

УДК 004.4'22

## **ПРИМЕНЕНИЕ UML-ДИАГРАММ И СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБЖИГА ОКАТЫШЕЙ\***

**А.В. МАРКОВ**

*630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, аспирант кафедры автоматики. E-mail: miviton3@gmail.com*

Описывается технология подготовки и обработки железорудных окатышей. Рассматривается технология обжига окатышей в обжиговой машине, включающая поэтапное прохождение окатышами зон сушки, подогрева, обжига, рекуперации и охлаждения. Для каждой из зон установлен определенный температурный режим. Строится модель зоны обжига печи с выделением типовых воздействий, выбирается управляющее, управляемое и возмущающее воздействие. Из статических характеристик находятся коэффициенты, необходимые для проектирования регулятора автоматизированной системы.

На основании диаграмм прецедентов, классов (7 классов) и объектов (15 объектов) проектируется часть ПО, отвечающая за статические свойства. Далее проектируется диаграмма деятельности с последующей трансляцией в соответствующую сеть Петри. После нескольких доработок сеть Петри способна моделировать задачу регулирования температуры в зоне обжига печи. При помощи системы переходов и коэффициентов, полученных ранее, осуществляется задача регулирования температуры. Система состоит из семи переходов, каждый из которых регулирует температуру в зависимости от отклонения от номинального значения. Приводится пространство состояний полученной сети Петри. По окончании проектирования сети Петри на диаграмму деятельности вносятся соответствующие изменения.

**Ключевые слова:** сети Петри, UML, обжиг окатышей, дерево достижимости, методика проектирования ПО, регулятор автоматизированной системы, регулирование температуры, объект управления

## **ВВЕДЕНИЕ**

Демонстрируется применение методики проектирования ПО при помощи UML-диаграмм и сетей Петри на примере технологического процесса (ТП) обжига железорудных окатышей, а именно поддержания температуры в зоне обжига печи. Опишем структуру предприятия подготовки железорудных окаты-

---

\* Статья получена 28 августа 2014 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию № 2014/138. Тема проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоёмких результатов интеллектуальной деятельности».

шей. Акционерное общество «ССГПО» – крупное горно-обоганительное предприятие, состоящее из нескольких карьеров по добыче железной руды, участка дробления и сухой магнитной сепарации, участка мокрой магнитной сепарации, участка по производству железорудных окатышей. На рис. 1 представлена схема цепи аппаратов производства концентрата и окатышей, начиная добычей руды и заканчивая отгрузкой готовой продукции. В технологии производства окатышей задействованы следующие основные сооружения: главный корпус, включающий отделение измельчения известняка и глины (бентонита), отделение окомкования, отделение обжига; корпус сортировки; корпус дробления известняка; шламовая насосная станция; склад готовых окатышей; крытый и открытый склады для компонентов шихты; погрузочные бункеры окатышей. Рассмотрим более детально процесс обжига железорудных окатышей.

## 1. ТЕХНОЛОГИЯ ОБЖИГА ОКАТЫШЕЙ

Одной из самых важных и сложных стадий по производству окатышей является их обжиг. Основная цель обжига – получение окатышей с оптимальными металлургическими свойствами: максимальное удаление серы и придание им прочности, обеспечивающее их транспортировку, перегрузку и плавку в доменных печах без образования больших количеств мелочи. Обжиг окатышей осуществляется на обжиговых конвейерных машинах типа ОК-108 и ОК-116 с полезной площадью 108 и 116 м<sup>2</sup>.

В процессе обжига окатыши проходят пять технологических зон: сушки, подогрева, обжига, рекуперации, охлаждения. В каждой зоне поддерживается определенный температурный и газовый режим. В качестве топлива на машине применяется природный газ с теплотворной способностью 8000 ккал/Н·м<sup>3</sup>. Для сжигания газа в горне сушки, подогрева и обжига установлены газовые горелки. Обжиговая машина оборудована бункерами, донной и бортовой постелью, укладчиком сырых окатышей роликового типа, вентиляторами ГД-20/500 производительностью 200 000 м<sup>3</sup>/ч. Донная и бортовая постель служит для предохранения паллет от перегрева и для создания условий равномерного обжига по высоте слоя окатышей. Укладка сырых окатышей на обжиговую машину является одной из важнейших технологических операций. От качества укладки сырых окатышей зависит равномерность газопроницаемости и тепловой обработки слоя, продолжительность службы колосниковой решетки паллет и качество обожженных окатышей. Сырые окатыши укладываются на донную постель укладчиками ПР-5-2000.

