, что Docker стремится упаковывать отдельные приложения, может дать преимущество при подготовке сотен контейнеров.

Разница в производительности между LXC и Docker почти незначительна. Оба обеспечивают быстрое время загрузки. Загрузка изображения LXC может быть медленнее, чем изображения Docker без дистрибутива, но не все изображения Docker являются дистрибутивными, что дает Docker возможность для улучшения по сравнению с LXC.

LXC обогащен конфигурациями безопасности, такими как групповые политики и профиль AppArmor по умолчанию, чтобы защитить хост от случайного злоупотребления привилегиями внутри контейнера.

Docker отделяет операционную систему от запущенных на ней служб, чтобы обеспечить безопасную рабочую нагрузку, но тот факт, что Docker работает от имени root, может увеличить подверженность вредоносным программам. Это связано с тем, что демон Docker, который управляет объектами Docker, такими как сети, контейнеры, изображения и тома, и выполняет запросы API Docker, также работает как root на хост-машине. Разработчики обычно проверяют установки Docker для выявления потенциальных уязвимостей.

LXC ставит безопасность во главу угла. Он предоставляет функции безопасности, включая поддержку возможностей Linux, чтобы помочь пользователю сохранить контроль над контейнерной средой и размещенными приложениями. Подход Docker к хранению различных компонентов приложения в отдельных контейнерах является плюсом. Но эта стратегия также имеет свои недостатки безопасности, если размещаются сложные приложения, которые могут потребовать внимания опытного инженера по безопасности.

### III. СРАВНЕНИЕ DOCKER И PODMAN

Docker использует демона – программу, работающую в фоновом режиме, для создания образов, запуска контейнеров, управления сетями. Демон является посредником в клиент-серверной логике. Podman, в свою очередь, имеет архитектуру без демона, позволяющая работать контейнерам без root привилегий. В среднем до 58 % образов выполняют процесс в контейнере от root. Контейнеры Podman работают с теми же разрешениями, что и пользователь, который их запустил. Это решает значительную проблему безопасности, хотя все равно

можно запускать контейнеры с правами root, если действительно это необходимо.

Как самостоятельный инструмент, Docker может самостоятельно создавать образы контейнеров. Podman требует помощи другого инструмента под названием Buildah, который выражает его специализированный характер: он предназначен для запуска, но не для создания контейнеров самостоятельно.

Что касается вспомогательных инструментов и программ, Docker однозначно имеет в этом преимущество. У него имеется свой реестр для образов – Docker Hub, а также средства у – Docker Swarm, Docker Compose. Podman же использует отдельные системы, к примеру Kubernetes. Данная система также может использоваться для управления и Docker-контейнерами.

Стоит также отметить, что у Podman есть возможность подключить пакет podman-docker для работы Docker команд в Podman-системе.

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, нельзя однозначно сказать, что какое-то определенное решение является наилучшим подходом для контейнеризации приложения, поскольку каждое решение имеет свои достоинства и недостатки. Выбор в пользу Docker обеспечит простоту и удобство, выбор же LXC – безопасность. А, выбирая Podman, можно сочетать некоторые плюсы обоих решений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Маркелов А.А., Введение в технологии контейнеров и Kubernetes. ДМК Пресс, 2019. 194 с.
- [2] Гаврилов А., 5000 слов о защите контейнеров. Инфраструктура 3.0 Jetinfo, №7-8 (307) 2021.
- [3] Rasmus Emilsson, Container performance benchmark between Docker, LXD, Podman & Buildah. University of Skövde, 2020
- [4] Babak Bashari Rad, Harrison John Bhatti, Mohammad Ahmadi. An Introduction to Docker and Analysis of its Performance.

# Разработка модуля отчетности информационной системы «Паспортизация» для сбора и унификации данных оборудования на атомных электростанциях

Н. И. Кравченко, А. М. Иванов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
natalia-rin@mail.ru

**Аннотация.** В данной статье рассматривается модуль отчетности для информационной системы «Паспортизация», предназначенной для нормализации базы данных. Приведены различные проблемы и задачи, которые решает данный модуль, а также его техническая реализация, в том числе инструменты и особенности. Представлены типы и примеры различных отчетов, их графическая интерпретация.

**Ключевые слова:** паспорттизация, база данных, инструмент сбора и унификации данных, модуль отчетности, отчеты, информационная система

## I. ВВЕДЕНИЕ

Отчетный модуль является важной частью инструмента сбора и унификации данных, так как позволяет выявлять ошибки и просматривать статистику по необходимым данным, чтобы понимать степень заполненности БД и в случае нехватки какой-либо информации.

Инструмент является актуальным за счет его применения сразу для ряда станций и реализации на востребованной платформе сервера базы данных MS SQL и использования HTML5 для пользовательского интерфейса.

## II. Модуль отчетности

Отчеты представляют собой структурированные файлы в формате Excel, которые выгружаются из ПО «Паспортизация» и используются для понимания/анализа текущего состояния БДО. Отчет может содержать информацию по всем станциям одновременно или по конкретно выбранной станции/ветке структуры.

Все реализованные в ПО «Паспортизация» представлены в отдельной вкладке «Отчеты» (рис. 1).

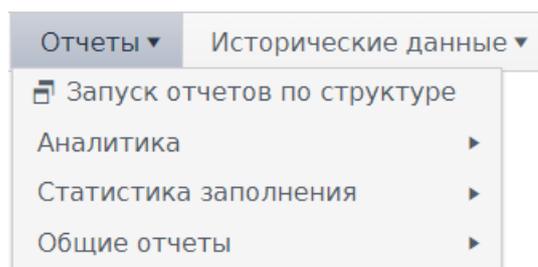


Рис. 1. «Отчеты»

### A. Группы отчетов

Все отчеты разделены на следующие группы:

1. Группа «Запуск отчетов по структуре» содержит отчеты, которые могут быть выгружены как по всем станциям, так и по конкретно выбранной станции/ветке структуры. Преимущество выгрузки отчетов с помощью данной вкладки – сокращение/ограничение объема выгружаемых данных. Более подробное описание отчетов по данной группе представлено в разделе «Запуск отчетов по структуре».
2. Группа «Аналитика»: содержит отчеты, которые позволяют проанализировать наполненность/качество заполнения БДО в разрезе всех станций.
3. Группа «Статистика заполнения»: содержит отчеты по наполненности/качеству заполнения конкретных полей, в том числе по используемым заглушкам.
4. Группа «Общие отчеты»: содержит отчеты, в которых нет деления данных по станциям, и которые используются для нормализации/формирования целевого справочника.

### В. Создание отчетов

На каждый тип представлено несколько вариантов отчетов (рис. 2).

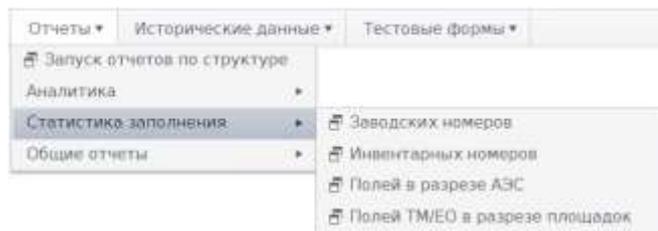


Рис. 2. «Статистика заполнения»

В целом все отчеты имеют схожий вид (рис. 3). Их можно выгрузить для всех станций сразу или для одной, выбранной из выпадающего списка станций.

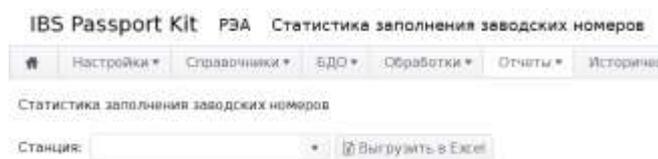


Рис. 3. «Статистика заполнения заводских номеров»

Отчет содержит информацию о заполнении поля ЕО «Заводской номер» в разрезе классов:

- общее количество ЕО данного класса;
- количество ЕО, для которых поле «Заводской номер» заполнено/не заполнено;
- процент ЕО от общего количества для которых поле «Заводской номер» заполнено;
- количество ЕО, для которых поле «Заводской номер» заполнено значением «б/н» и «н/д»;
- количество ЕО, для которых поле «Заводской номер» заполнено заглушкой из перечня (не б/н) и не «н/д»/заполнено значением отличным от заглушки.

Для выгрузки отчета необходимо выполнить следующие действия:

1 ШАГ Для выгрузки отчета по всем станциям нажать «Выгрузить в Excel».

2 ШАГ Для выгрузки отчета по конкретной станции выбрать интересующую станцию в выпадающем списке.

3 ШАГ Нажать «Выгрузка отчета».

Тогда при выборе «Балаковская АЭС» из выпадающего списка будет выгружен Excel-файл, имеющий следующий вид (рис. 4).

The screenshot shows an Excel spreadsheet with two columns: 'Станция' (Station) and 'Инд. класса' (Class ID). The 'Станция' column contains 'Балаковская АЭС' for all rows. The 'Инд. класса' column contains values from 'XXXX' down to 'EO\_V\_0301'. The rows are numbered 1 through 21.

Рис. 4. «Выгрузка по Балаковской АЭС»

### С. Графическая интерпретация

Исключением от тривиальных отчетов является графическое отображение статистики (рис. 5).

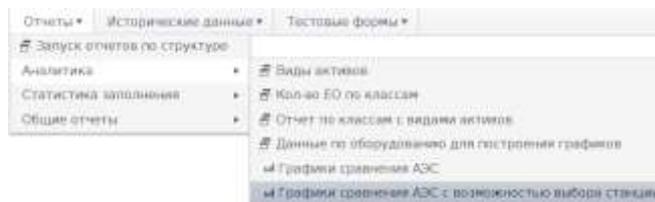


Рис. 5. «Графики сравнения АЭС с возможностью выбора станции»

Для построения графика необходимо (рис. 6):

1 ШАГ Необходимо выбрать дату из выпадающего списка. Если ничего не выбирать, то по умолчанию выберется самая верхняя, то есть самая свежая дата.

2 ШАГ Для построения графика по конкретной станции выбрать интересующую станцию в выпадающем списке, либо можно выбрать несколько станций.

3 ШАГ Нажать «Выгрузка отчета».

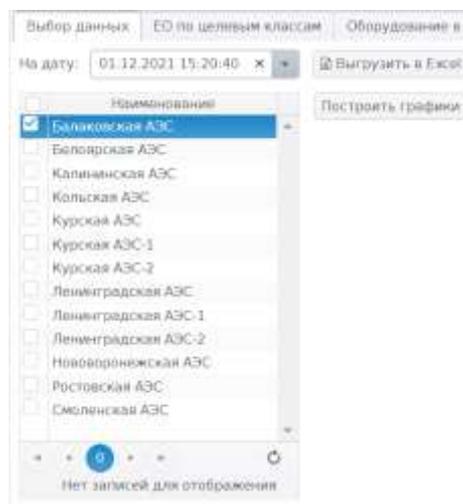


Рис. 6. «Параметры графика»

Тогда, например, при выборе Балаковской АЭС и самой верхней даты их списка получается следующий график (рис. 7).

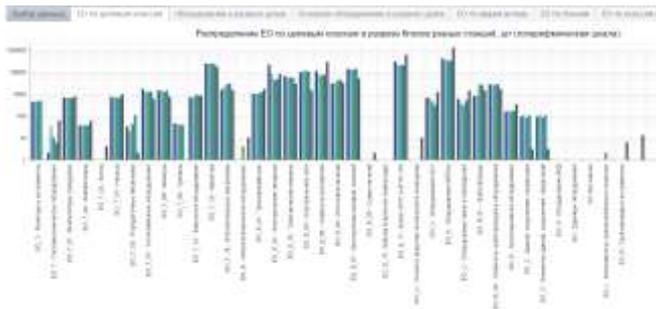


Рис. 7. «Столбчатая диаграмма»

Это столбчатая диаграмма, в которой все ЕО распределены по классам ЕО в разрезе блоков Балаковской АЭС, проще говоря, на графике изображена принадлежность количества приборов к определенному классу.

Под столбчатой диаграммой отображается нормированный линейчатый график, который более наглядно показывает процентное содержание ЕО по каждому классу (рис. 8).

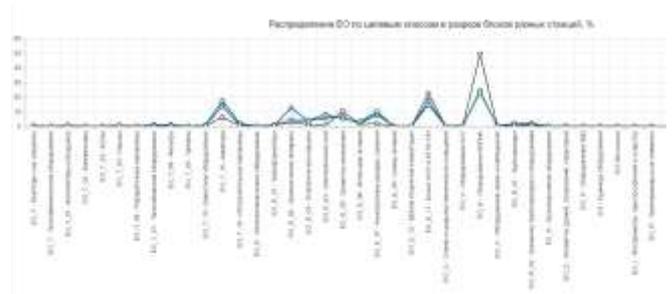


Рис. 8. «Линейчатая диаграмма»

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отчетный модуль – важная составная часть информационной системы «Паспортизация», предназначенная для нормализации БД, то есть с целью выявления ряда ошибок в данных для дальнейшего их исправления и миграции в конечное ПО.

# Методы автоматизации процесса оптимального планирования промышленных производств

О. Е. Шашихина

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)  
shashikhina@mail.ru*

**Аннотация.** В статье рассматривается актуальность и представлены результаты разработки проблемно-ориентированных методов и специализированного программного комплекса для автоматизации решения задачи оптимального календарного планирования для различных гибких многоассортиментных промышленных производств. Предлагаемые методы позволяют эффективно решать задачи планирования различных размерностей за короткое машинное время, обеспечивая эффективную автоматизацию процесса производственного планирования. Предложенный программный комплекс обладает различными интеллектуальными интерфейсами, дополняемыми и обновляемыми базами данных продукции, оборудования и технологических регламентов и эргономичной интерактивной системой визуализации полученных производственных планов. Программный комплекс отличается возможностью расширения и настройки на конкретное производство благодаря специальным формам загрузки и обработки экспертных знаний об объекте планирования, что позволяет корректно формировать постановку задачи планирования и производить расчет целевых функций. Внедрение предлагаемых методов и программного комплекса позволяет значительно повысить эффективность процесса планирования в рамках общей системы управления современными инновационными предприятиями, снизить стоимость производства и упростить процесс принятия производственных управленческих решений.

**Ключевые слова:** программный комплекс, методы оптимизации, автоматизация планирования, производственное календарное планирование

## I. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение оптимальности результатов процесса календарного планирования и составления производственных расписаний является обязательным условием эффективного управления современными промышленными многоассортиментными предприятиями.

Сложность обеспечения оптимальности производственного расписания зачастую обусловлена необходимостью учёта в модели различных характеристик производственного процесса: множество ассортимента продукции и его постоянное изменение, сложность и разнообразие конфигураций и типов производственного оборудования, а также учёта ограничений, связанных со сроками выполнения заказов. В связи с необходимостью учета множества типов и конфигураций производственных линий и оборудования, изготавливающих различный ассортимент продукции, в процессе нахождения оптимальной очередности

размещения и выполнения заказов требуется рассмотреть большое пространство поиска на множестве допустимых решений за приемлемое время. В связи с этим автоматизация решения таких задач представляет значительные вычислительные сложности, обусловленные чрезвычайно большой размерностью задач, нелинейным характером моделей, целевых функций и требуемой оперативностью получения решений [1]. Поэтому, исходя из математической вычислительной сложности задачи производственного планирования, а также учитывая современные условия больших объемов производства, сложные логистические цепочки поставок сырья и ситуацию жесткой рыночной конкуренции, крайне актуальны разработка и внедрение в систему управления предприятиями специализированных проблемно-ориентированных методов и программного комплекса автоматизации процесса календарного производственного планирования.

## II. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ПЛАНИРОВАНИЯ.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЛАНА

Объектом планирования является определённый класс современных инновационных многоассортиментных производств. Рассматриваемые производства изготавливают широкий ассортимент продукции (до 500 видов товаров в различных категориях). Количество изготовленных в рамках одного завода товаров может достигать порядка 10–15 тыс. наименований готовых изделий в год. Производство ведется на сложном оборудовании различных конфигураций, на множестве производственных линий (от 1 до 20 производственных линий) или рабочих центров. Производственное оборудование является перенастраиваемым, производственные линии характеризуется многофункциональностью и многовариантностью работы по сырью, продукции и производительности (среднее количество вариантов перенастроек >10). Количество различных типов технологических агрегатов, обеспечивающих производительность и возможность перенастройки, в рамках одной линии может достигать 30 и более, при этом возникают сотни технологических взаимосвязей между множеством параметров оборудования.

Для эффективной автоматизации процесса поиска оптимального производственного плана было выполнено формализованное описание многоассортиментных промышленных производств как объекта планирования и сформулирована математическая постановка задачи оптимизации.

В общем виде процесс календарного планирования производств можно рассмотреть следующим образом. Дан вектор входных данных  $X$ , включающий: множество производственных заказов с описанием и количеством типов продукции и директивными сроками выполнения каждого заказа; множество производственного оборудования с заданными характеристиками и горизонт планирования. На процесс планирования влияет экспертная информация, формализованная в задаче планирования (вектор  $U$ ). Это, во-первых, различные технологические регламенты, описывающие процесс настройки и перенастройки оборудования и его текущее состояние (готово к работе, в ремонте, не функционирует). Также имеются данные о временных и стоимостных показателях производственного процесса, влияющих на формирование и расчет целевых функций задачи оптимизации. В зависимости от размерности задачи (количество заказов, производственных линий и сроки планирования) существуют рекомендации по выбору метода оптимизации и его настроек. Результатом планирования (вектор  $Y$ ) является распределение заказов по производственным линиям с указанием начала и времени выполнения каждого отдельно взятого заказа.

Постановка задачи оптимизации производственного планирования выглядит следующим образом:

Пусть дан вектор входных параметров  $X = (O, E, Pd)$ ,  $O = \{O_i, i = 1, N\}$  – вектор описывающий множество заказов, которые необходимо распределить по производственными линиями;  $E = \{E_j, j = 1, Me\}$  – набор производственных линий (машин, агрегатов, рабочих центров и др.);  $Pd = (\tau_o, Y_{cr})$  – вектор, описывающий параметры планирования, где  $\tau_o = [\tau_b, \tau_e]$  – параметр, определяющий период планирования,  $\tau_b$  – дата начала периода планирования;  $\tau_e$  – дата окончания периода планирования;  $Y_{cr}$  – параметр, определяющий критерий оптимизации.

Тогда для заданного вектора входных параметров  $X = (O, E, Pd)$ , требуется найти такое значение вектора варьируемых параметров  $Q^{opt} = \{Q_i: Q = (j, \tau_{oi}, k, \tau_i) j = 1, Me, k = 1, L, L \in N, i = 1, N\}$ , т. е. такое оптимальное размещение  $N$  заказов на  $Me$  производственных линиях в рамках периода планирования  $[\tau_b, \tau_e]$ , которое обеспечит экстремум целевой функции:  $F \rightarrow \min (max)$ .

Вектором варьируемых параметров является  $Q = \{Q_i: Q = (j, \tau_{oi}, k, \tau_i) j = 1, Me, k = 1, L, L \in N, i = 1, N\}$  – вектор, описывающий распределение заказов по производственным линиям,  $\tau_{oi} \in [\tau_b, \tau_e]$  – дата начала выполнения  $i$ -го заказа (включается в себя дату и время запуска заказа на производство),  $k = 1, L, L \in N$  – порядковый номер выполнения  $i$ -го заказа на  $j$ -ой линии в текущем расписании  $Q$ ,  $L$  – количество заказов, выполняемых на  $j$ -ой линии в расписании  $Q$ ,  $\tau_i$  – время выполнения  $i$ -го заказа.

Визуализацией производственного плана является диаграмма Ганта, где выполнению каждого заказа ставится в соответствие отрезок прямой, длина которого пропорциональна его длительности. Эти отрезки (линии Ганта) располагаются напротив номеров (названий) производственного оборудования в последовательности, соответствующей расписанию.

Поскольку количество вариантов производственного плана рассчитывается как факториальная функция, а

задача поиска оптимальной очередности изготовления заказов для составления календарного расписания является комбинаторной NP-трудной задачей большой размерности, требующей учёта множественного ассортимента продукции и множества конфигураций различных производственных линий и рассмотрения огромного количества вариантов плана, то для эффективного решения данной задачи на производстве необходимо внедрение специализированных компьютерных программных комплексов для автоматизации процесса поиска, использующих современные методы оптимизации.

### III. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА И МЕТОДОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПЛАНИРОВАНИЯ

Рассматриваемая задача построения оптимальных производственных расписаний для различных промышленных производств является комбинаторной задачей поиска оптимальной очередности размещения и выполнения разноассортиментных производственных заказов. Инструментом автоматизации решения этой задачи является проблемно-ориентированный программный комплекс, осуществляющий распределение разноассортиментных заказов, каждый из которых имеет заданный срок выполнения, по производственному оборудованию во времени.

Основные этапы процесса производственного календарного планирования представлены на рисунке.



Рис. 1. Основные этапы решения задачи оптимизации производственного планирования

В ходе постановки задачи планирования производственный директор выбирает заказы, участвующие в планировании, производственные линии, задает период планирования и осуществляет выбор целевой функции. Пользовательские интерфейсы позволяют специалисту по планированию загружать в удобном ему формате данные о заказах, производственных линиях, выбирать и использовать различные методы оптимального планирования в зависимости от размерности задачи.

Для формирования производственных планов были разработаны алгоритмы и программные реализации методов оптимизации, способных эффективно и за допустимое машинное время решать задачи календарного производственного планирования разных размерностей. Необходимость решения аналогичных комбинаторных задач дискретной оптимизации большой размерности возникает в различных сферах жизни, науки и промышленности. В настоящее время активно разрабатываются математические модели и методы решения задач распределения работ, составления расписаний, формирования последовательностей поставок и др. [2, 3] Решение таких NP-трудных комбинаторных задач представлено множеством различных методов и алгоритмов, но возможность их практического использования ограничена из-за

трудности нахождения оптимального решения для задач больших размерностей. В настоящее время выделяют три категории методов решения задач дискретной оптимизации календарного планирования: точные методы решения, эвристические алгоритмы и метаэвристические алгоритмы [4]. Точные методы (метод полного перебора, метод ветвей и границ) не эффективны при большом числе исходных данных, поскольку при увеличении размерности задачи длительность компьютерных вычислений на решение задачи растет экспоненциально. Тем не менее, в программном комплексе была разработана программная реализация метода полного перебора, которая используется для решения задач малой размерности (до 9 заказов), поскольку этот метод дает гарантированно оптимальное решение. Основным методом решения задачи планирования в программном комплексе является проблемно-ориентированный генетический алгоритм – метаэвристический метод, позволяющий в значительной мере устранить недостатки точных методов за счет направленного случайно-детерминированного поиска [5]. Эффективность этого метода обусловлена распараллеленной обработкой информации при реализации перебора всего множества альтернатив [6].

Для корректного формирования вида целевых функций и их вычисления используется экспертная информация об объекте планирования, предоставленная специалистами предприятия. Для этого в программном комплексе реализована форма настройки комплекса на конкретное производство, с возможностью учитывать специфику технологических и производственных процессов [7].

Информационное обеспечение программного комплекса включает дополняемую и обновляемую базу данных с информацией об ассортименте продукции, характеристиках производственных линий и заказах с требуемыми сроками их выполнения, а также знания о состоянии и перенастройках оборудования. Результатом работы программного комплекса является удовлетворяющее технологическим требованиям и срокам выполнения производственное расписание, визуализированное в виде диаграммы Ганта. В конце процесса поиска пользователю также предлагается дерево решений задачи оптимизации с возможностью демонстрации хода решения.

Работа программного комплекса была успешно протестирована на реальных промышленных данных современных высокотехнологичных производств многоассортиментных полимерных плёнок в России и

Германии («Klöckner Pentaplast Rus» и «Maria Soell Films») и данных российских металлургических предприятий (Челябинский завод металлоконструкций). В обоих случаях апробация показала эффективность и целесообразность использования программного комплекса для автоматизации процесса решения задачи формирования оптимального производственного плана.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описаны результаты разработки методов и программного комплекса для автоматизации процесса оптимального производственного планирования. Программные реализации различных проблемно-ориентированных методов оптимизации позволяют получить решение задачи планирования, обеспечивающее уменьшение времени, стоимости выполнения заказов и производственных затрат. Разработанный программный комплекс был успешно протестирован на данных различных многоассортиментных промышленных полимерных и металлургических производств. Применение предлагаемого программного комплекса позволяет автоматизировать процесс календарного производственного планирования и значительно повысить его эффективность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Комягина О.Ю., Чистякова Т.Б. Программный комплекс для оптимального планирования производства многоассортиментных полимерных пленок // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. Т. 1. № 2(64). С. 379-384.
- [2] Ерзин И.А., Кочетов Ю.А., Задачи маршрутизации: учеб. пособие Новосибир. гос. ун-т. Новосибирск : РИЦ НГУ, 2014. 95 с.
- [3] Аничкин А.С., Семенов В.А. Современные модели и методы теории расписаний и календарно-сетового планирования // Труды ИСП РАН. 2014. Т. 14, № 3. С. 212–262.
- [4] Могилев А.А. Обзор методов решения задач теории расписаний // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. 2019. № 4(37). С. 19-32.
- [5] Щербина О.А. Метаэвристические алгоритмы для задач комбинаторной оптимизации (обзор) // Таврический вестник информатики и математики. 2014. № 1(24). С. 56-72
- [6] Карпенко А.П. Типовые структуры популяционных алгоритмов глобальной оптимизации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. № 1(25). С. 48-57. DOI 10.38028/ESI.2022.25.1.004.
- [7] Шашихина О.Е., Чистякова Т.Б. Компьютерная система для оптимального планирования полимерных производств // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2021. № 59. С. 94-100.

# Математическое исследование и управление процессом роста злокачественной опухоли

П. Л. Федотов

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

**Аннотация.** Аналитический обзор математической модели роста опухоли. Моделирование процесса роста опухоли. Построение фазового портрета. Введение воздействия, управляющего ростом злокачественной опухоли.

**Ключевые слова:** математическая модель злокачественной опухоли, управление ростом злокачественной опухоли

## I. ВВЕДЕНИЕ

Злокачественные новообразования являются малоизученными заболеваниями всех млекопитающих, в том числе и человека. А так же служат одной из основных причин ранней смертности среди населения. Новообразования появляются вследствие мутации генов. Когда один или несколько генов мутируют и становятся патологическими, то клетка и её потомки размножаются намного быстрее, чем нормальные клетки. Новообразование или опухоль представляет собой увеличение количества патологических клеток. Пока это количество сгруппировано и ограничено полостью, опухоль считается доброкачественной. Опухоль становится злокачественной, если выходит из полости и распространяется на внеклеточном матриксе или строме.

Раковые клетки могут создавать вторичные опухоли при проникновении в кровоток.

На данный момент существует огромное количество экспериментальных данных о процессе роста опухоли, но отсутствует единое объяснение клинических исследований ввиду «неточности» медицины. Математические модели призваны «уточнить» такую науку, как медицина, и создаются для развития единой теоретической модели, способной объяснить все происходящее на практике. В работах [1–4] представлены данные модели.

**В рассматриваемой математической модели** опухоль состоит из трех типов клеток:

- делящиеся;
- нормальные;
- погибшие.

Используемые допущения:

- апоптоз у делящихся клеток отсутствует;
- нормальные клетки в отсутствие делящихся размножаются по логистическому закону;
- погибшие клетки неподвижны;
- ткань образовавшейся структуры считается малосжимаемой;

- точечные размеры опухоли;
- пренебрежение процессом диффузии.

$$\frac{dx_1}{dt} = \mu_1 x_1 (1 - x_3) - \gamma_1 x_1 x_3;$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \mu_2 x_2 (1 - x_2 - x_3) - (\gamma_2 x_1 x_2 + \gamma_3 x_2 x_3);$$

$$\frac{dx_3}{dt} = (\gamma_2 x_1 x_2 + \gamma_1 x_1 x_3 + \gamma_3 x_2 x_3)(1 - x_3),$$

где  $x_1$  – концентрация делящихся клеток;  $x_2$  – концентрация нормальных клеток;  $x_3$  – концентрация погибших клеток.

## II. ПОСТРОЕНИЕ ПРОЦЕССОВ $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$ .

При построении графика требуется ненулевое начальное условие для  $x_1$ .

Принимаемые параметры:

$$\mu_1 = \mu_2 = 1, 7; \quad \gamma_1 = \gamma_3 = 0, 2; \quad \gamma_2 = 0, 1$$

С помощью программного средства Matlab были построены графики  $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$  при начальных условиях (0.001;1;0).

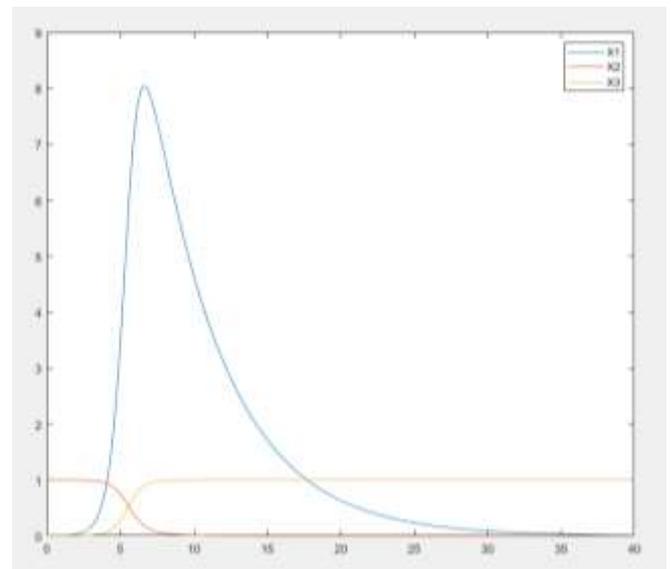


Рис. 1. Графики  $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$

**Исследование стационарных точек:** (0; 0; 1) – устойчивая (узел) и (0; 1; 0) – седло

Составление фазового пространства данной модели.

С помощью программного средства Jupiter Notebook было построено фазовое пространство.

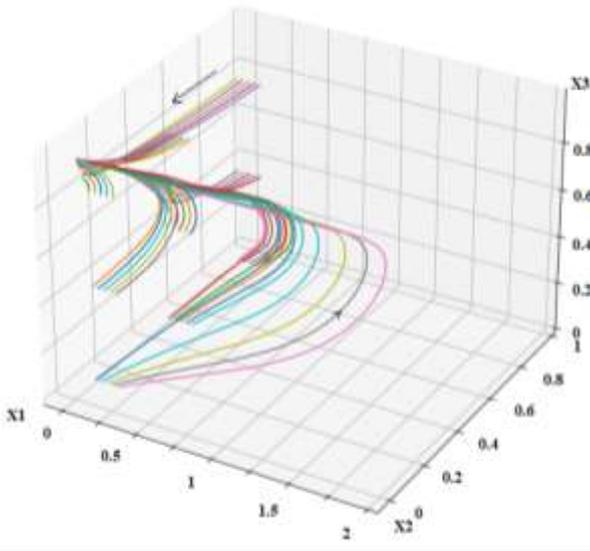


Рис. 2. Фазовое пространство

Фазовые траектории сходятся к стационарной точке  $(0; 0; 1)$ , что подтверждает ее устойчивость. Аналитически выявлено, что точка  $(0; 1; 0)$  является седлом, что также отображено на фазовом пространстве.

### III. ВВЕДЕНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ

Рассматриваемый процесс управления ростом злокачественной опухоли – лучевая терапия, воздействующая на всю целевую область. То есть, вероятность поражения ДНК каких-либо клеток одинакова по всей площади. Вероятность поражения ДНК делящихся и нормальных клеток зависит от их текущей концентрации, и принята как  $kx_1$  и  $kx_2$  соответственно.

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= \mu_1 x_1 (1 - x_3) - \gamma_1 x_1 x_3 - kx_1; \\ \frac{dx_2}{dt} &= \mu_2 x_2 (1 - x_2 - x_3) - (\gamma_2 x_1 x_2 + \gamma_3 x_2 x_3) - kx_2; \\ \frac{dx_3}{dt} &= (\gamma_2 x_1 x_2 + \gamma_1 x_1 x_3 + \gamma_3 x_2 x_3)(1 - x_3) + kx_2 \end{aligned}$$

Поскольку процесс управления начинается не с самого начала развития рака, приняты начальные условия  $(0.5; 0.9; 0.1)$ .

С помощью программного средства Matlab были построены графики  $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$  при начальных условиях  $(0.5; 0.9; 0.1)$  во время управляющего воздействия.

В первоначальной модели при выходе из неустойчивого состояния  $(0; 1; 0)$  в любом случае происходит переход в устойчивое состояние  $(0; 0; 1)$ . То есть, если умерла хоть одна нормальная клетка – умрут все.

В данной модели изменено устойчивое состояние на  $(0; 0; 0.9773)$

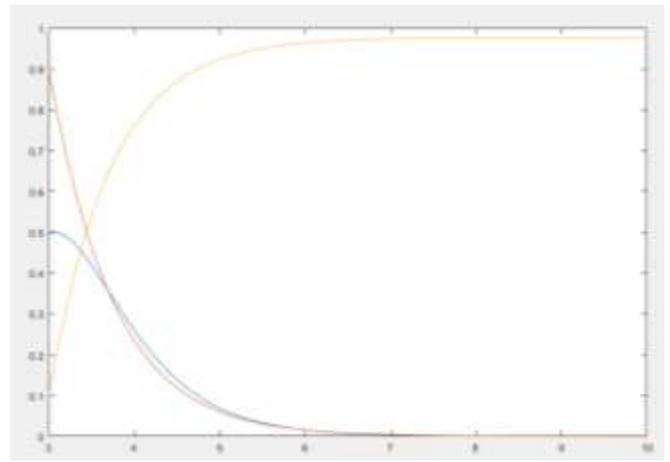


Рис. 3. Графики  $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$  при управляющем воздействии

### IV. ВВЕДЕНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ПРЕКРАЩЕНИЯ РОСТА ЗЛОКАЧЕСТВЕННОЙ ОПУХОЛИ

С помощью программного средства Matlab были построены графики  $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$  при начальных условиях  $(0.5; 0.9; 0.1)$  во время управляющего воздействия, прекращающего рост злокачественной опухоли.

Данная модель демонстрирует периодическое воздействие лучевой терапией на опухоль, не позволяющее превышать концентрацию делящихся клеток выше определенной величины.

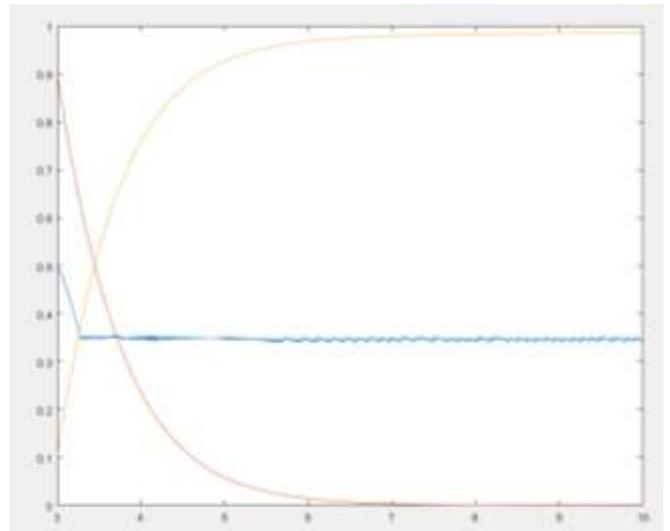


Рис. 4. Графики  $x_1(t), x_2(t), x_3(t)$  при управляющем воздействии, останавливающем рост опухоли

### V. ВЫВОД

В результате работы была рассмотрена математическая модель процесса роста раковых клеток. Аналитически найденные стационарные точки, исследованы на устойчивость. Построен график состояния системы от времени. Построено фазовое пространство. Введено управляющее воздействие. Построен график состояния системы от времени при управлении процессом роста раковых клеток.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Жукова И.В., Колпак Е.П. Математические модели злокачественной опухоли // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 10. Прикл. матем. Информ. Проц. упр., 2014, № 3. С. 5–18.
- [2] Колобов А.В., Анашкина А.А. Математическая модель роста опухоли с учетом дихотомии миграции и пролиферации // Компьютерные исследования и моделирование. 2009. Т. 1, № 4. С. 415–422.
- [3] Астанин С.А., Лобанов А.И. Трёхмерная модель роста неваккуляризированной опухоли в ткани» // Математика. Компьютер. Образование. 2005. Ч. 1. С. 759–769.
- [4] Колобов А.В., Полежаев А.А. Влияние случайной подвижности злокачественных клеток на устойчивость фронта опухоли // Компьютерные исследования и моделирование. 2009. Т. 1, № 2. С. 225–232.

# Аналитическое и имитационное моделирование в системе риск-ориентированного управления проектированием и использованием сложных организационно-технических объектов

Б. В. Соколов

*Санкт-Петербургский Федеральный  
исследовательский центр Российской академии наук  
Sokolov\_boris@inbox.ru*

Е. Е. Щербакова

*Санкт-Петербургский Федеральный  
исследовательский центр Российской академии наук  
Komaro2@mail.ru*

**Аннотация.** В данной статье предлагается методология построения и использования имитационных моделей при разработке системы риск-ориентированного управления (РОУ), позволяющая оценить качество принимаемых при этом решений, исследовать их устойчивость, выявить, при необходимости, причины их неудовлетворительного качества и разработать корректирующие решения, направленные на устранение этих причин. В качестве основного объекта исследования рассматривается создание и использование сложных организационно-технических объектов (СОТО), функционирование и создание которых происходит в условиях неопределенности различного характера. Под СОТО принимается система эксплуатации (СЭ) ракетно-космического комплекса (РКК) на этапе подготовки ракеты к пуску с учетом работы группы операторов, обслуживающих эту систему. Разработаны оригинальные модели и алгоритмы риск-ориентированного управления СЭ РКК. В частности, в статье рассматривается использование имитационной модели группового поведения персонала в СОТО для прогнозирования показателей эффективности работы системы. Предложен оригинальный подход к получению приближенной оценки устойчивости программ управления такими системами, основанный на методологии использования интервальных оценок исходных данных по показателям факторов риска.

**Ключевые слова:** *риск, риск-ориентированное управление, качество решений, имитационное моделирование, сложная техническая система, программное управление, устойчивость, интервальные оценки, агентное моделирование, моделирование социального поведения*

## I. ВВЕДЕНИЕ

В данной статье в качестве основного объекта исследования мы будем рассматривать сложный организационно-технический объект (СОТО). При этом под СОТО понимается объект, элементы и подсистемы которого могут быть представлены как программно-аппаратными и информационными комплексами, так и людьми, а также разнообразными структурами, описывающими связи между элементами.

Процессы создания и использования любого сложного организационно-технического объекта (СОТО) всегда сопровождаются большим количеством неопределенностей различного характера, что, в свою очередь, делает результаты при достижении целей этой

деятельности неопределенными. Это обстоятельство необходимо постоянно учитывать при принятии проектных и оперативных управленческих решений. Свойство качества решения, принимаемого в ситуации с неопределенным исходом, характеризующее возможность и последствия недостижения поставленных целей, будем называть рискованностью [1]. Принятие названных решений должно сопровождаться определением индикаторов этого свойства – риска. Осознание этой необходимости привело в настоящее время к активному использованию риск-ориентированного подхода (РОП) к управлению СОТО, предусматривающего при разработке каждого управленческого решения оценку показателей, характеризующих невозможность достижения его целей и возникающие при этом последствия.

В настоящее время методология риск-ориентированного управления (РОУ) находится в стадии разработки, а в данной работе впервые рассмотрены основные аспекты применения методологии имитационного моделирования при построении системы РОУ создания СОТО.

Наиболее распространенными методами оценки показателей риска являются экспертные методы [7, 8, 9] и вероятностная оценка риска [10, 11]. Помимо этого, для оценки таких показателей предлагается применять имитационное моделирование (ИМ). Возможности ИМ позволяют в качестве исходных данных задать уже известные аналитические модели различных событий, входящих в сценарии недостижения цели, алгоритмически описать взаимосвязи между этими событиями и получить на выходе оценки характеристик риска, а также определить силу влияния нежелательных факторов. Кроме того, использование ИМ позволяет прогнозировать и контролировать процесс функционирования СОТО на длительном временном интервале.

## II. МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ РЕШЕНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ СОТО, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВЕРОЯТНОСТНОГО ХАРАКТЕРА

Качество управляющих решений, принятых в процессе создания СОТО, и ее способность управлять этим качеством должны быть оценены в процессе

моделирования функционирования СОТО. Рассмотрим методологию построения ИМ, позволяющую решить эту задачу, на примере разработки имитационной модели функционирования производственной системы (ПС).

Эта модель должна содержать алгоритмы возможных сценариев недостижения целей управляющих решений; вероятностные модели событий, которые могут произойти при их реализации и повлиять на ход их развития; алгоритмы реализации принятых решений по управлению объективными результатами.

Процесс построения ИМ функционирования ПС включает следующие этапы: построение иерархии целей управляющего решения; выявление нежелательных факторов и разработка сценариев недостижения каждой цели решения; разработка моделей процессов, реализуемых в ПС и их агрегирование. Обучение персонала будет рассматриваться отдельно при построении алгоритма группового поведения и при использовании имитационного (агентного) моделирования. В данном исследовании уровень сложности поведения агентов значительно повышен за счет рассмотрения их групповой работы в СОТО, обслуживания, контроля и использования технического оборудования, а также заданных характеристик, таких как ориентация, квалификация и профессиональные возможности агентов, их психологическая направленность, моральное состояние, сплоченность группы и др. Такие характеристики существенно влияют на выполнение поставленных задач, достижение общих целей.

Процесс построения ИМ начинается с построения иерархии целей управляющего решения.

Предположим, что общими целями управляющих решений, принимаемых в процессе создания ПС, являются обеспечение экономической эффективности и своевременности завершения процесса изготовления продукции (ПП). Для достижения этих целей необходимо выполнить ряд подцелей, к которым относятся обеспечение надежности входящих в ПС видов оборудования, их комплектующих изделий (КИ), технологических элементов замены (ТЭЗ), а также обеспечение запасными частями (ЗЧ) и необходимым уровнем подготовки персонала.

На втором этапе разработки ИМ выявляются нежелательные факторы, влияющие на процесс достижения цели решения. В данном случае такими факторами являются отказ оборудования, отсутствие необходимых ЗЧ для устранения этого отказа, невозможность поставки ЗЧ, недостаточная подготовка персонала для устранения отказов оборудования. На основе этой информации строится дерево событий, отражающее результаты воздействия возможных комбинаций названных нежелательных факторов и характеризующее совокупность сценариев процесса недостижения каждой цели решения, начиная с целей нижнего уровня, и их последствий.

Следующий этап построения имитационной модели связан с разработкой моделей процессов, реализуемых в ПС, в которых могут происходить события. В рассматриваемом примере это будут модели выполнения ПП, обеспечения оборудованием ПС и их доставки, а также готовности персонала.

Указанные модели позволяют путем их агрегирования построить ИМ функционирования ПС для оценки показателей качества управляющего решения, принятого в процессе его создания. Агрегирование моделей основывается на заранее разработанных алгоритмах взаимодействия между ними, которые должны учитывать комплексное влияние всех нежелательных факторов на показатели качества управляющего решения.

При агрегировании моделей необходимо также предусмотреть возможность указания появления того или иного сценария недостижения цели, что позволит определить условные вероятности появления всех нежелательных факторов, а также вероятность появления каждого сценария, что позволит при необходимости сформировать мероприятия по управлению качеством решения в результате моделирования.

Входными данными для имитационной модели функционирования ПС являются момент прихода заявки на проведение ПИП  $t_{\text{тп}}^{\text{нач}}$  и параметры управляющего решения.

$$u = [\lambda_{kmi}, R_i, Y_i, L_{kmi}, c_{kmi}^d, d_{kmi}, z_{kmi}]^t,$$

где  $i$  – вид оборудования, участвующий в ПИП,  $i = \overline{1, I}$ ;  $m_i$  – составная часть (СЧ)  $i$ -го вида оборудования,  $m = \overline{1, M_i}$ ;  $kmi$  – элемент замены (ЭЗ)  $m$ -ой СЧ  $i$ -го вида оборудования,  $k = \overline{1, K_{mi}}$ ;  $\lambda_{kmi}$  – интенсивность отказов ЭЗ  $kmi$ -го типа;  $d_{kmi}$  и  $z_{kmi}$  – начальное количество  $kmi$ -х ЗЧ  $L_{kmi}$  – множество параметров, характеризующих вариант доставки ЗЧ для  $kmi$ -го ЭЗ и  $c_{kmi}^d$  –  $kmi$ -го ЭЗ;  $Y_i$  и  $R_i$  – множества параметров, характеризующих уровень подготовленности персонала к выполнению ПИП и устранению отказов соответственно.

Модель готовности персонала представляет собой зависимость длительности устранения отказа оборудования  $t_i^y$  от уровня подготовленности персонала. Каждому уровню подготовленности соответствуют определенные значения параметров закона распределения времени устранения отказа, заданного множеством

$$R_i = \{t_i^{y\min}, t_i^{y\max}, \alpha_i^y, \beta_i^y\}, i = \overline{1, I},$$

где  $t_i^{y\min}$  и  $t_i^{y\max}$  – минимальная и максимальная продолжительность устранения персоналом отказа оборудования  $i$ -го вида.

Продолжительность устранения отказа оборудования  $t_i^y$  моделируется путем генерации случайного числа, распределенного по закону с параметрами  $R_i$ .

Объем затраченных финансовых ресурсов на процесс устранения отказа зависит от времени устранения и определяется выражением  $C^y = c_i t_i^y$ , где  $c_i$  – стоимость одного часа работы персонала  $i$ -го типа оборудования.

При построении модели готовности персонала учитывалось его групповое поведение, поскольку для СОТО многие выполняемые операции требуют привлечения различных специалистов с разным уровнем квалификации. В этом случае очень важно учитывать как физические, так и психологические факторы, отражающие состояние здоровья тех или иных субъектов, их моральное состояние, а также сплоченность (единство) каждой конкретной группы в целом.

Для конструктивного учета перечисленных факторов группового поведения операторов был разработан соответствующий алгоритм. Основные этапы этого алгоритма, следующие:

Шаг 1. В зависимости от задач, решаемых на том или ином рабочем месте, в ГП РКК формируется возможный (допустимый) вариант группы операторов. После ввода исходных данных формируется группа операторов. В начале моделирования задается верхний предел численности персонала.

Определение характеристик оператора (дополнительные специальности, коэффициенты направленности). Каждому оператору присваивается номер  $j$  для его идентификации. Для каждого оператора рассчитываются имеющиеся к началу работы коэффициенты направленности, характеризующие личность оператора: личностный (для себя), коллективистский (для группы), деловой (для задания). Каждое из полученных значений лежит в диапазоне от 0 до 1. Начальные значения коэффициентов определяются методом Монте-Карло, но в процессе расчета ограничиваются заданными константами  $K_1^2, K_2^2, K_3^2$ .

Шаг 2. Определяются коэффициенты групповой направленности: личностный (для себя), коллективистский (для группы), деловой (для задания), которые вычисляются суммой соответствующих значений для всех операторов в группе. Затем сумма квадратов трех сумм используется для нормализации коэффициентов. В этом случае их соотношения  $s_c + c_c + m_c = 1$  и  $0 \leq s_c, c_c, m_c \leq 1$ .

Шаг 3. Рассчитываются три квалификационных индекса. Сначала определяется индекс  $Q_j^0$  оператора  $j$  по его основной специальности, соответствующий уровню квалификации, полученному в результате оценки. Затем рассчитываются значения  $Q_j^1$  и  $Q_j^2$  для определения начальной квалификации каждого оператора по его первой и второй дополнительным специальностям. Значения, характеризующие квалификацию, нормально распределены с математическим ожиданием  $K_1^1$  и стандартным отклонением  $K_2^1$  для основной специальности и с параметрами  $K_5^1$  и  $K_6^1$  для дополнительных специальностей ( $R_d$  случайное отклонение).

$$Q_j^0 = K_1^1 + R_d K_2^1, \quad K_3^1 \leq Q_j^0 \leq K_4^1,$$

$$Q_j^1 = K_5^1 + R_d K_6^1, \quad K_7^1 \leq Q_j^1 \leq K_8^1,$$

$$Q_j^2 = K_5^1 + R_d K_6^1, \quad K_7^1 \leq Q_j^2 \leq K_8^1.$$

Шаг 4. Оценивается моральное состояние группы. Начальное моральное состояние группы оценивается на основе начальных направленностей. Индекс морального состояния операторов  $M_c$  рассчитывается в начале выполнения задания, а затем еще раз в конце дня.

$$M_c = m_c (1 - \sigma_m), \quad 0 \leq M_c \leq 1;$$

$$\text{где } \sigma_m = \frac{\sqrt{\sum_i (m_i - \bar{m})^2}}{c} \text{ и } \bar{m} = \frac{\sum_i m_i}{c}$$

Индекс морального состояния группы равен коэффициенту деловой ориентации группы, когда отсутствует дисперсия значений  $m_c$ . Когда группа однородна в своей ориентации на задание, моральное состояние является наивысшим. Затем в каждый момент времени рассчитывается текущий коэффициент отклонения показателя морального состояния для последующего определения темпа работы группы.  $0,7 \leq \frac{M}{M_c} \leq 1,3$ .

Шаг 5. Оценка сплоченности группы. Индексы сплоченности  $I_c^1$  и  $I_c^2$  рассчитываются в начале выполнения задания, а затем снова в конце рабочего дня. Оба показателя сплоченности являются функциями рассеивания коэффициентов, характеризующих личностные качества операторов. При вычислении  $I_c^1$  выбор максимума осуществляется по уровню средних коэффициентов, а  $I_c^2$  рассчитывается по уровню рассеивания этих значений.

$$\text{Если } c_c > s_c > m_c, \text{ то } I_c^1 = e^{-10\sigma_c^2},$$

$$\text{где } \sigma_c^2 = \frac{\sum (c_i - c)^2}{c}.$$

$$I_c^2 = e^{-10(\sigma^2)^4}.$$

Шаг 6. Определение времени, необходимого группе для выполнения смоделированной элементарной операции. Если под  $u$  понимается элементарная операция, выполняемая за фиксированный промежуток времени, то фактическое время использования  $h_{ud}$  принимается равным  $\bar{h}_{ud}$ , которое берется из данных задания.

Время работы уменьшается, когда средний уровень квалификации группы превышает средний уровень начальной квалификации  $K_1^1$ , который принимается равным 0,8. Данная функциональная зависимость является линейной при условии, что коэффициент отклонения уровня квалификации находится в пределах от 0,8 до 1,2.

$$0,8 \leq [1 - (E_{pu} - K_1^1)] \leq 1,2.$$

Снижение интенсивности труда во время сверхурочной работы

$$0,8 \leq \left[ 1 - 0,02 \frac{\sum y_i (w_i - W)}{\bar{y}_u} \right] \leq 1,0.$$

Коэффициент отклонения уровня морального состояния  $0,7 \leq \left( \frac{M}{M_c} \right) \leq 1,3$ .

Конечный результат также ограничен в зависимости от среднего времени выполнения.  $0,5\bar{h}_{ud} \leq h_{ud} \leq 3,0\bar{h}_{ud}$ .

Шаг 7. Моделирование ошибок. Определение количества ошибок, идентификация. Необходимо учесть неблагоприятные факторы, такие как ошибка оператора. Задайте влияние ошибок в группе константой  $K_1^4$ . Количество ошибок в данный день является случайной величиной, характеризующей пуассоновским распределением с математическим ожиданием, равным  $K_1^4 \cdot C \cdot M / M_c$ , где  $K_1^4$  – вероятность ошибки оператора,  $C$  – количество ошибок в группе,  $M$  – пороговый индекс морального состояния,  $M_c$  – текущий индекс морального состояния.

Пуассоновское распределение используется для получения псевдослучайного числа, целая часть которого соответствует количеству ошибок оператора. Из формулы видно, что чем выше моральное состояние операторов, тем меньше ошибок персонала.

Шаг 8. Определение общей эффективности группы.

Эффективность групповой работы операторов при выполнении операции оценивается как функция четырех ранее определенных компонентов эффективности, каждый из которых умножается на соответствующую априорную константу, содержащуюся в исходных данных задачи:

$$E_u = K_1^3 (K_2^3 E_{su} + K_3^3 E_{su} + K_4^3 E_{su} + K_5^3 E_{su})$$

Полученное значение показывает эффективность работы операторов при существующей системе связи, при заданном составе группы, при заданной направленности, уровнях квалификации операторов.

Шаг 9. Определение эффективности работы группы. Средняя эффективность  $E_d$  операции в течение рабочего дня определяется как итоговая оценка результатов дня. Для этого используется разностное уравнение второго порядка, результатом является сглаженное значение эффективности  $\bar{E}_d$  в конце рабочего дня  $d$  по формуле  $K_1^5 E_d + K_2^5 \bar{E}_{d-1} + K_3^5 \bar{E}_{d-2}$ . В этом случае значения констант должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить подходящую стабильность.

$$K_1^5 = 1 - K_2^5 - K_3^5, \quad 0 < K_2^5 < \frac{K_1^5}{2}, \quad 0 < K_3^5 < \frac{K_1^5}{4}.$$

Затем процесс возвращается к Шагу 2 алгоритма.

Выходами данной модели являются фактическая продолжительность ПИП –  $t_{\text{тп}}^{\phi}$  и объем затраченных на нее финансовых ресурсов –  $C_{\text{тп}}^{\phi}$ , а также номер сценария недостижения цели  $n$ , если таковой возник в процессе моделирования.

Обработка результатов повторного моделирования процесса функционирования ПС с помощью статистического анализа позволяет получить законы распределения длительности реализации ПИП  $t_{\text{тп}}^{\phi}$  и количества затраченных на нее финансовых ресурсов  $C_{\text{тп}}^{\phi}$ , условные вероятности возникновения всех нежелательных факторов, а также вероятность возникновения каждого сценария недостижения цели. На

основе знания законов распределения  $t_{\text{тп}}^{\phi}$  и  $C_{\text{тп}}^{\phi}$  можно определить такие показатели качества решений по управлению процессом создания ПС, как вероятность несвоевременного завершения ПИП и вероятность превышения объема финансовых ресурсов, затраченных на ее реализацию, которые являются индикаторами качества управленческих решений. Знание этих показателей позволяет принять решение о его приемлемости. Управленческое решение  $u$  может быть принято, если:

$$(P_1(u) \leq P_1^{\text{пр}}) \wedge (P_2(u) \leq P_2^{\text{пр}})$$

где  $P_1^{\text{пр}}, P_2^{\text{пр}}$  – допустимые значения показателей качества решения или подвергается коррекции для выполнения условия.

Представленная методология построения и использования ИМ для оценки показателей качества управленческих решений позволяет не только оценить эти показатели, но и выявить механизм воздействия на них с целью достижения требуемого качества решения.

Такой комплекс, включающий набор универсальных блоков с различным математическим обеспечением, может быть интегрирован в автоматизированную систему риск-ориентированного управления процессом создания СОТО.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Звягин В.И., Птушкин А.И., Трудов А.В. Риск как одно из свойств качества решений, принимаемых в условиях неопределенности // Надежность, том 18, №4, 2018. С. 45-50.
- [2] Чернышкин А.В. Применение риск-ориентированного подхода при построении системы менеджмента качества // Международный научно-исследовательский журнал. № 8 (50). 2016. С. 92-96.
- [3] Теленков Е.Е. Четыре шага к построению риск-ориентированной модели управления компанией // Вопросы управления и инструменты рынка. 2017. С. 139-153.
- [4] Воронов С.П., Матюшин А.В., Шлепнев М.М. Применение риск-ориентированного подхода в деятельности органов государственного пожарного надзора // Вестник Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России. 2016. № 1. С. 130-140.
- [5] Кузьмина Н.М., Ридли А.Н. Решение задачи синтеза рисков в управлении инфраструктурными объектами // Надежность. 2020. №4. С. 42-49.
- [6] Алексенцева О.Н., Бочаров Е.П., Ермошин Д.В. Оценка рисков промышленных предприятий на основе имитационного моделирования // Прикладная информатика. 2008. №1 (13). С. 15-24.
- [7] Васильков Ю.В., Гущина Л.С. Анализ рисков недостижения целей управления организацией // Вестник ВГУ. Экономика и управление. 2017. № 1. С. 5-12.
- [8] Антонов С.Г., Климов С.М. Методика оценки рисков нарушения устойчивости функционирования программно-аппаратных комплексов в условиях информационно-технических воздействий // Надежность. 2017. Т.17, №1. С. 32-39. DOI:10.21683/1729-2646-2017-17-1-32-39.
- [9] ГОСТ Р ИСО-МЭК 31010-2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска, 2012.
- [10] Жуковский В.И., Жуковская Л.В. Риск в многокритериальных и конфликтных системах при неопределенности / Под ред. В.С. Молостова. М.: Едиториал УРСС, 2004.
- [11] Sokolov V.V. Optimal Structure Reconfiguration in a Complex Technical Systems (CTS): principles, models, methods and algorithms for the CTS Structure Dynamics Control // VI ISTC Scientific Advisory Committee Seminar "Science and Computing", Moscow, Russia, September 15-17 2003, Abstracts. / ISTC. Moscow, 2003. P. 30-31.

# Исследование динамических характеристик для робототехнической системы

Л. А. Зиганшина

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
flaska-01-99@inbox.ru

К. А. Порохненко

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
ksenyawww@mail.ru

**Аннотация.** Проведены исследования влияния упругих элементов на изменения параметров исполнительных механизмов. Используя среду пакета прикладных программ MATLAB, была составлена имитационная модель. Сделаны выводы о влиянии возмущающих воздействиях на чувствительность системы.

**Ключевые слова:** оптимальный регулятор, упруго-инерционные связи, возмущающие воздействия, робототехническая система

## I. ВВЕДЕНИЕ

Робототехнические системы представляют собой комплекс с возможностью двигательных, исполнительных и передаточных функций и элементов. Система работает с учетом многих факторов: разгона, торможения и других переходных процессов. Это приводит к возникновению дополнительных динамических нагрузок и колебательным нестабильным состояниям, что нарушает точность позиционирования и выполнения предъявляемых требований к системе.

Дифференциальные уравнения движения сложного механического объекта, например робота-манипулятора (наравне с уравнениями, определяющими его систему управления), как правило, по существу – нелинейные и обычно имеют разрывные правые части.

При постановке задачи в получении необходимых результатов, надо учитывать большинство нелинейностей, присутствующих в математических моделях системы управления. Это характерно при определении динамики многих механических систем.

При моделировании систем управления сложными механическими объектами, математические модели которых включают модели электромеханических приводов, в таких случаях могут возникнуть трудности, связанные с особенностями таких систем, как например, упругая связь. В таких случаях, математической задачей является определение параметров оптимальной настройки системы, для поддержания требуемого процесса управления.

В системах слеящего электропривода с высокими требованиями к статическим и динамическим характеристикам широко применяется электропривод постоянного тока.

На рис. 1 показана функциональная схема слеящего электропривода.

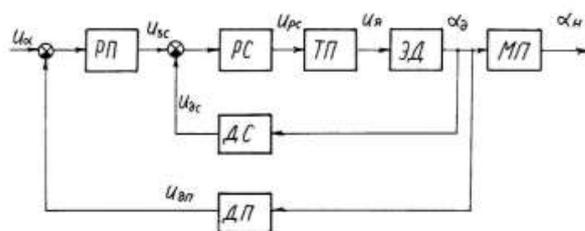


Рис. 1. Функциональная схема слеящего привода

в которой РП – контур положения; ДП – датчик положения; РС – контур регулирования скорости с регулятором скорости; ДС – датчик скорости; ДТ – датчик тока; ТП – тиристорный преобразователь; ЭД – электродвигатель.

В качестве регуляторов тока и скорости может быть любой из П, ПИ, ПИД или иных регуляторов, в зависимости от требуемого качества регулирования.

Принцип работы этих схем заключается в подчинении работы каждого внутреннего контура многоконтурной системы внешнему контуру. Очевидно, что качество работы всей системы во многом определяется качеством внутренних контуров. Традиционные системы управления электродвигателями постоянного тока состоят из контуров регулирования положения, скорости и тока.

Рассмотрим методику построение оптимального регулятора.

## II. ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Для описания возмущенного движения динамической системы воспользуемся дифференциальным уравнением (1) в первом приближении:

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \quad (1)$$

где  $A$  и  $B$  – матрицы чисел размером  $n \times n$  и  $n \times m$  соответственно;  $x$  – вектор переменных состояния;  $u$  – вектор управляющего воздействия.

Начальный момент времени принимается равным нулю:  $t_0 = 0$ .

Для определения состояния объекта управления необходимо спроектировать оптимальный регулятор.

Для правильного построения регулятора необходимо найти матрицы чисел  $K$  (2):

$$u = K \cdot x \quad (2)$$

Условие нахождения такое: матрица  $K$  должна быть такого вида, чтобы при асимптотически устойчивых движениях системы, которые происходят при произвольных отклонениях  $x^{(0)}$ , минимизировался функционал (3):

$$J = \int_0^{\infty} (x' Q x + u' u) dt \quad (3)$$

где  $Q$  – произвольно заданная положительно-определённая матрица размером  $n \times n$ .

Проанализировав влияние каждого элемента матрицы  $Q$ , можно сделать вывод, что для обеспечения минимального времени регулирования переходного процесса целесообразно принять следующие значения:

$Q_{11}$  – следует принять достаточно большим, для обеспечения скорости переходного процесса и минимизации колебаний,

$Q_{22}$  – следует минимальным, для обеспечения быстродействия и минимизации колебаний,

$Q_{33}$  – следует принять достаточно большим для обеспечения отсутствия колебаний,

$Q_{44}$  – данный элемент необходимо выбрать большим, для обеспечения быстродействия и минимизации колебаний.

Матрица  $K$  характеризуется как совокупность коэффициентов усиления регуляторов.

Тогда, управление построения регуляторов будет (4):

$$P \cdot A + A' \cdot P - P \cdot B \cdot R^{-1} \cdot B' \cdot P + Q = 0 \quad (4)$$

Уравнение (4) представляет собой матричное уравнение и называется алгебраическим уравнением Риккати или уравнением Лурье.

На основании приведенных матричных уравнений, выделяется несколько этапов в процедуре конструирования регуляторов:

1. решение матричного уравнения Лурье (алгебраического уравнения Риккати);
2. выражение из решений только положительно-определённой матрицы  $P^0$ ;
3. расчет матрицы усиления (регулятора).

Выполнение этапа 2 и 3 может быть при условии, что объект управления полностью управляем. Тогда и только тогда находится единственное решение с положительно-определённой матрицей  $P^0$ .

Полное управление объектом записывается в виде условия:

$$\text{rank}[B, A \cdot B, A^2 \cdot B, \dots, A^{(n-1)} \cdot B] = n \quad (5)$$

### III. СИНТЕЗ НАБЛЮДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Уравнение (4), которое характеризует управление объектом, называется условием управляемости для  $A$  и  $B$ .

Переменные состояния обычно вычисляются, однако это происходит не всегда. Одними из веских причин невозможности определения переменных являются:

1. датчиков, измеряющих соответствующих величин;

2. большая погрешность измерительных средств;
3. трудная реализация датчиков в проектируемой системе.

В последнее время, самым распространённым аналогом измерительных приборов является использование наблюдателей состояния систем.

Наблюдатель осуществляет оценку системы в начальный момент времени по значениям векторов выхода  $y(t)$ . При этом необходимо соблюдение условия, что  $t > t_0$ .

Одним из показателей работы наблюдателя является восстанавливаемость системы. Это возможность анализа системы по оценке  $x(t_0)$  по значениям  $y(t)$  при  $t > t_0$ .

Критерий наблюдаемости выполняется для системы (6) согласно своему определению.

$$\dot{x} = A \cdot x, \quad y = C \cdot x \quad (6)$$

Критерий наблюдаемости определяется из условия, что ранг матрицы наблюдаемости (7) равен порядку системы:

$$Q = (C^T | A^T \cdot C^T | (A^T)^2 \cdot C^T | \dots | (A^T)^{n-1} \cdot C^T) \quad (7)$$

Наблюдаемость зависит только от матриц  $A$  и  $C$ .

В системе устройство восстановления будет формироваться уравнениями (8):

$$\dot{\hat{x}} = A \cdot \hat{x} + B \cdot u; \quad \hat{x}(t_0) = \hat{x}^0 \quad (8)$$

Если  $\hat{x}(t_0) = x(t_0)$ , то решение уравнения (6) точно совпадает с решением системы. Если показатели не равны друг другу ( $\hat{x}(t_0) \neq x(t_0)$ ), то возникает ошибка восстановления (9):

$$e = x - \hat{x} \quad (9)$$

Асимптотически устойчивому проектируемому объекту возможно уменьшить (9) в течении определенного количества времени.

Наблюдатель описывается уравнением (10), где используется восстановленное значение  $C \cdot \hat{x}$ .

$$\dot{x} = A \cdot \hat{x} + H \cdot (y - C \cdot \hat{x}) + B \cdot u \quad (10)$$

где  $H$  – матрица коэффициентов усиления наблюдателя.

Тогда ошибка восстановления будет иметь вид (11):

$$\dot{e} = [A - H \cdot C] \cdot e \quad (11)$$

Если матрицы уравнения постоянны, то значения матрицы  $H$  необходимо подобрать так, что полюса наблюдателя располагались левее полюсов оптимального регулятора.

Такое условие необходимо для окончания переходных процессов сначала в наблюдателе, а затем в самой исследуемой системе.

Также следует не делать сильное смещение, чтобы не усилить чувствительность наблюдателя и не нарушить исследование.

#### IV. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Результирующая структурная схема в пакете прикладных программ представлена на рис. 4.

Переходный процесс в системе не имеет перерегулирования, время регулирования составляет 0.18 с.

Попытки увеличить быстродействие системы приводят к тому, что при дальнейшем незначительном снижении значения времени регулирования имеет место значительное увеличение всех коэффициентов оптимального регулятора.

Процессы, происходящие в системе и в наблюдающем устройстве схожи. Незначительные расхождения имеются только по первой скорости.

Перерегулирование возникает при уменьшении  $J_2$  (момента инерции второй массы), что приводит к увеличению быстродействия системы в целом.

Если происходит увеличение параметра  $J_2$ , то быстродействие снижается, однако система также остается работоспособной (вид переходного процесса не меняется значительно).

При уменьшении параметра  $K_c$  в системе возникают колебания.

При увеличении коэффициента внутреннего трения происходит незначительное увеличение времени регулирования.

Коэффициент упругости обратно пропорционален постоянной времени  $T_c$ , поэтому увеличение значения  $T_c$  соответствует уменьшению значения коэффициента упругости.

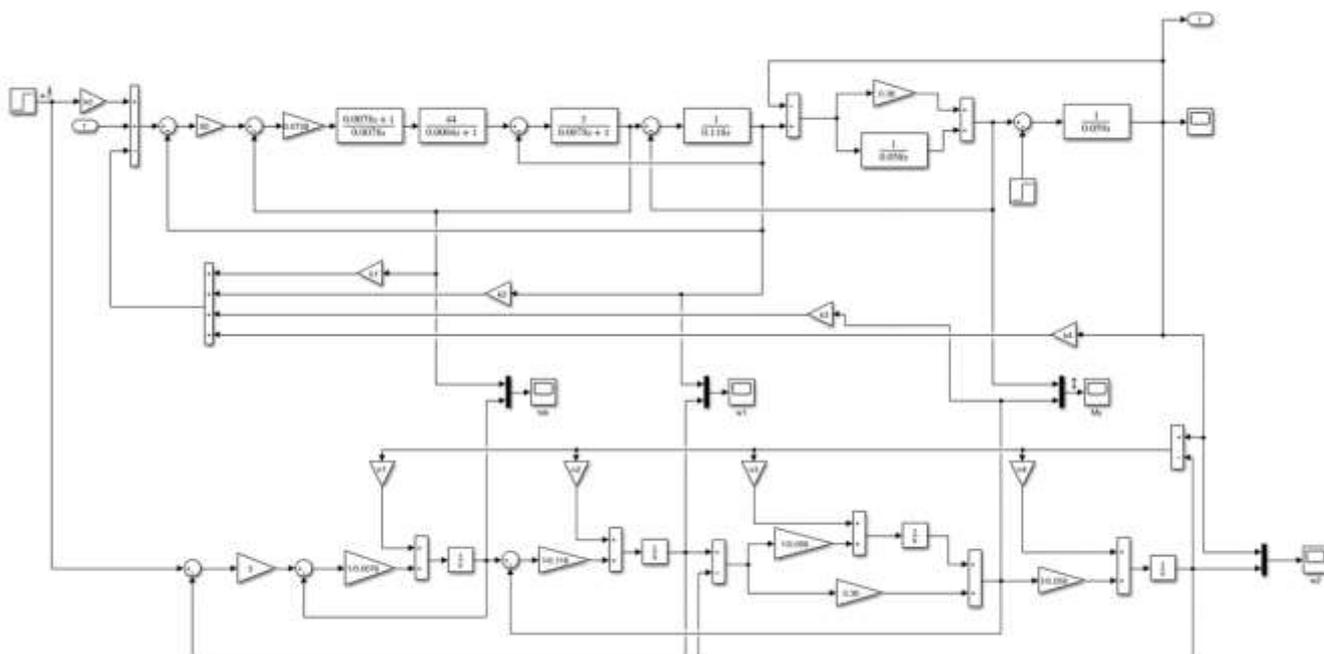


Рис. 2. Результирующая структурная схема в пакете MATLAB

По итогам исследования можно заключить, что тип переходного процесса не изменяется в диапазоне значений  $T_c$  [0.02;0.06] с.

При дальнейшем увеличении значения  $T_c$  появляется перерегулирование, а затем и колебания.

По итогам исследования можно сделать вывод, что система с оптимальным регулятором является достаточно грубой, т. е. является нечувствительной в некотором смысле к изменениям параметров исполнительного органа, упругой передачи и нагрузки.

#### V. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

К работе любой электромеханической системе предъявляют требования. Для проверки корректной работы используется метод отработки возмущающего воздействия.

Исследование показало, что для устранения неточностей системы необходимо добавить в систему звено (разделительное).

Корректировка позволила установить статическую ошибку на уровне  $\approx 3\%$ , а компенсация возмущающего воздействия происходит приблизительно за 1 секунду.

#### VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной задачей в данной работе является моделирование и синтез упругой электромеханической системы.

В результате работы был определен оптимальный регулятор четвертого порядка с обратными связями по вектору переменных состояния.

Для восстановления недоступного измерению упругого момента разработан наблюдатель полного порядка.

Была достигнута достаточно низкая чувствительность к изменениям параметров исполнительного органа, упругой передачи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Путов В.В., Шелудько В.Н. Адаптивные и модальные системы управления многомассовыми нелинейными упругими механическими объектами. СПб.: ООО «Техномедиа», Элмор, 2007. 244 с.
- [2] Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы. М.: Высш.шк., 1989. 263 с.
- [3] Борцов Ю.А., Второв В.Б. Математические модели и алгебраические методы расчёта автоматических систем. СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 1992. 79 с.
- [4] Ескенин Р.Н. Геометрическое моделирование и оптимизация процессов управления адаптивным промышленным роботом: автореф. дисс.... канд. техн. наук: 05.01.01. / Омск, 2010. 20 с.
- [5] Ганнелъ Л.В. «Современные средства исследований частотных характеристик электропривода с упругими связями». Промышленные АСУ и контроллеры, издательство «Научтехлитиздат», 2008.
- [6] Гриценко П.А., Арановский С.В. Нахождение оптимальной траектории движения по заданному пути для кинематически избыточного манипулятора // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 1. с. 40–44.
- [7] Красильникьянц Е.В., Варков А.А., Тютиков В.В. Система управления манипуляционным роботом // Автоматизация в промышленности. №5. 2011. С. 38-44.

# Система векторного управления активным выпрямителем напряжения

М. А. Колмагоров

кафедра САУ

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

Н. А. Доброскок

кафедра САУ

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

**Аннотация.** Целью данной работы является моделирование трехфазного повышающего выпрямителя источника напряжения на основе метода векторного управления. Система управления на базе векторного ШИМ включает в себя три ПИ-регулятора, которые используются для регулирования переменного тока и напряжения линии постоянного тока. Активный ток для этой системы можно регулировать независимо. В статье представлены модель MATLAB/SIMULINK, графики, указывающие на достоверность результатов модели и метода ее контроля.

**Ключевые слова:** трехфазный активный выпрямитель, векторное управление, алгоритм управления ШИМ, ПИ-регулятор, стабилизация напряжения, источник напряжения, управление двойным замкнутым контуром напряжения и тока

## I. ВВЕДЕНИЕ

Трехфазные активные выпрямители напряжения представляют собой обратимый преобразователь энергии, основным назначением которого является стабилизация выпрямленного напряжения на уровне, большем амплитудного значения линейного напряжения с минимальным уровнем пульсаций, возможностью потребления тока от трехфазного источника, приближающегося по спектральному составу к гармоническому, и обеспечения коэффициента мощности близкого к единичному. Благодаря своим функциональным возможностям данный тип выпрямителей находит применение в развивающихся системах дизельной генерации с переменной частотой вращения, а также в альтернативную энергетику, например, в системах ветрогенерации на основе синхронного генератора с постоянными магнитами.

Для достижения максимальной эффективности данного типа преобразователя для его управления используют векторную систему управления, позволяющую при определенных условиях осуществлять управление величиной активной и реактивной составляющих потребляемой мощности.

## II. МЕХАНИЗМ РЕАЛИЗАЦИИ ВЕКТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Принцип векторного управления основан на преобразовании трехфазных измеряемых переменных (напряжений и токов) в двухфазную ортогональную систему координат с последующим разделением контуров управления активной и реактивной составляющих, последнюю из которых приравнивают к

нолю, чтобы добиться наиболее эффективного использования источником энергии [2]. На рис. 1 представлена схема активного выпрямителя напряжения, с наличием схемы управления.

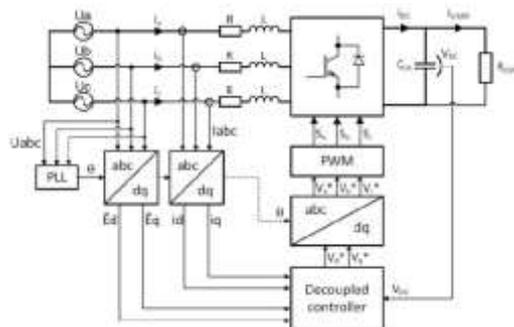


Рис. 1. Трехфазная схема АВН

Система управления АВН, для более эффективного управления, строится во вращающейся системе координат d-q. На базе преобразований Планка напряжения и тока АВН [3], записанные в системе координат d-q, описываются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = R_{др} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L_{др} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega L_{др} \begin{bmatrix} -i_q \\ i_d \end{bmatrix} + U_d \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix}$$

Угловая скорость вращения подвижной системы координат dq относительно неподвижной классической системы координат abc зависит от частоты напряжения на входе АВН. На рис. 2 показана эквивалентная схема АВН.

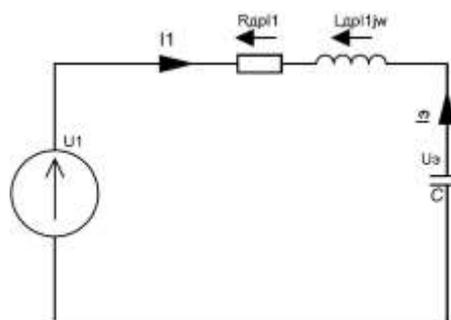


Рис. 2. Эквивалентная схема АВН

## III. СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Наиболее успешное управление активным выпрямителем напряжения выполняется на базе подчиненного регулирования по структуре внутреннего

контура тока и внешнего контура напряжения [4], следует учесть подчиненное регулирование возможно при условии обеспечения компенсации перекрестных связей рис 3.

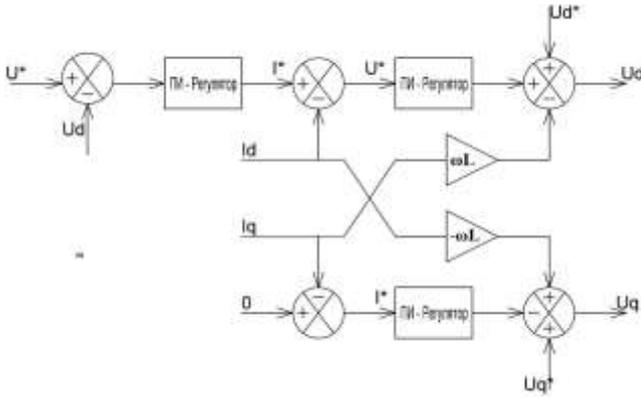


Рис. 3. Структурная схема системы регулирования АИН

Данная система автоматического управления построена на принципе понятия составляющей активных и реактивных мощностей с условием приравнивания реактивной части к нулю, это становится возможным за счет автоматической подстройки фазы и частоты, которая подстраивает ток и напряжение в унисон друг другу. [2]

$$\begin{cases} p = u_d i_d + u_q i_q \\ 0 = u_d i_q + u_q i_d \end{cases} \quad (2)$$

С учетом уравнений (1)(2) возможно создать систему зависимости напряжения от прочих составляющих системы, наличие принципа действия АВН, завязанный на принципе отношения активной и реактивной мощности, описанного в уравнениях (1), а также с учетом того, что рассматриваемый АВН рассматриваться как идеальный, получим итоговое значение уравнений по поиску выпрямленного напряжения. [5]

$$\begin{cases} U_d = -i_q + \omega L_{др}(i_q) + i_d \\ 0 = i_q + \omega L_{др}(i_d) + u_q \end{cases} \quad (3)$$

Для реализации уравнений (3) необходимо создать двухконтурную систему, так как в уравнении присутствуют части тока и напряжения, благодаря чему воспользуемся системой замещения на рис. 2. Как видно из рис. 2, имея желательный показатель напряжения, он преобразуется в показатель тока ПИ-регулятора, где происходит вычитание составляющей тока, которая является еще и обратной связью внутреннего контура управления системы, после чего преобразуется обратно для конечных преобразований с положением напряжения.

Для расчета коэффициентов ПИ-регулятора внутреннего контура опираясь на схему замещения рис. 2 можно сделать вывод. Если учесть, что система имеет обратную связь

$$W = \frac{\frac{K_p s + K_i}{L} s + \frac{K_i}{L}}{s^2 + \frac{(R + K_p)}{L} s + \frac{K_i}{L}} \quad (4)$$

Суть метода состоит в том, чтобы приравнять полученную в процессе расчета передаточную функцию замкнутой системы с желаемой передаточной функцией,

построенной на базе принципов модального проявления, где мы имеем передаточную функцию с единичным коэффициентом передачи, в знаменателе которого используют полином. [6] Передаточная функция с характеристическим полином определяет реакцию системы на него, для расчета ПИ-регулятора внутреннего контура используют характеристический полином Ньютона второй степени с единичным коэффициентом усиления.

$$W = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \omega_0 s + \omega_0^2}; \omega_0 = \frac{\tau_p}{t_p} \quad (5)$$

следует учесть, что  $\omega_0$  – среднегеометрический корень полинома,  $\tau_p$  – нормированное время регулирования, определяемое типом полинома,  $t_p$  – время регулирования по току, задается в желаемом виде с учетом быстродействия системы. С учетом уравнений (4) и (5) получим

$$\begin{cases} \frac{R + K_p}{L} = 2\omega_0 \\ \frac{K_i}{L} = \omega_0^2 \end{cases} = \begin{cases} K_p = 2\omega_0 L - R \\ K_i = \omega_0^2 L \end{cases} \quad (6)$$

Для расчета коэффициентов ПИ регулятора внешнего контура, опираясь на схему замещения 2, можно сделать вывод, что сигнал будет проходить через следующую передаточную функцию

$$W = \frac{\frac{K_p s + K_i}{C} s + \frac{K_i}{C}}{s^2 + \frac{(K_p)}{C} s + \frac{K_i}{C}} \quad (7)$$

Поскольку передаточная функция внутреннего контура подобрана с условием единичного коэффициента передачи, то при расчете итоговой передаточной функции внешнего контура она не учитывается. Следственно механика расчета данного контура такая же как и у предыдущего, опираясь на формулы (5) (7) получаем следующие значения:

$$\begin{cases} \frac{K_p}{C} = 2\omega_0 \\ \frac{K_i}{C} = \omega_0^2 \end{cases} = \begin{cases} K_p = 2\omega_0 C \\ K_i = \omega_0^2 C \end{cases} \quad (8)$$

#### IV. РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Платформа MATLAB/ SIMULINK используется для проектирования и моделирования предлагаемой модели АВН. Поведение системы аппроксимируется как дискретная система управления. Полная математическая модель показана на рис. 4.

Выпрямитель показан в верхней части рис. 4. Используемый источник переменного тока представляет собой сбалансированный трехфазный источник напряжения с частотой 50 Гц и напряжением 180.4 вольт на фазу. Значение сопротивления линии и индуктивности линии равно 0,0001 Ом и 0,002 мГн соответственно. Для постоянного напряжения в установленном режиме предполагается значение 300 В. Переключение используется частота 10 кГц.

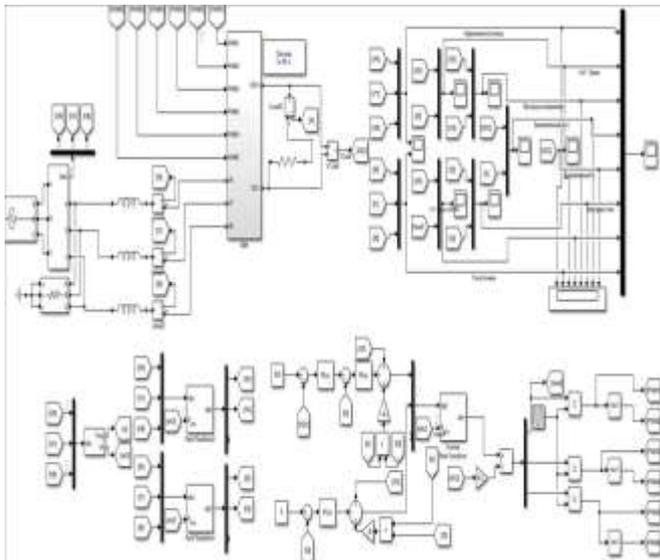


Рис. 4. АВН в MATLAB/ SIMULINK

Моделирование было проведено для демонстрации эффективности предложенной стратегии управления. На рис. 5–7 указаны основные параметры АВН и их качественные показатели.

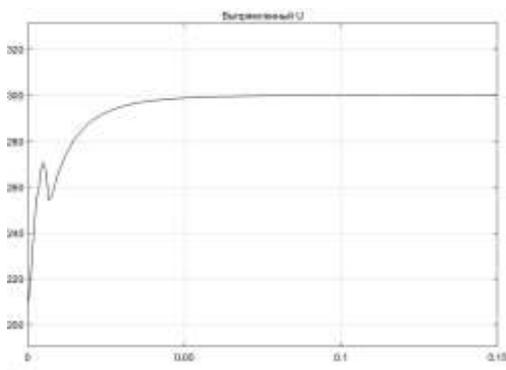


Рис. 5. Выпрямленное напряжение АВН

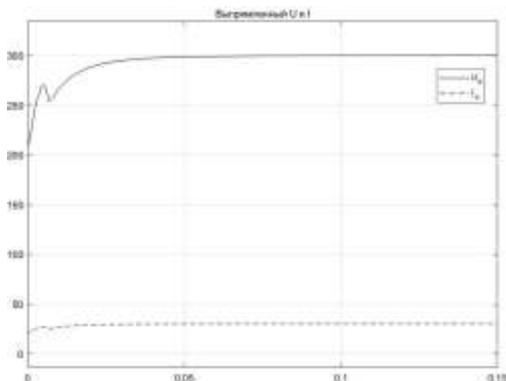


Рис. 6. Выпрямленное напряжение и ток АВН

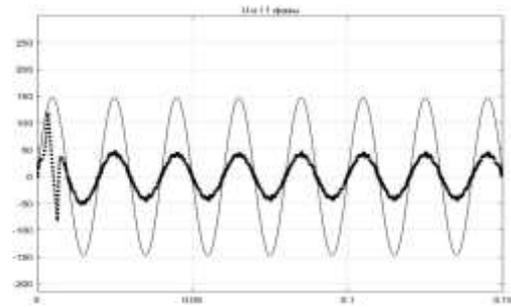


Рис. 7. Фазы тока и напряжений АВН

## V. ВЫВОД

В данной работе анализируется математическая модель трехфазного ШИМ-выпрямителя с источником напряжения. Основываясь на идее управления развязкой с прямой связью, адаптируется метод управления двойным замкнутым контуром напряжения и тока. Предложена методика расчета коэффициентов ПИ-регуляторов, обеспечивающая заданный стандартный характеристический полином замкнутого контура. Система с ШИМ управлением моделируется в среде MATLAB /SIMULINK. Результаты моделирования показали, что система обладает высокими динамическими и стационарными характеристиками. Предлагаемый метод обладает преимуществами меньшего количества вычислений и простотой настройки параметров. Кроме того, он может быть эффективно применен к выпрямительным системам для достижения высокого качества питания, что имеет большое значение для практических инженерных применений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
- [2] H. Nantao "Simulation of Power Control of a Wind Turbine Permanent Magnet Synchronous Generator System" (2013). Master's Theses (2009). P. 215.
- [3] S. Nagendrapasad Vector Controlled Voltage Source PWM Rectifier. International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181
- [4] Sylvain Lechat Sanjuan. Supervisor Saeid Haghbin, PhD. Student. Examiner Ola Carlson, Associate Professor. DVOLTAGE ORIENTED CONTROL OF THREE-PHASE BOOST PWM CONVERTERS DESIGN, SIMULATION AND IMPLEMENTATION OF A 3-PHASE BOOST BATTERY CHARGER SYLVAIN LECHAT SANJUAN. Department of Energy and Environment Division of Electric Power Engineering CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY SE-412 96 Göteborg
- [5] H. Wang Study of Control Strategies for Voltage-Source PWM Rectifier. Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering ICCSEE 2013
- [6] Fangping Zhan, Hejin Xiong and Rui Zhang, Zhenan Jiang, N J Long, R A Badcock et al. J Herman and J Bojkovski. Simulation Study of Three - phase PWM Rectifier with Square of the Voltage Double Closed Loop Control To cite this article: Wen Qiang et al 2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 199 012148

# Программный комплекс для управления процессом плавки стали в кислородном конвертере с учетом экологических характеристик

И. В. Левинский<sup>1</sup>, И. В. Новожилова<sup>2</sup>, Т. Б. Чистякова<sup>3</sup>  
Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)

<sup>1</sup>ilyalevinskii@gmail.com, <sup>2</sup>novozhilova@technolog.edu.ru, <sup>3</sup>nov@technolog.edu.ru

**Аннотация.** В статье представлена структура программно-алгоритмического комплекса для решения задачи управления процессом плавки стали в кислородном конвертере с учетом определения выбросов углекислого газа и количества образующегося шлака. Основу программного комплекса составляет математическая модель, включающая системы уравнений материального и теплового балансов конвертерного процесса для вычисления массы, состава, температуры стали, массы выделяемого углекислого газа, массы и состава образующегося шлака. Программный комплекс позволяет в режиме советчика оператора-дистрибутора кислородного конвертера осуществлять поиск допустимых значений управляемых переменных процесса (времени, объема дутья, массы флюсов) для обеспечения заданной производительности конвертера и состава стали с учетом ограничений по выбросам углекислого газа и массе образующегося шлака. Проведенное функциональное тестирование программного комплекса по данным ЧерМК (ПАО «Северсталь») подтвердило его работоспособность и возможность использования на предприятиях металлургической промышленности.

**Ключевые слова:** программный комплекс, кислородный конвертер, математическая модель, управление конвертерным процессом, экологические характеристики

## I. ВВЕДЕНИЕ

Кислородно-конвертерный процесс является одним из наиболее эффективных и распространенных способов производства стали высокого качества и широкого сортамента. Это связано с высокой производительностью кислородных конвертеров, относительной простотой их конструкции, высоким уровнем автоматизации процессов и гибкостью технологии плавки [1–3]. Трудности управления конвертерным процессом заключаются в недостаточной текущей информации о параметрах процесса (наличии нечеткой информации о химическом составе лома), действием случайных возмущений (загрязнение лома ржавчиной и посторонними материалами) и строгими требованиями по выбросам углекислого газа и отходоёмкости производства (количеству образующегося шлака). Поэтому производителям важно следить за качеством

выпускаемой стали и состоянием конвертера путем контроля вносимых в конвертер возмущений в виде лома, подаваемого на плавку, при помощи регулирования подачи дутья и массы используемых флюсов для получения стали заданного качества, а также контроля за выбросами углекислого газа в атмосферу [4]. Поток отходящих газов из конвертера изменяется при продувке в зависимости от объема кислородного дутья, состава чугуна и лома, состава и расхода неметаллической шихты, высоты фурмы над уровнем ванны. Температура газов на выходе из горловины конвертера в течение плавки повышается от 1250–1300 °С в начале продувки, до 1600–1700 °С в середине и конце продувки. Основными компонентами конвертерных газов являются CO и CO<sub>2</sub>, объемное содержание которых составляет соответственно 60–85 % и 10–20 %. В отходящих газах в незначительном количестве могут присутствовать O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar. Монооксид углерода CO в конвертерном газе в смеси с кислородом может образовывать взрывоопасную смесь. В случае выхода конвертера из строя или его простоя предприятие несет большие финансовые потери. Таким образом, актуальной задачей является разработка программного комплекса, позволяющего на базе математической модели вычислить массы и составы стали и шлака, получаемых при конвертерной плавке, массу выделяемого углекислого газа в атмосферу в зависимости от массы флюсов и параметров дутья для различных составов металлической и неметаллической шихты.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ СТАЛИ С УЧЕТОМ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Конвертерный способ производства стали представляет собой процесс переработки жидкого чугуна в сталь, при помощи удаления примесей (углерода, кремния, марганца, фосфора, серы) за счёт продувки жидкого чугуна кислородом и перевода этих примесей в шлак или газообразную фазу. После окисления примесей, из металлического сплава удаляют растворенный в нем кислород, вводят легирующие элементы и получают сталь заданного химического состава.

В процессе производства стали в качестве исходных материалов выступают: жидкий чугун, твёрдая

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-79-30029 «Разработка комплекса технологий переработки отходов 3-5 классов опасности с получением полезных продуктов»).

металлическая шихта, состоящая из переработанного металлического лома и отходов, металлизированных окатышей или брикетов, чугуна. Кроме того, в процессе плавки используются шлакообразующие материалы, а также раскислители непосредственно перед выпуском жидкой стали. Качество выпускаемой стали зависит от содержания в ней углерода и различных примесей и регламентируется по ГОСТам, согласно которым, сталь может быть обыкновенного качества по ГОСТ 380-2005 [5] согласно которому массовая доля углерода в стали не может превышать 0,49, марганца 0,8, кремния 0,3 и качественной по ГОСТ 1050-2013 [6]. Данные стандарты определяют марки стали, а также подробно описывают допустимые диапазоны для каждого из элементов, содержащихся в стали.

Процесс конвертерной плавки стали как объект управления [7–9] с учетом характеризуется совокупностью переменных  $Y=f(X, U, F)$ , где  $Y=\{Y_M, Y_T, Y_{Ш}, Y_{CO_2}\}$  – вектор выходных переменных,  $Y_M=\{M_M, T_M, X_{Mi}\}$  – переменные, характеризующие данные о металле:  $M_M$  – выход жидкого металла (стали), кг;  $T_M$  – температура полученного металла, °С;  $X_{Mi}$  – химический состав металла,  $i=\{C, Si, Mn, Cr, S, P, Cu, Ni\}$ , % масс.;  $Y_T=\{Q, T_{ПЕР}\}$  – переменные, характеризующие данные о расходах тепла во время плавки:  $Q$  – общий расход тепла, кДж;  $T_{ПЕР}$  – температура перегрева металла над температурой начала затвердевания, °С;  $Y_{Ш}=\{M_{Ш}, X_{Шj}\}$  – переменные, характеризующие данные о конечном шлаке:  $M_{Ш}$  – масса конечного шлака, кг;  $X_{Шj}$  – химический состав конечного шлака,  $j=\{CaO, SiO_2, MgO, FeO, Al_2O_3, MnO, P_2O_5, S\}$ , % масс.;  $Y_{CO_2}=\{M_{CO_2}\}$  – переменные, характеризующие выбросы углекислого газа:  $M_{CO_2}$  – масса выделяемого углекислого газа, кг;

$X=\{X_{MШ}, X_{НШ}, X_M\}$  – вектор входных переменных:  $X_{MШ}=\{M_ч, T_ч, X_{чk}, M_{Л}, X_{Лl}\}$  – переменные, характеризующие данные металлошихты:  $M_ч$  – масса чугуна, кг;  $T_ч$  – температура чугуна, °С;  $X_{чk}$  – химический состав чугуна,  $k=\{Si, Mn, C, P, S\}$ , % масс.;  $M_{Л}$  – масса лома, кг;  $X_{Лl}$  – химический состав лома,  $l=\{Si, Mn, C, P, S\}$ , % масс.;  $X_{НШ}=\{X_{Флmn}\}$  – переменные, характеризующие данные неметаллической шихты:  $X_{Флmn}$  – химический состав шлакообразующих материалов (флюсов),  $n=\{известь, доломит, магнезиальные флюсы\}$ ,  $m=\{CaO, SiO_2, MgO, Fe_2O_3, FeO, MnO, Al_2O_3, CaCO_3, MgCO_3\}$ , % масс.;  $X_M=\{X_{Mi РЕГ}\}$  – переменные, характеризующие марку металла (стали):  $X_{Mi РЕГ}$  – химический состав металла, ожидаемого в результате плавки;

$U=\{M_{Флm}, V_д, t_д\}$  – вектор управляющих воздействий,  $M_{Флm}$  – масса флюсов, кг;  $V_д$  – объем дутья, м<sup>3</sup>;  $t_д$  – время дутья, с;

$F=\{B, X_{ЛFe2O3}, X_{ЛЗ}\}$  – вектор возмущающих воздействий,  $B$  – основность шлака (CaO/SiO<sub>2</sub>);  $X_{ЛFe2O3}$  – загрязнение лома ржавчиной, % масс.;  $X_{ЛЗ}$  – загрязнение лома посторонними материалами, % масс.

С учетом предложенного формализованного описания процесса конвертерной плавки стали как объекта управления задача ресурсосберегающего управления процессом с учетом экологических характеристик сформулирована следующим образом [7]: на основе входных данных о составе и параметрах шихты  $X=\{X_{MШ}, X_{НШ}\}$ , требуемом качественном составе

$\{X_M\}$ , массе  $\{M_M\}$  и температуре металла  $\{T_M\}$  необходимо определить допустимые значения управляющих воздействий  $U_{ДОП}=\{M_{Флm}, V_д, t_д\}$ , обеспечивающие выполнение критериальных ограничений ( $G_q^0$ ):  $M_{Ш} \leq M_{Ш max}$ ,  $M_M \geq M_{M РЕГ}$ ,  $T_M \geq T_{M РЕГ}$ ,  $M_{CO_2} \leq M_{CO_2 РЕГ}$ . К экологическим ограничениям относятся  $M_{CO_2}$  для соблюдения требований по загрязнению атмосферного воздуха, а также  $M_{Ш}$  для снижения отходоёмкости производства.

### III. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА

Для решения задачи управления конвертерным процессом плавки стали с учетом экологических характеристик предложена функциональная структура программного комплекса, представленная на рис. 1. Основу программного комплекса составляет настраиваемая библиотека математических моделей, позволяющая осуществлять вычисление и визуализацию значений ключевых параметров конвертерного процесса. Библиотека математических моделей включает системы уравнений материального и теплового балансов сталеплавильного процесса в кислородном конвертере.

Согласно материальному балансу вычисляется масса и состав металла, масса и состав шлака, масса выбросов CO<sub>2</sub>. Материальный баланс состоит из приходных и расходных статей. Для определения массы металла используется следующая формула:

$$M_M = M_ч + M_{Л} + M_K - M_E - M_{Fe} - M_B - M_{П},$$

где  $M_K$  – масса кислорода, образующегося в результате разложения оксидов железа неметаллических материалов FeO, кг;  $M_E$  – масса удаляемых при продувке примесей, кг;  $M_{Fe}$  – масса железа, окисляющегося до FeO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, переходящего в шлак, кг;  $M_B$  – масса железа, теряемого с выносами и выбросами, кг;  $M_{П}$  – масса железа, теряемого с пылью, кг.

Тепловой баланс также состоит из приходных и расходных частей и используется для расчета общего количества теплоты и температуры жидкого металла на выходе. Приходная часть теплового баланса:

$$Q_{приход} = Q_ч + Q_X + Q_{FeO} + Q_{ШO} + Q_{CO},$$

где  $Q_ч$  – количество теплоты от жидкого чугуна, кДж;  $Q_X$  – количество теплоты от окисления примесей металлошихты, кДж;  $Q_{FeO}$  – количество теплоты от окисления железа, кДж;  $Q_{ШO}$  – количество теплоты образования соединений в шлаке, кДж;  $Q_{CO}$  – количество теплоты от дожигания CO, кДж.

Расходная часть теплового баланса представлена следующим выражением:

$$Q_{расход} = Q_M + Q_{ШЛ} + Q_G + Q_{Fe} + Q_B + Q_д + Q_K + Q_П,$$

где  $Q_M$  – количество теплоты жидкого металла, кДж;  $Q_{ШЛ}$  – количество теплоты шлака, кДж;  $Q_G$  – количество теплоты отходящих газов, кДж;  $Q_{Fe}$  – количество теплоты от разложения оксидов железа неметаллических материалов, кДж;  $Q_B$  – потери теплоты с выносами и выбросами, кДж;  $Q_д$  – количество теплоты на

пылеобразование, кДж;  $Q_K$  – количество теплоты, затрачиваемое на разложение карбонатов, кДж;  $Q_{П}$  – тепловые потери, кДж.

Алгоритм решения задачи управления процессом конвертерной плавки стали с учетом экологических характеристик приведен на рис. 2.

Основными элементами информационного обеспечения программного комплекса являются: база данных технологических регламентов, в которой хранятся данные о марках стали, ее химическом составе, составе чугуна и лома, составе флюсов, значениях режимных параметров процесса; база данных ферросплавов; база данных учетных записей пользователей для организации ролевой политики и разграничений прав доступа к программному комплексу. Реляционная база данных включает 12 взаимосвязанных таблиц и 58 полей. Реализация информационного обеспечения выполнена средствами системы управления базами данных MySQL.

Интерфейс для взаимодействия с информационной подсистемой, разработанный на языке Python с использованием библиотеки PyQT5, позволяет осуществлять редактирование и пополнение информации в базе данных. Разработанное информационное обеспечение обеспечивает гибкость комплекса за счет возможности внесения в базы данных различных параметров сырья, оборудования и технологических регламентов. Данная особенность позволяет использовать программный комплекс для решения задачи управления конвертерами при различных параметрах сырья и выпускаемой стали. В качестве среды разработки программного комплекса выбрана интегрированная среда PyCharm 2021.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма решения задачи управления процессом конвертерной плавки стали с учетом экологических характеристик

Программное обеспечение комплекса имеет адаптивную архитектуру, благодаря которой поддерживается расширение функциональности за счет разработки и подключения дополнительных программных модулей. В программном комплексе предусмотрено два типа пользователей: администратор системы и пользователь – оператор-дистрибутор конвертерного процесса. Программный комплекс позволяет в режиме советчика оператора выявлять сложные взаимосвязи между параметрами процесса и выдавать пользователю рекомендации  $RC$  по управлению.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Тестирование программного комплекса для управления процессом плавки стали в кислородном конвертере с учетом экологических характеристик по данным ЧерМК подтвердило его работоспособность и возможность использования в режиме советчика оператора на металлургических предприятиях [10]. Исходные данные для тестирования комплекса приведены в табл. 1, 2 и 3 соответственно. Результаты расчета материального и теплового балансов процесса плавки стали приведены на рис. 3, рис. 4 и рис. 5 соответственно.

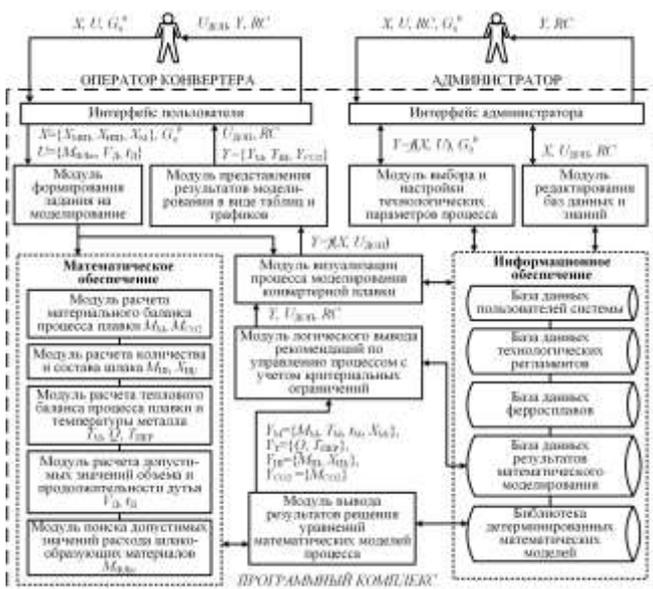


Рис. 1. Функциональная структура программного комплекса

ТАБЛИЦА I ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПО МЕТАЛЛУ

Химический состав, %масс.					Масса, т	Температура, °С
C	Si	Mn	P	S		
0,044	0,004	0,081	0,016	0,022	360	1650

ТАБЛИЦА II ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ЧУГУНА И ЛОМА

Наименование компонента	Химический состав, %					Масса, т	Температура, °С
	C	Si	Mn	P	S		
Чугун	4,77	0,92	0,31	0,06	0,02	290	1400
Лом	0,16	0,17	0,57	0,02	0,02	120	—

ТАБЛИЦА III ВИД И МАССА ФЛЮСОВ

Вид флюса	Известь	Доломит	Доломит обож.	ФОМ
Масса, кг	16069	3123	10	4270

На рис. 3 приведены результаты расчета массы выделяемого углекислого газа  $M_{CO_2}$ .

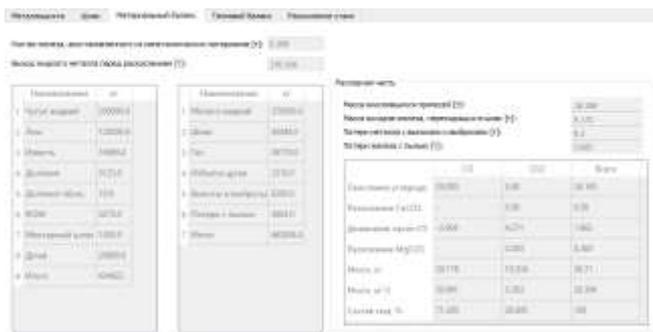


Рис. 3. Результаты расчета материального баланса

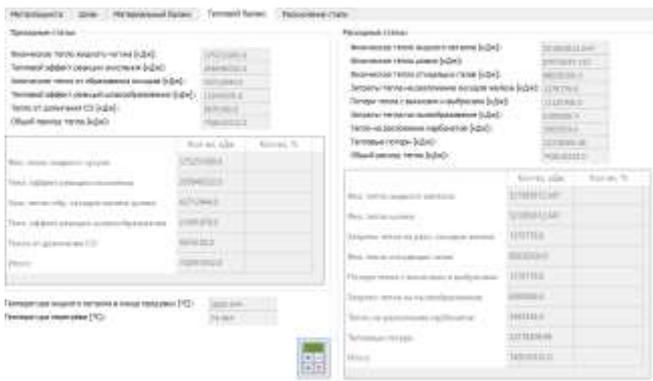


Рис. 4. Результаты расчета теплового баланса

На рис. 5 приведены результаты расчета химических составов металла (стали) и шлака.



Рис. 5. Результаты расчета химических составов стали и шлака

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм решения задачи управления позволяет в режиме советчика оператора-дистрибутора выдавать рекомендации по управлению процессом в виде значений допустимых значений управляемых переменных процесса (времени, объема дутья, массы флюсов) для обеспечения заданной производительности конвертера и состава стали с учетом ограничений по выбросам углекислого газа и массе образующегося шлака.

Использование программного комплекса на производстве позволяет повысить качество продукции, учитывать экологические требования по загрязнению атмосферного воздуха, а также снизить отходоёмкость производства. Программный комплекс может быть использован в качестве компьютерного тренажера для управленческого производственного персонала конвертерного цеха за счет более глубокого понимания причинно-следственных взаимосвязей ключевых параметров процесса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Шаповалов А.Н. Технология и расчет плавки стали в кислородных конвертерах / А.Н. Шаповалов. Новотроицк: НФ МИСиС, 2011. 40 с.
- [2] Кольман Т. Сравнительный анализ кислородных конвертеров. Оценка технического обслуживания и технологического процесса / Т. Кольман, Х. Яндл // Черные металлы. 2014. № 5(989). С. 43-49.
- [3] A.V. Luk'yanov, A.V. Protasov, B.A. Sivak, and A.P. Shchegolev, "Making BOF Steelmaking More Efficient Based on the Experience of the Cherepovets Metallurgical Combine," Metallurgist 60, 248–255 (2016). Doi: 10.1007/s11015-016-0282-y
- [4] Wiesinger H.A. & Patuzzi A.A. & Gara S.P. (1994). Ecological measures for converter steelmaking emphasizing process integration.
- [5] ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества : межгосударственный стандарт : издание официальное : взамен ГОСТ 380-94: дата введения 2008-07-01 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Москва: Стандартинформ, 2009. 12 с.
- [6] ГОСТ 1050-2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей : издание официальное : взамен ГОСТ 1050-88 : дата введения 2015-01-01 / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Москва: Стандартинформ, 2013. 60 с.
- [7] T.B. Chistyakova, I.V. Novozhilova and V.V. Kozlov, "Computer System for Resource- and Energy-Saving Control of Steel-Smelting Converter Process, Taking into Account Environmental Safety Requirements," 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 2020, pp. 506-512, doi: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280752.
- [8] Корнеева А.А. Непараметрическое моделирование конвертерной плавки / А.А. Корнеева, М.Е. Корнет // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2013. № 10. С. 24-28.
- [9] Корнеева А.А. Непараметрическое управление процессом конвертерной плавки стали / А.А. Корнеева, М.Е. Корнет // В сборнике: XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 4303-4314.
- [10] Чистякова Т.Б. Система поддержки принятия решений по эксплуатации огнеупорной футеровки сталеплавильных конвертеров / Т.Б. Чистякова, В.А. Кудлай, И.В. Новожилова, С.А. Суворов, В.В. Козлов // Известия СПбГТИ(ТУ). 2016. № 37 (63). С. 60–66.

# Критерий и алгоритм оптимального выбора ЭЦН с учетом главных факторов ускоренного износа и старения

О. И. Лапик<sup>1</sup>, И. Г. Соловьев<sup>2</sup>

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

<sup>1</sup>x-rax2@yandex.ru, <sup>2</sup>igsolovyev123@gmail.com

**Аннотация.** Масштабное развитие рынка информационных продуктов и услуг требует постоянной инвентаризации, адекватного обновления и совершенствования регламентов и алгоритмов управления режимами эксплуатации скважин. Введение единого критерия оптимальности на период полного жизненного цикла электроприводного центробежного насоса устанавливает сбалансированные пропорции между производительностью, эксплуатационными затратами и наработкой. В данной работе представлен пример схемы поискового перебора параметров оборудования при максимизации критерия прибыли с учётом главных факторов ускоренного износа в условиях стационарной эксплуатации.

**Ключевые слова:** модели, электроприводной центробежный насос, надёжность, оптимизация, алгоритм, факторы ускоренного износа

## I. ВВЕДЕНИЕ

Растущее количество публикаций по интеллектуальным решениям [1] и прогнозированию периодов отказов электроприводных центробежных насосов (ЭЦН) подтверждают, что проблема обеспечения надёжности работы глубинно-насосное оборудование была [2] и остаётся актуальной. Эффективность методов факторного прогнозирования отказов кратно возрастает, если показатели долговечности связываются с условиями выбора технологического режима и параметров оборудования скважин силовыми установками.

Опубликованные ранее результаты проведённых исследований по технологии оптимального синтеза [3] с явным учётом факторов старения, свидетельствуют о состоятельности новых решений по главным компонентам прибыли, доставляемой скважиной на полном жизненном цикле ЭЦН. Кроме традиционных эксплуатационных, отдельно выделенных энергетических затрат, в объединённой оценке критерия можно учесть множество разноаспектных, индивидуальных и важных для предприятия показателей.

Реализация оптимизационного подхода связана с введением новых задач по созданию и сопровождению расширенного класса моделей (по сути, новых ограничений) и прежде всего – модели динамики освоения эксплуатационного ресурса. Цифровая реализация и последующее сопровождение: основной термобарической модели скважины, факторной модели ресурса (риска отказа), вторичных моделей действий осложняющих факторов [3, 4] по данным промысловой

эксплуатации, переводит подобные решения в класс адаптивных оптимальных систем с идентификаторами в замкнутых контурах управления. Правила конструирования и реализация подобных сложно организованных систем основаны на методах последовательного анализа и приближений – от выделения основных связей с постепенной детализацией описания и поэтапным учётом вторичных процессов. Начальная стадия такого анализа представлена ниже.

## II. МОДЕЛИ

Как отмечалось выше, данное исследование определяет правило поиска максимума показателя приведённой суточной прибыли по параметрам оборудования скважины с ЭЦН-ом [3], определяемого выражением:

$$\delta J(q, H_N) = \frac{\Delta J(q, H_N) \cdot T}{T^0} \rightarrow \max \quad (1)$$

Здесь  $\Delta J(q, H_N)$  соответствует суточной прибыли скважины, рассчитанной по главным факторам дохода и затрат от добычи нефти:

$$\Delta J(q, H_N) = c_1(1 - \beta) \cdot q - c_2 \cdot q - c_3 P_1,$$

а  $T$  – прогноз реальной наработки в условиях номинала  $q = q^0$ ,  $h_N = h^0$ , при действии двух главных факторов ускоренного износа:

$$T = \frac{T^0}{\gamma/\gamma_w + a_1 v_1(\omega, H_N) + a_2 v_2(\theta_p)}$$

В этих уравнениях  $c_1$  – дисконтированная для предприятия цена продажи нефти,  $c_2$  – цена эксплуатационных затрат по добыче единицы объёма жидкости обводнённостью  $\beta$ ,  $c_3$  – цена единицы энергозатрат,  $P_1$  – суточная мощность потребления,  $T^0$  – потенциал наработки [сут] по воде,  $\gamma_w$  – удельный вес воды,  $a_1, a_2$  – настроечные параметры факторной модели ресурса,  $v_1, v_2$  – функция влияния главных факторов:

ускоренного механического износа, связанного с заглублением в искривлённый ствол скважины

$$v_1(\omega, H_N) = \omega \left[ a_{11} \left( \frac{H_N}{\bar{H}_N} - \delta H_1 \right)_+ + a_{12} \left( \frac{H_N}{\bar{H}_N} - \delta H_2 \right)_+ \right] \quad (2)$$

и ускоренного старения изоляции вследствие перегрева ЭЦН:

$$v_2(\theta_p) = a_{21} \left( \frac{\theta_p}{\theta_{p+}} - \delta\theta_1 \right)_+ + a_{22} \left( \frac{\theta_p}{\theta_{p+}} - \delta\theta_2 \right)_+ \quad (3)$$

в которых  $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$  – настраиваемые коэффициенты, определяющие интенсивность влияния факторов,  $\theta_p$  и  $H_N$  предельные температура погружного электрического двигателя (ПЭД) и глубина подвески ЭЦН,  $\delta\theta$  и  $\delta H$  – отношение температуры и глубины подвески в точках перелома функции к их предельным значениям.

В названных условиях и согласно [3], температурный режим зоны теплообмена ЭЦН, включая температуру входного –  $\theta(2)$ , омывающего –  $\theta(3)$  потоков и нагрева силового блока –  $\theta_p$  будем оценивать системой уравнений вида:

$$\begin{aligned} (1 + \alpha_1 q) \theta(2) &= \theta_H(3) + \alpha_1 q \cdot \theta_R, \\ \left( 1 + \alpha_3 \frac{q}{P_0^1} \right) \theta(3) &= \theta_H(3) + \alpha_3 \frac{q}{P_0^1} \theta(2) + \alpha_4 \frac{\delta P_1}{P_0^1}, \\ \theta_p &= \theta(3) + \frac{\alpha_5}{1 - \alpha_{51} \beta_G(3)} \frac{\delta P_1}{P_0^1}, \end{aligned} \quad (4)$$

в которой:  $\alpha_1 = \alpha_{10} / (H_R - H_N)$ ,  $\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_{51}$  – настраиваемые теплофизические параметры модели,  $\theta_R \approx \alpha_H H_R$ ,  $\theta_H(3) \approx \alpha_H H_N$  – температуры – [ $^{\circ}C$ ] по геотермали на глубине пласта –  $H_R$  и подвески –  $H_N$ ,  $P_0^1 = 1,3 N_2^0 / \eta_p \eta_N$  – характеристика выбранного типоразмера ПЭД по номиналу мощности потребления,  $\delta P_0 = P_{10} - N_2^0$  – потери энергии работающей установки, идущие на нагрев,  $P_{10} = N_1^0 / \eta_p$  – мощность потребления ПЭД со значением КПД  $\eta_p \approx 0,9$ . Полезная работа –  $N_2^0 = \gamma q^0 h^0$  – полезная работа, совершаемая центробежным насосом в номинальном режиме связана с мощностью потребления на валу подобным соотношением  $N_1^0 = N_2^0 / \eta_N$ , с КПД насоса  $\eta_N \approx 0,5$ .

Для стационарных режимов эксплуатации выбор параметров обустройства, обеспечивающий максимум КПД насоса –  $\eta_N$ , осуществляется по условиям

$$q^0 = \frac{q}{\omega}, \quad h^0 = \frac{1}{\omega^2} \left( r_1 q + H_R - \frac{1}{\gamma} (p_R - p_L) \right), \quad (5)$$

Здесь приняты следующие обозначения (подробнее в [3,4]):  $\langle q, H_N \rangle$  – искомые параметры конструирования по  $q$  – производительности [ $m^3/сут$ ] (тех. режиму) и  $H_N$  – глубине подвески [ $m$ ] по вертикали,  $\langle q^0, h^0 \rangle$  – параметры типоразмера насоса по номиналу производительности и напору,  $\omega$  – значение относительной частоты вращения вала двигателя, далее принято, что с точностью до скольжения частота соответствует номинальному уровню  $\omega = 1$ ,  $p_R, p_L$  –

давление подпора пласта [ $MПа$ ] на глубине забоя  $H_R$  – [ $m$ ] и противодавление на устье в нефтесборнике,  $\gamma$  – удельный вес восходящего потока газожидкостной смеси, средний по стволу подъёмника [ $MПа/м$ ], а  $r_1 = r_U + r_N + r_K + r_R / \gamma$  – суммарное гидросопротивление, эквивалентное потерям напора на устьевом штуцере, в насосно-компрессорной трубе –  $r_N = \rho_N H_N$ , ниже колонны –  $r_K = \rho_K (H_R - H_N)$  – [ $сут/м^2$ ] и притоке – [ $MПа \text{ сут}/м^3$ ] линеаризованной модели кинетики подъёмника с удельными гидросопротивлениями –  $\rho_N, \rho_K$  сегментов конструкции,

Давление у приёма насоса:

$$p(3) = p_R - \gamma (H_R - H_N) - (\gamma r_K + r_R) q \quad (6)$$

определяет ключевую связь расход –  $q$ , глубины подвески –  $H_N$  с предельно допустимым уровнем разгазирования нефти у первой ступени насоса (подробнее в [4]):

$$\beta_{GN} = \frac{\mu_{RS} (p_{GO} - p(3))_+}{p(3) + \mu_{RS} (p_{GO} - p(3))_+} \leq \beta_G^{LIM} \approx 0,25, \quad (7)$$

что в пересчёте на предельную объёмную долю газа у приёма, приводит к условию:

$$\beta_G(3) = \frac{\mu_R(3) (p_{GO} - p(3))_+}{p(3) + \mu_R(3) (p_{GO} - p(3))_+} \leq \beta_{G+}(3) \approx 0,5263,$$

где:  $\mu_{RS}$  и  $\mu_R(3)$  – настраиваемые параметры модели разгазирования,  $p_{GO}$  – давление насыщения.

Это обстоятельство обозначает границы области допустимых решений  $\mathcal{H}$  (рисунок), которая вводится интервальными ограничениями вида:

$$\mathcal{H}: H_{NG}(q) < H_N < \bar{H}_N, \quad (8)$$

здесь  $\bar{H}_N$  – предельный уровень заглубления по критическому значению набора угла кривизны ствола с приближением к забою скважины, а ограничение слева для выбранной производительности  $q$  устанавливает уровень минимально необходимого заглубления –  $H_{NG}(q)$ , выше которого объёмная доля газа у первой ступени (7) станет превышать предельное значения:  $\beta_{GN} > \beta_G^{LIM} \approx 0,25$  и есть обратное решение уравнения (6) относительно  $H_N$  для  $p(3)$ , рассчитанного по условию предела по газу при  $\alpha_{GN}^{LIM} = \beta_G^{LIM} / (1 - \beta_G^{LIM})$ :

$$p(3) = p_G(3) = \frac{\mu_{RS}}{\mu_{RS} + \alpha_{GN}^{LIM}} p_{GO}$$

### III. АЛГОРИТМ

Если долю разгазирования у первой ступени снизить, то линия потенциала с новым допустимым состоянием системы по газу  $\beta_{GN} < \beta_G^{LIM}$  в координатах  $\langle q, H_N \rangle$  сместится внутрь области допустимых значений  $\mathcal{H}$  параллельно потенциалу предельных состояний. Графика преобразования реализуется посредством

перехода от  $p(3) = p_G(3)$  к повышенному уровню давления у приёма с новым значением параметра  $\alpha_{GN} = \beta_{GN}/(1 - \beta_{GN})$ .

Учёт фактора повышенного износа от заглубления (2) доставляет по критерию прибыли компромиссное решение с уменьшенной производительностью и минимальным «штрафом» по заглублению, т. е. на границе:  $H_N = H_{NG}(q)$ . Однако приграничные решения с предельно высоким газовым фактором у приёма значительно снижает теплопередачу от ПЭД в омывающий поток жидкости (4), обуславливая сильный перегрев двигателя.

Учёт второго теплового фактора ускоренного старения (3) в критерии прибыли  $\delta J(q, H_N)$  (1) смещает точку оптимума с отходом от нижней границы  $\mathcal{H}$  за счёт увеличения глубины подвески. Именно такая логика «покоординатного подъёма» по поверхности критерия прибыли положена в основу алгоритма решения задачи (1,5,8) оптимального конструирования.

Численная процедура одномерного поиска максимума унимодальной функции  $\delta J(q, H_N)$  на  $k$ -ом цикле парного перебора первой координаты аргумента –  $q$  вводится записью

$$\langle q(k)_1, H_N(k)_1, \delta J(k)_1 \rangle = F(qL(k), qR(k), \delta q),$$

а по второй координате –  $H_N$ , записью вида

$$\langle q(k), H_N(k), \delta J(k) \rangle = F(HL(k), HR(k), \delta H),$$

где  $[qL(k), qR(k)]$  – интервал поиск,  $\delta q$  – точность поиска и  $\langle q(k)_1, H_N(k)_1, \delta J(k)_1 \rangle$  результат поиска первой половины  $k$ -ого цикла, а  $[HL(k), HR(k)]$  – интервал поиск,  $\delta H$  – точность поиска и  $\langle q(k), H_N(k), \delta J(k) \rangle$  – финальный результат поиска в  $k$ -ом цикле.

Цифровая реализация алгоритма представляет собой цикл, на правом этапе которого вводится начальная точка  $\langle q(1), H_N(1) \rangle \subset \mathcal{H}$  реализации алгоритма. Дальнейшее работа основного цикла связана с выполнением двух полуциклов для каждой координаты поиска  $q$  и  $H_N$ . В первом на основе исходной точки при фиксированном значении  $p(3) = p_G(3)$ . Определяя интервалы поиска  $[H_{NG}, \bar{H}_N]$  с соответствующим им расходами  $[qL, qR]$ . После чего методом золотого сечения осуществляется поиск максимума значения критерия  $\delta J(q, H_N)$ . При выполнении условия  $qR - qL < \delta q$  на первом полуцикле происходит переход ко второму полуциклу с фиксированным новым значением расхода  $q$  и соответствующими глубинами  $[HL, HR] = [H_{NG}(q), \bar{H}_N(q)]$ , где так же методом золотого сечения определяется точка максимума критерия  $\delta J(q, H_N)$ . После этого проверяется условие точности

$$(|q(k) - q(k-1)| > \delta q) \vee (|H_N(k) - H_N(k-1)| > \delta H) \quad \text{и}$$

происходит либо возврат с полученной точкой на начальный этап первого полуцикла с записью полученной точки  $\langle q(k+1), H_N(k+1) \rangle$ , либо завершение выполнения основного цикла с финальным значением точки, соответствующей максимуму критерия.

#### IV. ПРИМЕР

Приведённые ниже результаты работы алгоритма поисковой оптимизации носят демонстрационный характер. Параметры термобарической модели тестируемой скважины были восстановлены расчётным путём по данным промысловой эксплуатации типовых скважин непрерывного фонда месторождений Среднего Приобья с использованием дополнительной информации по термометрии [5] в открытых источниках.

Выбор параметров модели ресурса и относительных цен критерия прибыли производился экспертным путём, на основе данных прежних исследований [3, 4] и опыта специалистов по подбору, эксплуатации и ремонту погружного оборудования. Параметрические настройки термобарической и ресурсной моделей, а также факторов ускоренного износа и критерия прибыли представлены в табл. 1

ТАБЛИЦА I ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ НАСТРОЙКИ В МОДЕЛЕЙ, ФАКТОРОВ УСКОРЕННОГО ИЗНОСА И КРИТЕРИЯ

Параметры модели скважины					
Параметр	$q_+$	$H_R$	$p_R$	$\gamma$	$p_L$
Значение	135	3000	23,402	0,0075	1,5
Параметр	$\gamma_w$	$\beta$	$\mu_{RS}$	$\mu_R(3)$	$p_{G0}$
Значение	0,0104	0,25	0,097	0,322	18,72
Параметр	$r_r$	$\rho_K$	$\rho_N$	$r_i$	$\theta_R$
Значение	0,128	0,0003	0,002	4	111
Параметр	$a_{10}$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_{51}$
Значение	1,82	400	150	35	1,69
Настройки интенсивности влияния фактора ускоренного механического износа					
Параметр	$\bar{H}_N$	$H_1$	$H_2$	$a_{11}$	$a_{12}$
Значение	2750	825	220	0,8	2,2
Настройки интенсивности влияния фактора ускоренного старения изоляции					
Параметр	$\theta_{p+}$	$\theta_1$	$\theta_2$	$a_{21}$	$a_{22}$
Значение	200	40	160	0,5	3
Настройки критерия относительной приведённой суточной прибыли					
Параметр	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$a_1$	$a_2$
Значение	1,25	0,125	0,0072	0,5	2

В качестве точки сравнения выбрана точка эксплуатации по практикуемым условиям выбора предпочтительных режимов эксплуатации, характеризующейся высокими значениями расхода и уровнем заглубления (правый верхний угол области допустимых решений на рисунке) со значениями  $\langle q(0), H_N(0) \rangle \subset \mathcal{H} = \langle 110, 2750 \rangle$ . Начальными точками работы алгоритма поисковой оптимизации выбраны  $\langle q(1), H_N(1) \rangle \subset \mathcal{H} = \langle 100, 2750 \rangle$  для первого опыта и  $\langle q(1), H_N(1) \rangle \subset \mathcal{H} = \langle 15, 2300 \rangle$  для второго, с условиями остановки  $\delta q = 1$  и  $\delta H_N = 10$ . Графическое изображение

траекторий максимизации критерия внутри области допустимых решений представлены на рисунке.

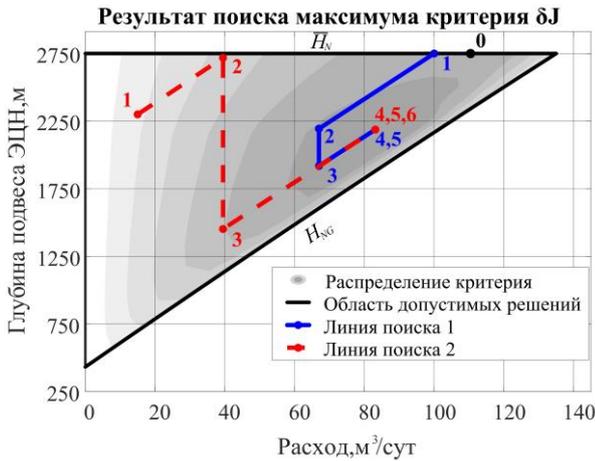


Рис. 1. Результаты работы алгоритма внутри области  $\mathcal{H}$

Конечным результатом работы алгоритма принимается среднее значение двух найденных пар параметров  $\langle q, H_N \rangle$  в каждом опыте. Рассчитанные параметры состояния системы в результате выполнения алгоритма представлены в табл. 2. В обоих примерах достижение зоны оптимума совершалось на 3 шаге работы алгоритма (4 точки на рисунке).

ТАБЛИЦА II ЦИКЛИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ ВДОЛЬ ТРАЕКТОРИИ МАКСИМИЗАЦИИ ПРИБЫЛИ.

Точка эксплуатации скважины							
$k$	$q(k)$	$H_N(k)$	$h^0(k)$	$\theta_p(k)$	$\beta_{GN}(k)$	$\partial J(k)$	$\partial T(k)$
0	110,0	2750	3003	147,1	0,128	28,4	0,57
Опыт 1 (Линия поиска 1)							
$k$	$q(k)$	$H_N(k)$	$h^0(k)$	$\theta_p(k)$	$\beta_{GN}(k)$	$\partial J(k)$	$\partial T(k)$
1	100,0	2750	2737	140,3	0,100	28,2	0,58
5	83,1	2183	2207	131,4	0,152	33,1	0,72
Опыт 2 (Линия поиска 2)							
$k$	$q(k)$	$H_N(k)$	$h^0(k)$	$\theta_p(k)$	$\beta_{GN}(k)$	$\partial J(k)$	$\partial T(k)$
1	15,0	2300	459	103,7	0,015	8,80	0,77
6	83,3	2187	2210	131,6	0,153	33,1	0,72
Итоговая точка							
$k$	$q(k)$	$H_N(k)$	$h^0(k)$	$\theta_p(k)$	$\beta_{GN}(k)$	$\partial J(k)$	$\partial T(k)$
1	83,2	2185	2208	131,6	0,152	33,1	0,72

## V. ВЫВОДЫ

Проведённые исследования и результаты оптимального конструирования по критерию приведённой суточной прибыли полного жизненного цикла ЭЦН (1) свидетельствуют, что технология синтеза по интегрированным показателям качества в условиях многовариантного выбора позволяет не только устанавливать предпочтения конкурентным решениям, но и определяет оптимальное решение, которое в принятых ограничениях не может быть улучшено. В рассмотренном примере максимальное значение критерия  $\delta J(q, H_N)$  на 17 % выше, чем в первоначально выбранной точке сравнения.

Применение алгоритма по координатной максимизации на основе установленной связи координат режима и заглубления с главными факторами старения и износа комплексного показателя прибыли позволяет достичь быстрой сходимости в область оптимума за 3 шага, последующие шаги связаны с дальнейшим достижением заданного уровня точности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Real-Time Monitoring and Predictive Failure Identification for Electrical Submersible Pumps / A.S. Bhardwaj, R. Saraf, G.G. Nair, S. Vallabhaneni // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, 11–14 Nov. 2019. URL: <https://doi.org/10.2118/197911-MS> (дата обращения 12.05.2022).
- [2] Reality vs. Expectations for ESP Reliability Analysis / M. Dowling // SPE Gulf Coast Section Electric Submersible Pumps Symposium, The Woodlands, Texas, USA, 13-17 May. 2019. URL: <https://doi.org/10.2118/194398-MS> (дата обращения 12.05.2022).
- [3] Соловьев И.Г., Константинов И.В., Говорков Д.А. Оптимизация параметров обустройства и режима эксплуатации скважины с ЭЦН в условиях осложнений // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2019. № 9. С. 28–35.
- [4] Соловьев И.Г., Константинов И.В., Говорков Д.А. ресурсно-энергетическая эффективность обустройства скважин с частотно-регулируемой подачей насоса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 6. 60–72.
- [5] Сарачева Д.А., Вахитова Р.И., Уразаков К.Р. Зависимость теплового состояния электроцентробежного насоса от частоты вращения двигателя // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 12. С.103–110.

# Разработка методологии проектирования программного обеспечения инфокоммуникационных систем

М. В. Лившиц

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
marina.livshits24@gmail.com

**Аннотация.** В статье представлено описание процесса проектирования программного обеспечения инфокоммуникационных систем. Приведен результат анализа существующих методологий разработки программного обеспечения, выявлены особенности проектирования программного обеспечения инфокоммуникационных систем, описано применение цикла безопасной разработки при проектировании программного обеспечения и проектной документации программного комплекса внутриобъектовой сети связи.

**Ключевые слова:** программное обеспечение, модель жизненного цикла, качество программного обеспечения, инфокоммуникационная система, автоматизация разработки программного обеспечения, создание программной документации, управление проектами

## I. ВВЕДЕНИЕ

Разработка программного обеспечения (ПО) – это стандартизированный комплексный процесс, который проходит множество различных этапов в течение длительного времени. Первым и одним из важнейших этапов жизненного цикла ПО является подбор методологии разработки и правильное определение и планирование приоритетов на начальном этапе разработки. [1]

Разработка программного обеспечения – сложный многоступенчатый процесс. Для создания современного приложения сначала придумывается идея и концепция, ищутся инвестиции, подбирается команда, составляется список функций, которыми должна обладать конечная программа, подбирается визуальный стиль и так далее. Этот процесс включает в себя множество обязательных этапов, некоторые из которых могут проходить параллельно, в зависимости от сложности и глубины проекта.

Необходимо особое внимание обратить на особенности самого проекта и объекта исследования с целью корректного и наиболее эффективного выбора методологии разработки ПО.

Жизненный цикл разработки программного обеспечения – это условная схема, которая содержит в себе все этапы, через которые ПО проходит от формирования в виде идеи до последних дней своей работы, что еще раз подтверждает вышесказанное: разработка приложения не прекращается даже после его реализации.

## II. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОЛОГИЙ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Методология разработки программного обеспечения – это система, определяющая порядок выполнения задач, методы оценки и контроля. Модели разработки ПО выбирают, исходя из направления проекта, его бюджета, сроков реализации конечного продукта, а также внимание стоит обратить и на характер и темперамент руководителя проекта и его команды. Выбор методологии разработки ПО определяет, как описанные выше этапы жизненного цикла разработки будут связаны между собой, и в какой последовательности реализованы. Подходы разработки ПО отличаются друг от друга тем, как этапы жизненного цикла программного обеспечения взаимосвязаны между собой внутри цикла разработки.

Методология разработки – это подход к организации проектирования программного обеспечения.

На сегодняшний день существуют различные подходы к разработке программного обеспечения инфокоммуникационных систем – моделей жизненного цикла разработки ПО. Разнообразие таких моделей обусловлено разнообразием целей разработки ПО и в каждом конкретном случае их необходимо подгонять под особенности продукта, проекта и компании-разработчика. К числу наиболее распространённых моделей жизненного цикла разработки ПО относятся:

- каскадная модель («водопад»);
- RUP;
- RAD;
- Agile.

Представим краткий анализ данных моделей.

### A. Каскадная модель (Waterfall Model)

Это модель процесса разработки ПО, при которой разработчики ПО проходят по всем фазам разработки (анализ требований, проектирование, реализация, тестирование, интеграция и поддержка) последовательно.

Применение каскадной модели разработки обосновано при соблюдении следующих условий:

- объект управления технически сложный и не имеет аналогов;

- требования, технологии, инструменты известны заранее;
- влияние внешней среды практически отсутствует;
- заказчик не участвует в работе над проектом;
- нельзя сдавать проект по частям.

#### *В. Унифицированный процесс разработки RUP (Rational Unified Process)*

Унифицированный процесс разработки RUP (Rational Unified Process) – это универсальная методология разработки специализированного обеспечения, уделяющая большое внимание распределению задач и повышению индивидуальной ответственности в команде разработчиков.

Практическое применение предложенного в рамках RUP подхода помогло проектировщикам программного обеспечения понять важность документирования на всех этапах разработки.

Считается, что в связи с большим упором на документирование методология RUP предназначена для крупных проектов разработки, но есть множество примеров, когда и небольшие проекты значительно выигрывали от внедрения RUP.

#### *С. Инкрементная модель RAD (Rapid Application Development)*

Это концепция создания средств разработки программных продуктов, уделяющая особое внимание обеспечению технологического процесса, позволяющего разработчику максимально быстро создавать программные продукты.

Процедура проектирования и разработки программного обеспечения в рассматриваемой модели подразумевает разделение всего цикла разработки на более мелкие, и выполнение этапов определения требований, кодирования, внедрения и тестирования в каждом модуле. На первом большом этапе жизненного цикла ПО подразумевается выполнение базового набора функциональности, а далее последовательное дополнение новым функционалом.

Инкрементная модель используется, когда основные требования к проектируемой системе четко определены, необходим быстрый выход на рынок и возможно дополнение ПО в процессе эксплуатации и дальнейшей проработки.

#### *Д. Гибкая методология разработки Agile*

Это совокупность гибких методов и приемов, которые используются при проектировании ПО.

Основной ценностью гибкой методологии Agile являются актуальные потребности пользователя; большой упор делается на проработку бизнес-требований, получение минимально-жизнеспособного продукта на каждом этапе разработки с целью получения обратной связи от пользователя или заказчика.

Разработка проходит через ряд итераций. Каждая итерация – это фактически отдельный проект.

При всех видимых достоинствах данной методологии, гибкая методология разработки Agile значительно увеличивает скорость разработки при работе над крупным проектом.

### III. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Проектирование программного обеспечения инфокоммуникационных систем подразумевает топологический, структурный, а также параметрический синтез. Причем все параметры инфокоммуникационных систем тесно связаны между собой.

Рассмотрим особенности проектирования ПО инфокоммуникационных систем на примере аппаратно-программного комплекса «Видеоконференцсвязи».

Аппаратно-программный комплекс «Видеоконференцсвязь» обеспечивает:

- организацию и предоставление пользователям современных инфокоммуникационных услуг внутриобъектовой связи;
- совместно с каналобразующим и другим оборудованием комплекса связи доведение услуг внешней связи;
- транспорт данных для радиоэлектронных систем и комплексов различного оборудования.

Основные принципы построения аппаратно-программного-комплекса «Видеоконференцсвязь», заложенные в технические решения:

- открытая архитектура и принципы построения в строгом соответствии с перспективными международными стандартами и рекомендациями;
- единая технологическая основа, включая кабельную систему, стеки сетевых протоколов, методы конфигурирования, управления, технического обслуживания и обеспечения информационной безопасности, для реализации всего спектра телекоммуникационных услуг внутренней связи;
- иерархический модульный принцип построения аппаратной платформы на основе стандартизованных электронных модулей;
- иерархический модульный принцип создания переносимого кроссплатформенного ПО, независимого от аппаратной платформы и операционной среды;
- распределенная архитектура для обеспечения надежности функционирования, центральное серверное оборудование служит только для расширения функциональности предоставляемых услуг связи.

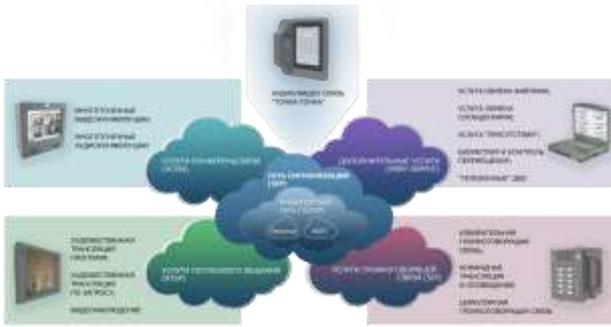


Рис. 1. Единая архитектурная и технологическая основа

Все услуги связи реализуются и предоставляются на единой архитектурной и технологической основе. В качестве коммутируемой среды передачи информации используется сеть Ethernet и Wi-Fi, транспортная сеть построена на базе стека протоколов TCP/IP, управление сессиями связи осуществляется по протоколу сигнализации SIP. Такой подход позволяет легко расширять спектр предоставляемых пользователям услуг связи. [2]

#### IV. РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Основываясь на проведенном анализе методологий проектирования программного обеспечения и, учитывая особенности проектирования ПО инфокоммуникационных систем был разработан цикл безопасной разработки программного обеспечения. Цикл безопасной разработки – это подход к предоставлению гарантий безопасности и качества разрабатываемого программного обеспечения, дополняющий все фазы процесса разработки подходами к обеспечению безопасности информации.

Цикл безопасной разработки, адаптированный под разработку инфокоммуникационных систем, включает в свой состав следующие основные фазы разработки программного обеспечения:

- бизнес-анализ и формирование требований заказчика, плотная работа с заказчиком на всех этапах разработки;
- анализ решений по архитектуре построения инфокоммуникационной системы;
- проектирование инфокоммуникационной системы;
- разработка инфокоммуникационной системы;
- тестирование инфокоммуникационной системы;
- эксплуатация инфокоммуникационной системы.

Цикл безопасной разработки базируется на основе практик направленных на автоматизацию процесса разработки, обучение команды, подготовку отчетности и

непосредственные действия, связанные с анализом безопасности разрабатываемой системы и имплементацией механизмов, направленных на улучшение безопасности и качества разрабатываемого ПО.

На стадиях цикла непрерывной разработки ПО используются различные программные средства для автоматизации и исключения ошибок в рутинных процессах разработки.

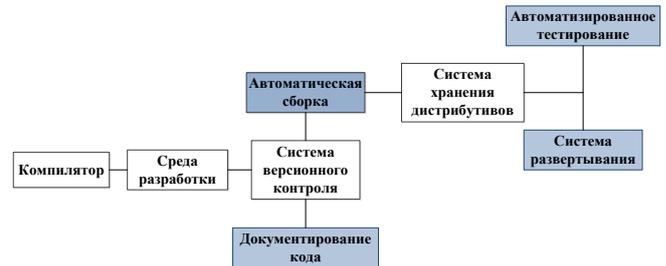


Рис. 2. Процесс разработки программного обеспечения

При внедрении цикла безопасной разработки опытным путем было доказано, что своевременное тестирование и заблаговременное обнаружение ошибок значительно уменьшает стоимость разработки.

Используемая методика разработки безопасного ПО позволяет автоматизировать основные этапы создания конечного программного продукта и обеспечить его необходимым качеством при сокращении сроков разработки. Таким образом, обеспечение безопасности и качества происходит на каждом этапе разработки ПО, что гарантирует обеспечение безопасности всего подхода к разработке ПО.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен обзор существующих методологий проектирования программного обеспечения, выявлены особенности проектирования ПО инфокоммуникационных систем. В статье был представлен и описан цикл безопасной разработки, применяемый при разработке ПО инфокоммуникационных систем.

Применение ЦБР позволит:

- повысить защищенность информации, для обработки которой предназначены разрабатываемые отечественными предприятиями изделия;
- повысить качество разрабатываемой предприятиями изделий за счет повышения отказоустойчивости;
- использовать факт применения безопасной разработки как конкурентное преимущество при привлечении потенциальных заказчиков.

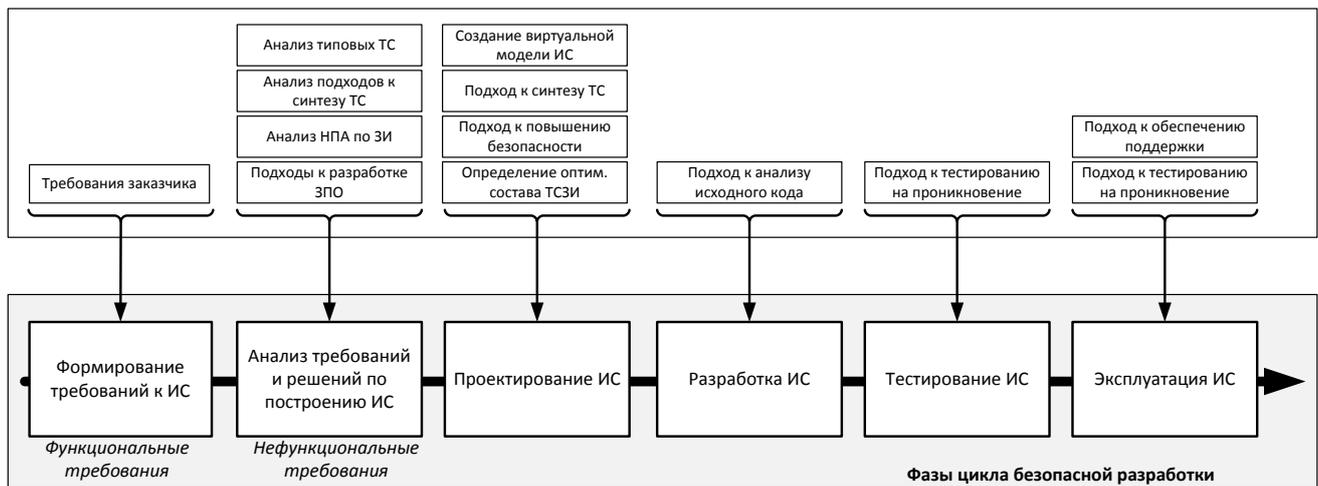


Рис. 3. Цикл безопасной разработки

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Таненбаум Э. Архитектура компьютера. 5-е изд. СПб.: 2007. 844 с
- [2] Гаазе М.В., Лычагин Н.И., Малаховский А.А. Методология создания и реализации интегрированных телекоммуникационных служб для ведомственных сетей связи // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2012. №6 (162). С.52-58.

# Синтез системы управления аппаратом воздушного охлаждения с применением численных методов моделирования

М. А. ЛЬВОВ

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
santakloun1702@gmail.com

**Аннотация.** В работе проводится анализ и исследование аппарата воздушного охлаждения (далее АВО), входящего в систему очистки природного газа методом абсорбционной осушки. Физические процессы, протекающие в аппарате, описываются системой уравнений с распределенными параметрами. Область применения аналитических методов решения подобных уравнений ограничена либо линейными динамическими моделями, либо относительно простыми, изученными нелинейными моделями. Поэтому единственным универсальным подходом к исследованию поведения сложных систем управления (СУ) по математическим моделям (ММ) является применение численных методов с использованием средств современной вычислительной техники и информационных технологий.

**Ключевые слова:** аппарат воздушного охлаждения, математическая модель, насыщенный пар, система управления

## I. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

При составлении ММ теплообменных процессов в системе воздушного охлаждения были приняты следующие допущения:

- в конденсационных секциях среда движется в режиме идеального вытеснения;
- поперечное перемешивание считается идеальным. Данное допущение приводит к составлению одномерной модели, в которой учитывается динамическое распределение температуры только по длине конденсационных секций АВО;
- принимается, что теплообменный процесс сопровождается конденсацией насыщенного пара;
- ММ учитывает накопление теплоты в трубах конденсационной секции;
- трубы в конденсационных секциях выполнены с оребрением.

С учетом перечисленных допущений динамическая ММ теплообменного процесса в конденсационных секциях АВО принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_{н.п.}(x, t)}{\partial t} &= -v_{н.п.}(\bar{G}_{н.п.}, \theta_{н.п.}) \frac{\partial \theta_{н.п.}(x, t)}{\partial x} - \\ &\quad - R_{н.п.}[\theta_{н.п.}(x, t) - \theta_{ст}(x, t)] \\ \frac{d\theta_{ст}}{dt} &= R_{c2}(\theta_{н.п.} - \theta_{ст}) - nR_{c1}(\theta_{ст} - \theta_{ср}), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\theta_{н.п.}$ ,  $\theta_{ст}$ ,  $\theta_{ср}$  – температуры насыщенного пара, стенки теплообменных секций АВО и окружающей среды;  $v_{н.п.}$  – скорость насыщенного пара, м/с;  $\bar{G}_{н.п.}$  – расход насыщенного пара, кмоль/с;  $R_{н.п.}$ ,  $R_{c1}$ ,  $R_{c2}$  – физикотехнологические коэффициенты, зависящие от физических свойств насыщенного пара и материала стенки теплообменных секций АВО;  $n$  – количество трубопроводов в АВО.

Второе уравнение в системе (1) является обыкновенным ДУ первого порядка. Для его однозначного решения необходимо знать начальное условие  $\theta_{ст}$  в момент времени  $t = 0$ .

Значение  $\theta_{ст}$  можно получить из экспериментальной зависимости:

$$\theta_{ст} = (\theta_{ср0} - \theta_{yc}) \exp(\beta G_B) + \theta_{yc},$$

где:

$$\beta = \frac{\ln[(\theta_{ср0} - \theta_{yc}) / (q\theta_{yc} - \theta_{yc})]}{G_{B \max}}$$

Здесь  $\theta_{ср0}$  – начальная средняя температура окружающей среды при неработающем вентиляторе;  $\theta_{yc}$  – установившееся значение температуры окружающей среды;  $G_{B \max}$  – максимальный расход воздуха, нагнетаемый вентилятором;  $q$  – коэффициент, выбираемый из интервала  $[1,001 \dots 1,02]$ . Этот коэффициент должен отвечать неравенству  $q < \theta_{ср0} \theta_{yc}$ .

Граничные условия для температурного профиля пара математической модели (1) определяются выражениями:

$$\theta_{н.п.}(x)|_{x=0} = \theta_{н.п.}^{вх}(t); \quad \theta_{н.п.}(x)|_{x=l_{аво}} = \theta_{ст}^{вх}(x)$$

Для компьютерного моделирования теплообменных процессов в АВО необходимо преобразовать непрерывную ММ (1) к дискретно-непрерывному виду:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_{н.п.i}}{dt} &= -\left(\frac{v_{н.п}}{h} + R_{н.п.}\right)\theta_{н.п.i} + \frac{v_{н.п}\theta_{н.п.i-1}}{h} + R_{н.п.}\theta_{ст.i} \\ \frac{d\theta_{ст.i}}{dt} &= R_{c2}\theta_{н.п.i} - (nR_{c1} + R_{c2})\theta_{ст.i} + nR_{c1}\theta_{ср}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $v_{н.п} = v_{н.п}(\bar{G}_{н.п}, \theta_{н.п.i})$ .

«Распределенность» вдоль пространственной оси  $x$  можно сосредоточить в  $n$  точках (сечениях) АВО. Такое количество точек обусловлено тем, что пространство АВО можно условно разбить на  $n$  сечений. Для примера возьмем 3 точки, тогда физический смысл каждой из них: 1 – точка ввода продукта; 2 – средняя точка АВО; 3 – точка вывода продукта из АВО. Тогда дискретно-непрерывная модель (2) принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_{н.п.1}}{dt} &= -((v_{н.п}/h) + R_{н.п.})\theta_{н.п.1} + (v_{н.п}/h)\theta_{н.п.0} + R_{н.п.}\theta_{ст.1}; \\ \frac{d\theta_{н.п.2}}{dt} &= -((v_{н.п}/h) + R_{н.п.})\theta_{н.п.2} + (v_{н.п}/h)\theta_{н.п.1} + R_{н.п.}\theta_{ст.2}; \\ \frac{d\theta_{н.п.3}}{dt} &= -((v_{н.п}/h) + R_{н.п.})\theta_{н.п.3} + (v_{н.п}/h)\theta_{н.п.2} + R_{н.п.}\theta_{ст.3}; \\ d\theta_{ст.1}/dt &= R_{c2}\theta_{н.п.1} - (nR_{c1} + R_{c2})\theta_{ст.1} + nR_{c1}\theta_{ср}; \\ d\theta_{ст.2}/dt &= R_{c2}\theta_{н.п.2} - (nR_{c1} + R_{c2})\theta_{ст.2} + nR_{c1}\theta_{ср}; \\ d\theta_{ст.3}/dt &= R_{c2}\theta_{н.п.3} - (nR_{c1} + R_{c2})\theta_{ст.3} + nR_{c1}\theta_{ср}; \end{aligned}$$

В соответствии с этой структурной схемой, составленной по вышеприведенной системе уравнений, была реализована компьютерная модель в программной среде Simulink. Далее были построены компьютерные модели, соответствующие системе уравнений (2) при  $i = 3, 5, 9, 17, 33, 65, 129, 257, 513$ . Кроме скорости насыщенного пара, параметры системы в процессе моделирования были неизменны. Был проведен сравнительный анализ графиков изменения контролируемых параметров в каждой из систем. На рисунке 1 представлен график аппроксимированных значений параметров для систем с  $l/i$  периодами дискретизации по пространственной переменной.

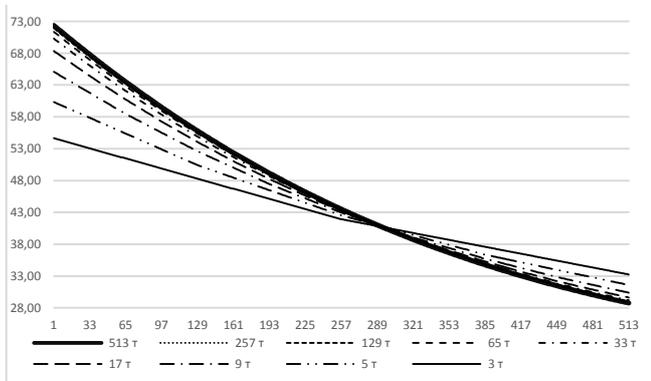


Рис. 1. Распределение температуры насыщенного пара вдоль трубы при различных частотах дискретизации

На графике (рис. 1) видно, что наиболее точно процесс теплопередачи в стационарном режиме описывает система из 1026 уравнений: температура в начальной точке близка к температуре  $\theta_{н.п}$  насыщенного

пара на входе в систему. Ее мы и будем использовать при построении СУ.

Основная задача системы регулирования АВО состоит в поддержании заданной температуры жидкой фазы на выходе аппарата. В качестве возмущающих воздействий рассматриваются: изменение режима работы вентилятора, увеличение термического сопротивления, снижение аэродинамических показателей, колебания расхода охлаждаемой или конденсируемой фазы, колебания температуры охлаждаемого или конденсируемого продукта на входе в теплообменные секции АВО. Технически наиболее простым способом регулирования является изменение расхода охлаждающего воздуха посредством применения частотно-регулируемого электропривода вентилятора.

Для реализации основной задачи регулирования, базируясь на (2), была разработана ММ управляемого теплообменного процесса в конденсационных секциях АВО [6]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial\theta_{н.п}}{\partial t} &= v_{н.п}(\bar{G}_{н.п}, \theta_{н.п})\frac{\partial\theta_{н.п}}{\partial x} - R_{н.п}[\theta_{н.п} - \theta_{ст}] \\ \frac{\partial\theta_{ст}}{\partial t} &= R_{c1}f(u) + R_{c2}\theta_{н.п} - R_{c}\theta_{ст} \end{aligned} \quad (4)$$

где  $f(u) = \theta_{ср}(Q_v)$  – функция управления температурой среды;  $\theta_{ср}$  – температура окружающей среды (воздуха);  $Q_v$  – расход воздуха, м<sup>3</sup>/с. Соответствующая ММ (4) структурная схема приведена на рис. 2:

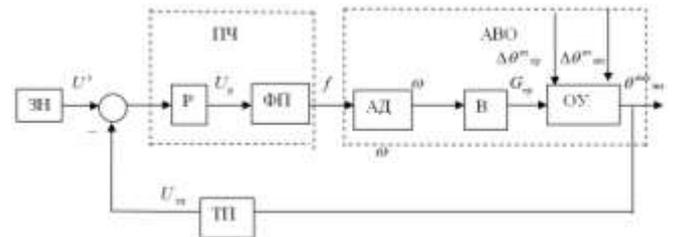


Рис. 2. Структурная схема управляемого теплообменного процесса в АВО

В процессе компьютерного моделирования была получена серия графиков переходных процессов при различных возмущающих воздействиях. Все переходные процессы удовлетворяют заданным к СУ АВО требованиям. Система регулирования обеспечивает температуру флегмы на выходе АВО на требуемом уровне ( $\theta_{н.п.к} = 33,84$  °C). Результаты работы СУ приведены на рис. 3.

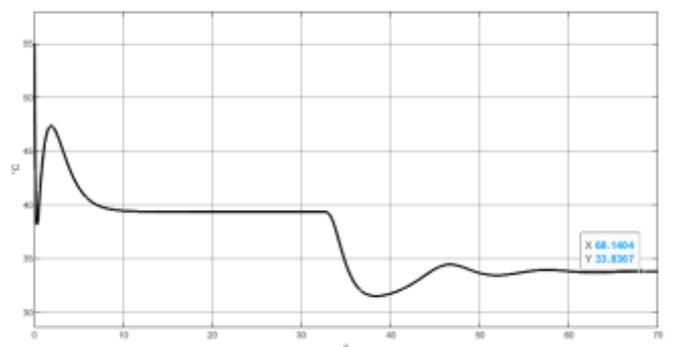


Рис. 3. Стационарный режим замкнутого контура с регулятором

Вывод: в результате работы была рассмотрена ММ СУ АВО. Были приняты необходимые допущения, и с их учетом была построена ММ процесса теплообмена, представленная в виде систем дифференциальных уравнений в частных производных с начальными и граничными условиями. Для построения КМ был выполнен переход от непрерывных к дискретно-непрерывным уравнениям. Был проведен анализ дискретно-непрерывных систем на основе данных, полученных в результате компьютерного моделирования установившихся процессов. В результате была выбрана система, наиболее близко описывающая исследуемые тепловые процессы. На основе построенной ММ была синтезирована СУ с регулятором в виде частотно-регулируемого электропривода вентилятора. Полученная СУ была проверена при различных возмущающих

воздействиях. СУ удовлетворяет требуемым характеристикам – поддерживает заданную температуру насыщенного пара.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Болгарский А.В. Термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1975. 496 с.
- [2] Душин С.Е., Красов А.В., Кузьмин Н.Н. Моделирование систем управления: учеб. пособие для вузов. М.: Студент, 2012. 347 с.
- [3] Абрамкин С.Е., Душин С.Е. Моделирование управляемых процессов абсорбционной осушки природного газа. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 160 с.
- [4] Абрамкин С.Е., Грудяева Е.К., Душин С.Е. Система регулирования теплообменного процесса в аппарате воздушного охлаждения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 6. С. 35–40.

# Дизель-генераторная установка с переменной частотой вращения

Д. П. Михайлов<sup>1</sup>, А. Н. Лукичев<sup>2</sup>, А. А. Ким<sup>3</sup>, С. А. Гринишена<sup>4</sup>

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>1</sup>dpmikhailov@etu.ru, <sup>2</sup>anlukichev@etu.ru, <sup>3</sup>aakim@stud.etu.ru, <sup>4</sup>classicheartinside18@gmail.com

**Аннотация.** Статья посвящена созданию модели автономной системы электроснабжения. Система включает в себя генератор с переменной частотой вращения, выпрямитель, распределительное устройство на постоянном токе, автономный инвертор напряжения. Основной идеей предлагаемого решения является повышение эффективности использования углеводородного топлива за счет подстройки скорости вращения дизельного двигателя под уровень потребляемой мощности. Проведено моделирование электростанции с дизель-генераторной установкой переменной частоты вращения. Рассчитан возможный эффект от применения технологии.

**Ключевые слова:** система электроснабжения, генератор с переменной частотой вращения, выпрямитель, автономный инвертор, распределение энергии на постоянном токе, возобновляемые источники энергии, накопители энергии

## I. ВВЕДЕНИЕ

Горнодобывающая промышленность, предприятия топливно-энергетического комплекса, объекты пограничной службы и вышки мобильной связи зачастую находятся на территориях с отсутствующим центральным электроснабжением.

Основными источниками электроэнергии на упомянутых выше территориях являются дизель-генераторные электростанции. При долевых уровнях нагрузки дизельное топливо тратится не столько на выполнение полезной работы, сколько на поддержание скорости вращения вала электрической машины, для обеспечения частоты напряжения.

В связи с этим, актуально техническое решение, позволяющее снизить потребление дизельного топлива, что в свою очередь понизит конечную стоимость кВт\*ч электроэнергии. Технология, позволяющая реализовать снижение потребления топлива, представлена в статье.

## II. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ РАБОТАЮЩЕЙ С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ

### A. Варианты устройства дизель-генераторных установок с переменной частотой вращения

ДГУ с переменной частотой вращения можно разделить на два класса – трансформаторные и безтрансформаторные.

Трансформаторные дизель генераторные установки с переменной частотой вращения (ДГУПЧВ), в свою очередь, разделяются по типу трансформатора на высокочастотные и низкочастотные. Низкочастотный трансформатор обладает большими массогабаритными характеристиками. Высокочастотный трансформатор в составе ДГУ обладает пониженными массогабаритными характеристиками, однако, значительно усложняет структуру электростанции за счет увеличения количества выпрямителей и инверторов. Применение трансформаторов в составе ДГУПЧВ прямо или косвенно повышает их стоимость, что ставит под вопрос окупаемость топологии. [1]

Безтрансформаторные ДГУПЧВ можно разделить на три типа, по способу повышения напряжения при сниженной скорости вращения синхронного генератора. В первом случае функцию повышения напряжения выполняет активный выпрямитель напряжения, во втором широтно-импульсный преобразователь, третий основан на применении синхронного генератора с повышенным номинальным напряжением на статорной обмотке. [2]

В данной статье будет рассмотрена ДГУПЧВ на базе повышающего широтно-импульсного преобразователя (ШИП).

### B. ДГУПЧВ на базе повышающего ШИП

Рассмотрим работу безтрансформаторной ДГУПЧВ на базе повышающего ШИП. Структура электростанции представлена на рисунке 1. ШИП повышает выпрямленное напряжение до уровня 700 В. Аккумуляторный блок (АБ) накапливает энергию при достижении уровня нагрузки менее 20–25 % или более 100 % от номинала отдает запасенную энергию на работу автономного инвертора напряжения (АИН). Исключение работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) при долевых уровнях нагрузки ниже 20 % необходимо для защиты двигателя от закоксовывания, так как закоксовывание может привести к детонации ДВС.

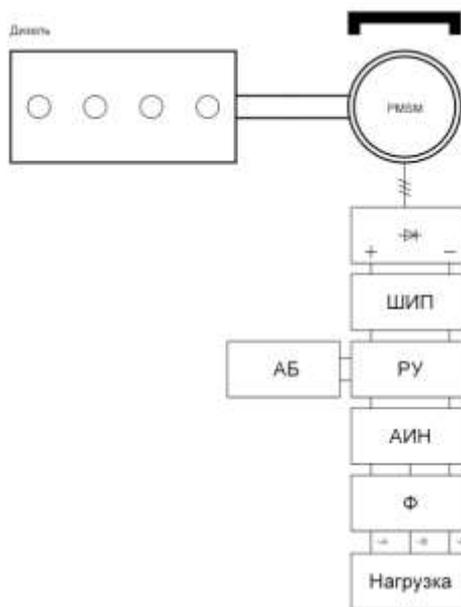


Рис. 1. Структурная схема ДГУПЧВ

Распределительное устройство отвечает за распределение отдаваемой мощности между синхронным генератором и аккумуляторами или возобновляемыми источниками энергии. АИН преобразовывает постоянный ток в трехфазный переменный с поддержанием качества электросети. Синус фильтр отсекает высшие гармоники и снижает несинусоидальные искажения напряжения.

### С. Моделирование ДВС

В качестве имитационной модели двигателя внутреннего сгорания взят блок Generic Engine MATLAB/Simulink. Тактико-технические характеристики ДВС приведены в таблице.

ТАБЛИЦА 1 ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВС

Мощность, кВт	Скорость вращения, об./мин	Удельное потребление топлива, г/(кВт*ч)
5000	750 – 1750	230

На рис. 2 представлена модель блока ДВС с системой управления.

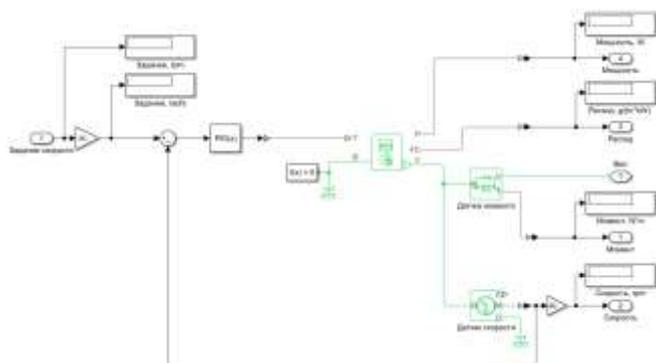


Рис. 2. Иммитационная модель ДВС

Подсистема получает на вход задание скорости, выходами подсистемы являются: вырабатываемая мощность в ваттах, расход топлива в г/(кВт\*ч), момент на валу в Н\*м, скорость в об/мин и порт, имитирующий механическую передачу к генератору. [2]

Для стабилизации частоты вращения используется дискретный ПИД регулятор с частотой обработки 5 кГц. Обратной связью для регулятора служит датчик скорости вращения двигателя.

Характеристики ДВС были верифицированы путем работы ДГУ с синхронным генератором на активную нагрузку. На рис. 3 представлен стенд, использованный для верификации.



Рис. 3. Нагрузочный стенд для верификации параметров ДВС

На дизель генераторной установке были намеренно отключены система поддержания частоты вращения и система управления возбуждением. Полученные характеристики были введены в модель ДВС, график зависимости расхода топлива от момента на валу при постоянной скорости вращения 1500 об/мин представлен на рис. 4.

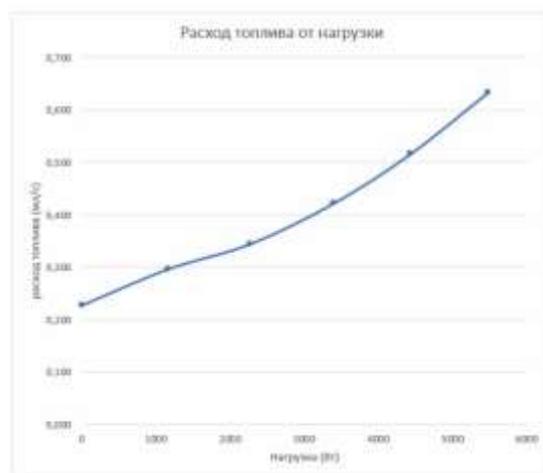


Рис. 4. Зависимость расхода топлива от потребляемой мощности

#### D. Повышающий ШИП

Повышающий ШИП преобразователь реализован на базе модели IGBT-транзистора и работает по следующему принципу. К источнику питания подключена последовательная цепочка из индуктивного накопителя энергии, диода и нагрузки с параллельно подключенным фильтрующим конденсатором. Коммутирующий элемент включен между индуктивностью с диодом и общей шиной. При открытом ключе ток от источника питания протекает через катушку индуктивности, в которой запасается энергия. Диод при этом закрыт, цепь нагрузки отключена от источника питания, ключа и накопителя энергии. Напряжение на сопротивлении нагрузки поддерживается благодаря запасенной на конденсаторе фильтра энергии. При размыкании ключа ЭДС самоиндукции суммируется с напряжением питания, запасенная энергия передается в нагрузку через открытый диод. Полученное таким способом выходное напряжение превышает напряжение питания. Управление транзистором осуществляется посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ). [3]

#### E. Имитационная модель АИН

Модель АИН представлена на рис. 5.

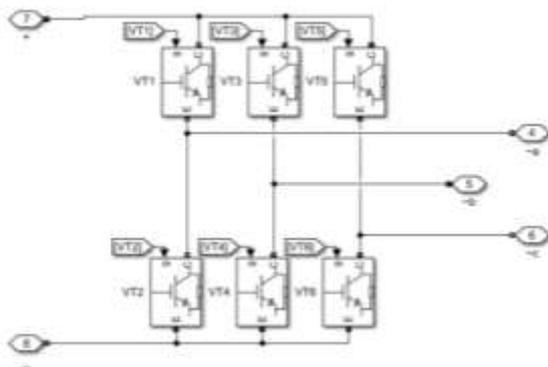


Рис. 5. Модель АИН

Модель АИН представляет собой трехфазную мостовую схему на базе стандартных блоков IGBT-транзисторов из библиотеки Power Electronics. К выходу АИН подключен синусофильтр. Измеряемая величина действующего значения фазного выходного напряжения ДГУПЧВ в качестве обратной связи поступает в систему управления ШИП.[4]

#### F. Имитационная модель нагрузки

Имитационная модель блока нагрузки изображена на рис. 5.

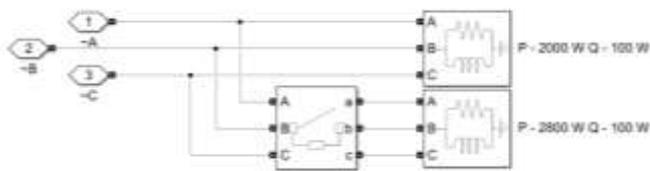


Рис. 6. Имитационная модель нагрузки

Модель нагрузки представляет из себя параллельную активно-реактивную нагрузку двух уровней. Первый –

2 кВт активной мощности и 100 Вт реактивной, второй – 2,8 кВт активной мощности и 100 Вт реактивной. Первый уровень нагрузки подключен всегда, второй является контролируемым и позволяет моделировать сброс и наброс дополнительной мощности.

#### G. Результаты моделирования ДГУПЧВ

В результате моделирования работы электростанции на нагрузку получены следующие результаты, представленные на рис. 7 и 8.

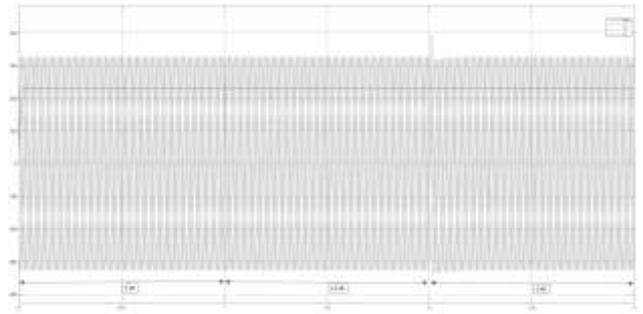


Рис. 7. График напряжений

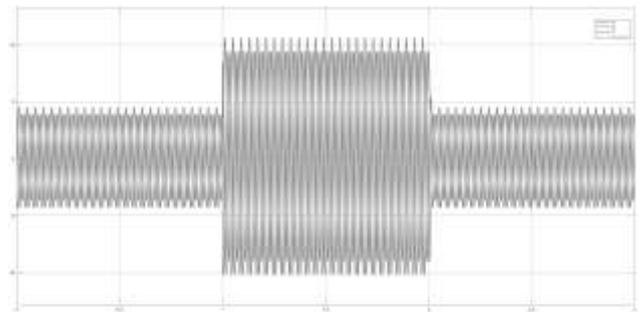


Рис. 8. График токов

### III. РАСЧЕТ ЭФФЕКТА ОТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ

#### A. Сравнительное моделирование с электростанций

Сравним классическую электростанцию и электростанцию на генераторе с переменной частотой вращения. Для расчета экономии дизельного топлива возьмем среднесуточную нагрузку на сеть. Среднесуточная нагрузка на сеть, это нагрузка, которую потребляет потребитель в течение суток усредненная за год. Профиль нагрузки представлен на рис. 9.

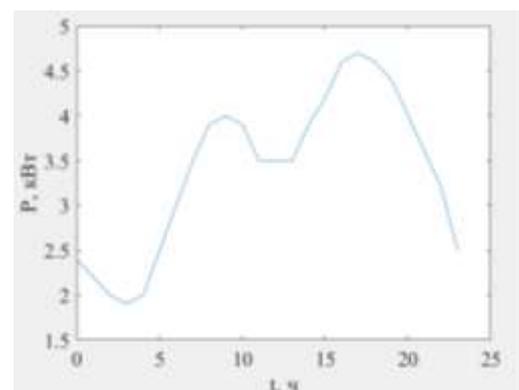


Рис. 9. Среднесуточная нагрузка на сеть

На основе математического моделирования электростанций была построена зависимость снижения потребления дизельного топлива относительно потребляемой мощности. В результате моделирования среднесуточного потребления дизельного топлива электростанции с «обычной» ДГУ и электростанции на ДГУ с переменной частотой вращения получены следующие результаты. Результаты представлены на рис. 10.

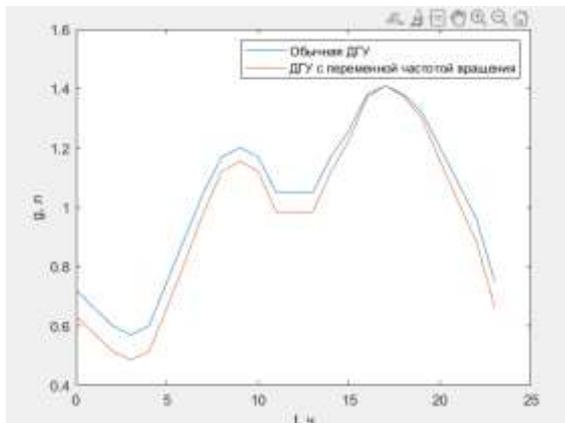


Рис. 10. Среднесуточное потребление

За счет применения дизель генераторной установки с переменной частотой вращения, экономится 1.4 литра дизельного топлива в день. За год экономия составит 513 литров, при общем потреблении обычной ДГУ 8924 литра. Экономия в процентном соотношении составляет 5.7 %.[5]

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаем благодарность ГУП «Ненецкая компания электросвязи» за предоставление тактико-технических характеристик электроэнергетической системы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Шакарян Ю.Г. Перспективы применения силовых полупроводниковых преобразователей в системах генерирования электроэнергии // Новые технологии, 1999, № 2.
- [2] Шипилло В.П. Автоматизированный вентильный электропривод. М.: Энергия, 1969. 400 с.
- [3] Воскобович В.Ю., Королева Т.Н., Павлова В.А. Электроэнергетические установки и силовая электроника транспортных средств. Изд-во Элмор. 2001. 384 с.
- [4] N. Patin, E. Monmasson, J.-P. Louis, Control of a stand-alone variable speed constant frequency generator based on a doubly-fed induction machine, in EPE Journal, Vol. 16, No. 6, pp. 37-43, Dec. 2006.
- [5] Шадрин Г.В. Экономический анализ: учебник для вузов. Из серии: Высшее образование (Юрайт). ISBN 978-5-534-14381-2.

# Алгоритм сбора и первичной обработки больших данных промышленных производств полимерных пленок

А. Н. Полосин<sup>1</sup>, Г. К. Платоненко<sup>2</sup>

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

<sup>1</sup>polosin-1976@mail.ru, <sup>2</sup>plag11@mail.ru

**Аннотация.** Предложен алгоритм формирования и первичной обработки массивов данных больших объемов для высокотехнологичных промышленных производств многоассортиментных полимерных пленок. Алгоритм настраивается на характеристики производства и интервал времени для анализа данных. Алгоритм включает сбор значений параметров производства, получаемых из разных источников и хранимых в промышленной базе данных (формирование массива неструктурированных данных), преобразование значений параметров из сервисных битовых кодов в вещественные числа, фильтрацию данных (удаление нулевых, пустых, дублирующихся значений параметров), структурирование данных по типам параметров, сохранение массива структурированных данных для последующего интеллектуального анализа с целью формирования советов по управлению качеством полимерных пленок. Тестирование программного обеспечения, реализующего алгоритм, выполнено по данным промышленного производства фармацевтических и пищевых упаковочных пленок за месяц при различных объемах массивов данных (от 4,95 до 39,6 млн. значений параметров). Результаты тестирования подтвердили работоспособность программного обеспечения и показали повышение скорости чтения, преобразования и записи данных за счет применения временных текстовых файлов, пакетного преобразования и записи. Интеграция программного обеспечения в компьютерную систему обработки промышленной информации для управления качеством пленок обеспечила запись массивов структурированных данных в базу данных контролируемых и вычисляемых параметров производства.

**Ключевые слова:** большие данные, алгоритмизация, базы данных, программное обеспечение, сбор данных, преобразование, фильтрация, структурирование данных, промышленное производство, полимерные пленки

## I. ВВЕДЕНИЕ

Жесткие полимерные пленки (ПП), более 50 % которых применяется в качестве упаковочных средств для фармацевтических препаратов и пищевых продуктов, изготавливаются непрерывным способом на производственных линиях (ПЛ), реализующих различные методы формования полимерных композиций (каландрование, плоскошелевая экструзия). ПЛ характеризуются множеством конфигураций технологического оборудования (экструдеров, каландров, съемно-вытяжных и охлаждающих устройств), обусловленным необходимостью выпуска широкого ассортимента продукции, к качеству (потребительским характеристикам – толщине,

равнотолщинности, внешнему виду, усадке, цвету) которой предъявляются весьма жесткие требования. Многостадийность, многотоннажность, энергоемкость производства, частые перенастройки ПЛ на новые типы ПП, наличие рециклов, обеспечивающих возврат отходов (раздробленных кромок ПП) в качестве вторичного сырья в производство, обуславливают необходимость цифровизации производственных систем (ПС). Важным направлением цифровизации промышленности является разработка и внедрение компьютерных систем (КС), позволяющих на основе обработки производственных данных (ПД) осуществлять прогнозирование показателей качества продукции, энергоресурсоэффективности (ЭРЭ) ПС и формирование советов по выбору управляющих воздействий (УВ) на основных стадиях производства, обеспечивающих требуемое качество и ЭРЭ ПС в регламентном режиме, при перенастройках на новые задания и в условиях нештатных ситуаций, связанных с отклонениями показателей качества за регламентные ограничения (брак) [1, 2]. Анализ трендов цифровизации промышленных производств показывает, что такие КС создаются на основе интеграции методов регрессионного анализа данных, искусственного интеллекта (машинное обучение, обработка экспертных знаний), математического моделирования процессов и визуализации данных [3, 4].

Особенностями данных производства ПП являются:

- большой объем и высокая скорость накопления (в зависимости от количества контролируемых параметров производства и интервала опроса датчиков на одной ПЛ за месяц работы генерируется от 2 ГБ до 100 ГБ ПД);
- разнообразие источников и типов (текстовые и числовые ПД, получаемые от системы формирования производственных заданий BDE, SCADA- и MES-систем, систем измерения толщины, цветовых характеристик, количества поверхностных дефектов различных типов – черных точек, включений нерасплавленного полимера, геликов, воздушных включений, дырок и др. – на заданной площади ПП);
- неструктурированный по типам параметров производства характер.

Указанные особенности существенно усложняют решение задачи обработки ПД. Кроме того, значения параметров производства (технологических параметров, показателей качества продукции), получаемые с датчиков, как правило, представляют собой сервисные

битовые коды, а не вещественные числа, что делает их непригодными для математической обработки в КС. Поэтому актуальна разработка и программная реализация алгоритма, который позволяет осуществить сбор ПД из различных источников, первичную обработку собранных ПД для формирования массива структурированных ПД, включающего вещественные значения параметров и характеризующегося отсутствием пустых, нулевых и дублирующихся значений параметров, а также запись этого массива ПД в базу данных (БД) контролируемых и вычисляемых параметров производства в составе КС для последующей обработки с применением методов математической статистики (регрессионный анализ) и интеллектуального анализа (искусственные нейронные сети, бустинг деревьев решений).

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Современные производства ПП характеризуются высоким уровнем автоматизации технологических процессов. Среда сбора параметров производства ПП позволяет получить информацию об объекте (ПД), включающую параметры производственных заданий, контролируемые технологические параметры процесса и показатели качества продукции, изготавливаемой на каждой  $l$ -й ПЛ завода, реализующей метод производства  $M_{\text{prod}}$  и имеющей конфигурацию  $S_{\text{PL}}$ . Каждое производственное задание, формируемое ВДЕ-системой, содержит рецептуру, толщину, ширину, длину, цвет ПП, требования к ее внешнему виду (количеству поверхностных дефектов) и номер заказа на изготовление. Набор контролируемых технологических параметров зависит от реализуемого метода производства. Например, при изготовлении неокрашенных ПП на экструзионно-каландровых ПЛ, как правило, измеряются: на стадии подготовки экструдата – частоты вращения шнеков экструдера и его загрузочного устройства, температуры тепловых зон корпуса экструдера и его формующей головки; на стадии формования экструдата в ПП – окружные скорости и температуры валков каландра, величина перекрещивания калибрующих валков и усилие контризгиба, приложенное к внешнему калибрующему валку; на стадии съема и фиксации структуры ПП – окружные скорости и температуры съемно-вытяжных и охлаждающих валков. Сбор первичной информации от датчиков технологических параметров осуществляется SCADA-системой. Основными показателями качества ПП являются толщина (источник информации – например, радиационный толщиномер), количество поверхностных дефектов различных типов (источник информации – например, система видеоконтроля поверхности OCS). При производстве цветных ПП дополнительно измеряются (например, спектрофотометром) цветовые координаты ПП.

ПД сохраняются в промышленной (заводской) БД, имеющей имя  $N_{\text{IDB}}$  и расположенной на одном из серверов вычислительной сети завода по адресу  $A_{\text{IDB}}$ .

Задача сбора и первичной обработки ПД заключается в следующем: для заданного номера ПЛ  $l$  и интервала времени анализа  $[t_0; t_K]$ , используя параметры подключения  $C = \{L_c, P_c, A_{\text{IDB}}, N_{\text{IDB}}\}$ , выполнить чтение неструктурированных ПД из промышленной БД и их сохранение в виде массива  $D_{\text{prod}}^0$ , преобразование и фильтрацию значений ПД с формированием массива  $D_{\text{prod}}^*$ , структурирование ПД по типам параметров и сохранение структурированных ПД в виде массива  $D_{\text{prod}}$ , запись массива  $D_{\text{prod}}$  в БД КС для долгосрочного хранения и последующей обработки математическими методами. Здесь  $L_c, P_c$  – логин и пароль для подключения к СУБД.

## III. АЛГОРИТМ СБОРА И ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Предлагаемый для решения поставленной задачи алгоритм (рисунок) включает следующие этапы:

- сбор неструктурированных ПД;
- преобразование, фильтрация и структурирование ПД;
- запись преобразованных, фильтрованных и структурированных ПД в БД КС обработки промышленной информации для управления качеством ПП.

На этапе сбора ПД осуществляется подключение к промышленной БД и чтение неструктурированных ПД (путем выполнения SQL-запроса к БД). Считанные ПД сохраняются в виде двумерного массива  $D_{\text{prod}}^0 = \{t_j, (P_{l,i,j})_{64}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m\}$ , где  $t_j$  – дата и момент времени измерения (записи),  $(P_{l,i,j})_{64}$  – значение  $i$ -го параметра производства на ПЛ с номером  $l$ , измеренное (записанное) в момент времени  $t_j$  и представляемое в виде сервисного битового кода (64-битного целого числа),  $n$  – число параметров,  $m$  – число моментов времени, попадающих в заданный интервал  $t_j \in [t_0; t_K]$ . Если объем считываемых ПД превышает миллион значений параметров, время чтения увеличивается нелинейно с ростом количества значений параметров. Для решения этой проблемы ПД сначала считываются во временный текстовый файл формата CSV, в каждой строке которого сохраняются значения момента времени  $t_j$  и сервисные значения всех параметров  $(P_{l,i,j})_{64}, i = 1, \dots, n$ , соответствующие этому моменту. Значения времени и параметров в строке отделяются друг от друга запятыми. Из временного файла ПД сохраняются в двумерном массиве  $D_{\text{prod}}^0$ . Результаты тестирования показали, что скорость чтения ПД при использовании временного файла увеличивается в 2 раза.

Массив сервисных значений параметров производства  $D_{\text{prod}}^0$  является входным для этапа первичной обработки ПД. Этот этап включает процедуры преобразования, фильтрации и структурирования ПД.

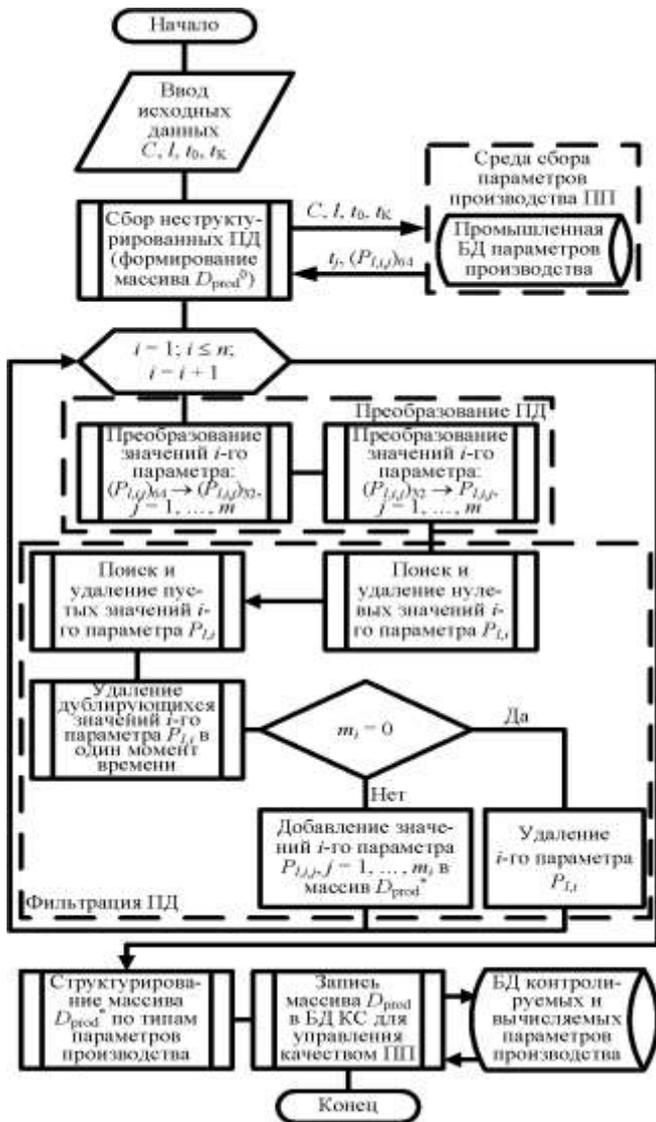


Рис. 1. Алгоритм сбора и первичной обработки ПД

Процедура преобразования ПД заключается в переходе от сервисных значений параметров к их вещественным значениям. Для этого реализуются следующие операции:

- преобразование 64-битного целого числа  $(P_{l,i,j})_{64}$  в 32-битное целое число  $(P_{l,i,j})_{32}$ , осуществляемое с помощью операции конъюнкции (логическое «И»), позволяющей отделить старшие 32 бита:

$$(P_{l,i,j})_{32} = (P_{l,i,j})_{64} \wedge \text{FFFFFFF}_{16}, j = 1, \dots, m,$$

где  $\text{FFFFFFF}_{16}$  – число в 16-ричной системе;

- преобразование 32-битных целых чисел  $(P_{l,i,j})_{32}$  в 32-битные вещественные числа  $P_{l,i,j}$ , выполняемое с помощью реинтерпретации области памяти.

Операции преобразования ПД применяются сразу к массивам  $\{(P_{l,i,j})_{64}, j = 1, \dots, m\}$ ,  $\{(P_{l,i,j})_{32}, j = 1, \dots, m\}$ , содержащим все значения каждого  $i$ -го параметра на интервале времени  $[t_0; t_k]$  (столбцам двумерного массива  $D_{\text{prod}0}$ ). Применение пакетного преобразования ПД позволяет существенно (в 6 раз) повысить скорость преобразования по сравнению с полным перебором,

когда каждое значение  $(P_{l,i,j})_{64}$ ,  $(P_{l,i,j})_{32}$  преобразуется отдельно.

В ходе фильтрации ПД реализуются операции:

- поиск и удаление нулевых значений каждого  $i$ -го параметра  $P_{l,i}$  (если в момент времени  $t_j$  параметр имеет нулевое значение  $P_{l,i,j} = 0$ , то оно удаляется из массива значений  $\{P_{l,i,j}, j = 1, \dots, m_i\}$ , а количество значений уменьшается на единицу:  $m_i = m_i - 1$  для первого удаления,  $m_i = m_i - 1$  для каждого следующего удаления);
- поиск и удаление пустых значений каждого  $i$ -го параметра  $P_{l,i}$  (если в момент времени  $t_j$  параметр имеет пустое значение, оно удаляется из массива, а количество значений  $m_i$  уменьшается на единицу);
- поиск и удаление дублирующихся значений каждого  $i$ -го параметра  $P_{l,i}$  (в качестве критерия для удаления используется совпадение моментов времени измерения и значений параметра, свидетельствующее об ошибке записи данных; одно из двух значений удаляется из массива, количество значений  $m_i$  уменьшается на единицу).

Если после фильтрации значений  $i$ -й параметр  $P_{l,i}$  не имеет ни одного значения ( $m_i = 0$ ), то он удаляется, а количество параметров  $n$  уменьшается на единицу. Это позволяет уменьшить объем используемой оперативной памяти и повысить быстродействие.

В результате преобразования и фильтрации формируется массив ПД  $D_{\text{prod}}^* = \{t_j, P_{l,i,j}, i = 1, \dots, n^*, j = 1, \dots, m_i\}$ , содержащий вещественные значения параметров, отличные от нуля и недублирующиеся. Здесь  $n^*$  – число параметров, имеющих значения ( $n^* \leq n$ ).

Структурирование ПД  $D_{\text{prod}}^*$  заключается в их разделении на три типа в соответствии с наименованиями параметров производства  $P_{l,i}$ :

- входные параметры  $X = \{X_s, s = 1, \dots, S\}$ , где  $s$  – номер основной стадии производства,  $S$  – количество стадий (количество и состав стадий формируются в зависимости от метода производства  $M_{\text{prod}}$ , реализуемого  $l$ -й ПЛ);
- УВ  $U = \{U_s, s = 1, \dots, S\}$ ;
- контролируемые выходные параметры  $Y^{\text{mes}} = \{Y_s^{\text{mes}}, s = 1, \dots, S\}$ .

Необходимость выделения контролируемых выходных параметров вызвана тем, что выходные параметры, которые не измеряются на конкретном промышленном производстве (как правило, показатели качества экструдата, разнотолщинность, степень усадки ПП), вычисляются в КС по математическим моделям, описывающим физические процессы, протекающие в агрегатах основных стадий производства [5, 6]. В результате формируется полный массив выходных параметров  $Y = \{Y^{\text{mes}}, Y^{\text{calc}}\}$ , включающий как измеренные  $Y^{\text{mes}}$ , так и вычисленные  $Y^{\text{calc}}$  параметры.

Правила структурирования параметров позволяют включить каждый параметр  $P_{l,i}$  в множество параметров одного из трех типов для соответствующей стадии. Так,

если параметр относится к характеристикам типа ПП  $T_{\text{film}}$  (например, рецептура), то он включается в вектор входных параметров каждой стадии: ЕСЛИ  $P_{l,i} \in T_{\text{film}}$ , ТО  $P_{l,i} \in X_s$ ,  $s = 1, \dots, S$ . Если параметр относится к управляющим параметрам  $s$ -й стадии производства, реализующего данный метод  $M_{\text{prod}}$ ,  $U_s^{M_{\text{prod}}}$ , то он включается в вектор УВ этой стадии: ЕСЛИ  $P_{l,i} \in U_s^{M_{\text{prod}}}$ , ТО  $P_{l,i} \in U_s$  (например, ЕСЛИ  $N \in U_1^{Mc}$ , ТО  $N \in U_1$ , где  $N$  – частота вращения шнека экструдера,  $s = 1$  – стадия подготовки экструдата при каландровом методе производства  $M_{\text{prod}} = Mc$ ). Если параметр характеризует качество ПП  $Q_s$ , сформированное на  $s$ -й стадии, то он включается в вектор выходных параметров стадии: ЕСЛИ  $P_{l,i} \in Q_s$ , ТО  $P_{l,i} \in Y_s^{\text{mes}}$  (так, ЕСЛИ  $\delta \in Q_2$ , ТО  $\delta \in Y_2^{\text{mes}}$ , где  $\delta$  – толщина ПП,  $s = 2$  – стадия формования экструдата в ПП при каландровании).

В результате этапа первичной обработки ПД формируется массив ПД  $D_{\text{prod}} = \{X_s, U_s, Y_s^{\text{mes}}, s = 1, \dots, S\}$ . На заключительном этапе алгоритма этот массив записывается в БД КС. Порядок записи ПД строго регламентирован: сначала записываются данные производственного задания, затем – значения УВ  $U_s$  и выходных параметров  $Y_s^{\text{mes}}$ . Требование к строгому порядку записи ПД обусловлено необходимостью привязки в БД значений УВ и выходных параметров к времени выполнения каждого задания. Этап реализуется путем выполнения SQL-запросов на запись массивов значений параметров стадий. Это позволяет существенно (в 5 раз) повысить скорость записи по сравнению с записью каждого значения, содержащегося в массиве  $D_{\text{prod}}$ .

Предложенный алгоритм настраивается на характеристики производства ПП (метод производства, источники ПД) и повышает экономичность выполнения процедур сбора, первичной обработки и записи ПД.

#### IV. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ

Алгоритм реализован в виде программного обеспечения (ПО) на языке Python. ПО включает модули сбора неструктурированных ПД, преобразования их значений в вещественные числа, фильтрации значений, структурирования параметров производства по типам, записи структурированных ПД в целевую БД, интерфейсы управленческого производственного персонала (для формирования задания на сбор и первичную обработку ПД) и администратора (для ведения БД параметров подключения к промышленной БД). Тестирование ПО выполнено по данным экструзионно-каландрового производства фармацевтических и пищевых упаковочных ПП на основе поливинилхлорида за месяц на заводе в Санкт-Петербурге. Промышленная БД реализована в СУБД PostgreSQL, целевая БД – в СУБД SQLite. Тестирование, проведенное при объемах массивов исходных ПД от 4,95 до 39,6 млн. значений 99 параметров производства, подтвердило работоспособность ПО и показало повышение его экономичности (существенный рост скорости сбора, первичной обработки и сохранения ПД) за счет применения временных текстовых файлов при чтении ПД из промышленной БД, пакетного

преобразования и записи ПД в целевую БД. С увеличением объема исходных ПД на 700 % общее время их чтения, первичной обработки и записи увеличивается на 321 % (с 33 с до 139 с) со скоростью роста, близкой к постоянной, то есть имеет место почти линейная зависимость времени от объема загружаемых и обрабатываемых ПД. В ходе фильтрации объем ПД уменьшается в среднем на 80 %.

Выполнена интеграция ПО в КС обработки информации для управления качеством ПП [7]. Это позволило автоматически пополнять БД КС подготовленными наборами контролируемых параметров, необходимыми для работы подсистем вычисления неконтролируемых показателей качества экструдата и ПП, интеллектуального анализа и визуализации ПД.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и программно реализован экономичный алгоритм сбора и первичной обработки ПД больших объемов, являющийся элементом КС обработки информации для управления качеством продукции промышленных производств ПП. ПО настраивается на метод производства ПП, конфигурацию ПЛ, источники ПД и позволяет, применяя к неструктурированным ПД процедуры преобразования, фильтрации значений и структурирования параметров, сформировать и сохранить в БД КС массив структурированных ПД, пригодных для дальнейшей обработки математическими методами с целью формирования советов по управлению качеством.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Мешалкин В.П., Бобков В.И., Дли М.И., Федулов А.С., Шинкевич А.И. Компьютеризированная система принятия решений по оптимальному управлению энергоресурсоэффективностью химико-энерготехнологической системы переработки отходов руд // Теорет. основы хим. технологии. 2021. Т. 55, № 1. С. 67-75.
- [2] Тетерин М.А., Чистякова Т.Б., Полосин А.Н. Интеллектуальная система для управления качеством в производстве полимерных пленок в нештатных ситуациях // Изв. С.-Петерб. гос. технол. ин-та (техн. ун-та). 2020. № 53. С. 65-79.
- [3] Kohlert M., König A. Advanced polymeric film production data analysis and process optimization by clustering and classification methods // Front. Artif. Intell. Appl. 2012. Vol. 243. P. 1953-1961.
- [4] Magnier R., Agassant J.-F., Bastin P. Experiments and modelling of calender processing for shear thinning thermoplastics between counter rotating rolls // Int. Polym. Proc. 2013. Vol. 28, № 4. P. 437-446.
- [5] Чистякова Т.Б., Полосин А.Н. Математические модели и программный комплекс для управления экструзионными процессами в гибких многоассортиментных производствах полимерных материалов // Вестн. Юж.-Урал. гос. ун-та. Мат. моделирование и программирование. 2019. Т. 12, № 4. С. 5-28.
- [6] Чистякова Т.Б., Куликов С.И., Полосин А.Н., Колерт К. ПО для управления толщиной каландрованных тонких материалов // Автоматизация в пром-сти. 2007. № 1. С. 8-11.
- [7] Чистякова Т.Б., Полосин А.Н., Тетерин М.А., Кляйнерт Ф. Компьютерная система обработки промышленной информации для управления производством многоассортиментных полимерных пленок // Междунар. науч. конф. по проблемам управления в технических системах. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. С. 231-234.

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Оценка параметров математической модели продольного движения в режимах динамического позиционирования с одновременной оценкой течения</i> Голиков Д. А. (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	3
<i>Колесная одометрия мобильного робота</i> Абрамов П. В., Богданова С. М., Бондарчук А. П., Келлер Е. А. (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	7
<i>Исследование биологической очистки на предприятии ИДАВАНГ Агро по моделям нитрификации, денитрификации и ASM1</i> Андреев А. В. (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	11
<i>Применение Agiso меток для управления перевернутым маятником</i> Братченко Л. С. Гаврилов Г. А. (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	15
<i>Структура веб-приложения формирования композиций полимерных материалов для вторичной переработки</i> Гончарова Т. С., Разыграев А. С. (Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)) .....	18
<i>Математическое моделирование роста опухоли</i> Графина О. А. (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	21
<i>Разработка цифрового осциллографа</i> Десятириков Ф. А., Саков Е. А., Дервянко В. Г., Зуев С. А. (Воронежский государственный университет) .....	24
<i>Сравнительный анализ решений для контейнеризации</i> Дибиров Г. М., Бабков И. Н., Ковцур М. М. (СПбГУТ им проф. М. А. Бонч-Бруевича) .....	27
<i>Разработка модуля отчетности информационной системы «Паспортизация» для сбора и унификации данных оборудования на атомных электростанциях</i> Кравченко Н. И., Иванов А. М. (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	30
<i>Методы автоматизации процесса оптимального планирования промышленных производств</i> Шашихина О. Е. (Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)) .....	33
<i>Математическое исследование и управление процессом роста злокачественной опухоли</i> Федотов П. Л. (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	36
<i>Аналитическое и имитационное моделирование в системе риск-ориентированного управления проектированием и использованием сложных организационно-технических объектов</i> Соколов Б. В., Щербакова Е. Е. (Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук) .....	39
<i>Исследование динамических характеристик для робототехнической системы</i> Зиганшина Л. А., Порохненко К. А. (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	43
<i>Система векторного управления активным выпрямителем напряжения</i> Колмагоров М. А., Доброскок Н. А. (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	47
<i>Программный комплекс для управления процессом плавки стали в кислородном конвертере с учетом экологических характеристик</i> Левинский И. В., Новожилова И. В., Чистякова Т. Б. (Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)) .....	50
<i>Критерий и алгоритм оптимального выбора ЭЦН с учетом главных факторов ускоренного износа и старения</i> Лапик О. И., Соловьев И. Г. (Тюменский индустриальный университет) .....	54
<i>Разработка методологии проектирования программного обеспечения инфокоммуникационных систем</i> Лившиц М. В. (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	58
<i>Синтез системы управления аппаратом воздушного охлаждения с применением численных методов моделирования</i> Львов М. А. (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	62
<i>Дизель-генераторная установка с переменной частотой вращения</i> Михайлов Д. П., Лукичев А. Н., Ким А. А., Гринишенина С. А. (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») .....	65
<i>Алгоритм сбора и первичной обработки больших данных промышленных производств полимерных пленок</i> Полосин А. Н., Платоненко Г. К. (Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)) .....	69



**[WWW.VAVILOVSCHOOL.ETU.RU](http://WWW.VAVILOVSCHOOL.ETU.RU)**

Кафедра автоматки и процессов управления  
197022, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д.5, лат. Ф, корп.1, пом. 1204  
+7 812 234-37-98 Shestopalov\_08@mail.ru