Наличие известняка в шихте приводит к образованию значительного количества шлакообразующих, находящихся в жидкоподвижном состоянии. Окатыши начинают спекаться между собой уже при температуре 1320 °С. Одним из средств для достижения максимальной производительности обжиговых

машин является обеспечение разряжения в вакуум-камерах зон сушки, подогрева, обжига и рекуперации в пределах 350...500 мм вод. ст., для чего необходимо поддерживать в хорошем состоянии уплотнения обжиговых машин, газовые тракты и тягодутьевые средства. Окатыши обжигают на обжиговых машинах типа ОК-108 длиной 54 м и шириной рабочей поверхности 2 м. Активная площадь этих машин составляет 108 м<sup>2</sup>, число паллет равно 136; скорость их движения может изменяться от 1 до 3 м/мин, толщина слоя окатышей на паллетах составляет примерно 300 мм.

Температура в горне технологических зон может изменяться в зависимости от массовой доли серы в концентрате и от требований к показателям прочности окатышей. Обжиговая машина ОК-108 представляет собой конвейерную печь. На рис. 2 показана схема газовоздушных потоков обжиговой машины. Конвейер состоит из тележек (паллет) с колосниками, на которые загружаются сырые окатыши для их сушки, обжига и охлаждения в процессе перемещения тележек. Конвейер проходит над 27 вакуумными камерами, сквозь слой окатышей дымососами сверху вниз продуваются продукты сгорания природного газа. Через последние 5-9 камер (камеры нагнетания) для охлаждения обожженных окатышей вдувается холодный воздух. Условно по технологическому назначению активная площадь машины подразделяется на зону сушки (5-7 вакуум-камер), зону подогрева (2-3 вакуум-камеры), зону обжига (6 вакуум-камер), зону рекуперации (4-6 вакуум-камер) и зону охлаждения (5-9 камер нагнетания).

Природный газ для обжига окатышей сжигают в горелках, размещенных с обеих сторон обжиговой машины над паллетами. В зоне сушки I над 3-, 4- и 5-й вакуум-камерами установлены инжекционные горелки. В зоне нагрева II и обжига III над 6-14-й вакуум-камерами установлены двухпроводные горелки. Продукты сгорания из зон сушки подогрева и обжига через слой окатышей и вакуум-камеры эвакуируются двумя дымососами 7 и 8 в дымовую трубу. Продукты сгорания, отсасываемые через шесть вакуум-камер из зоны рекуперации двумя параллельно включенными вентиляторами (5 и 6), подаются в зону сушки. Воздух, нагнетаемый в зону охлаждения вентилятором 4, проходя через слой окатышей, нагревается до 200...300 °С и подается включенными параллельно вентиляторами 2 и 5 к горелкам зоны подогрева и обжига для сжигания топлива.

Донная и бортовая области служат для предохранения паллет от перегрева и создания условий равномерного обжига по высоте слоя окатышей. Она состоит из обожженных окатышей, в которых содержание мелочи (класс 0-5 мм) не должно превышать 3,5 %. Высота слоя бортовой области должна быть равна высоте бортов паллет. Высота донной области устанавливается технологической картой (70 мм).



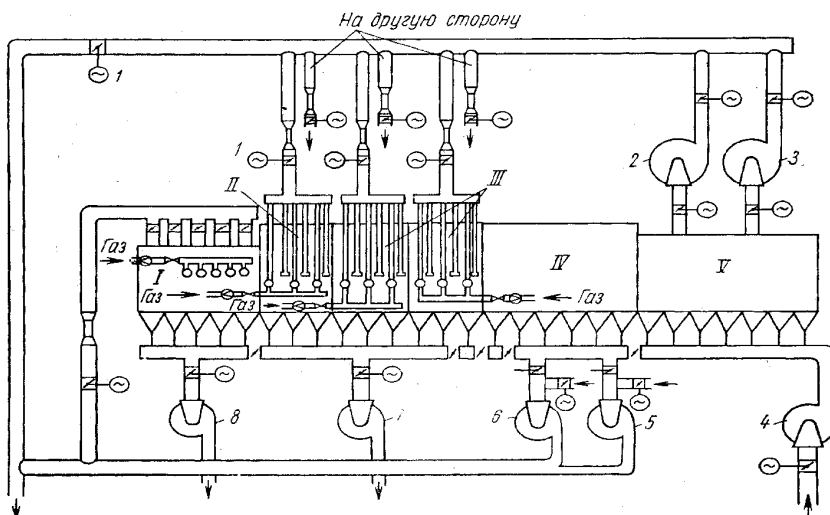


Рис. 2. Схема газовоздушных потоков обжиговой машины

*I* – зона сушки; *II* – зона подогрева; *III* – зона обжига; *IV* – зона рекуперации; *V* – зона охлаждения; 1 – исполнительный механизм с регулирующим органом; 2–8 – вентиляторы

Первой технологической зоной на обжиговой машине является зона сушки. Сушка окатышей производится комбинированным способом, при котором в первой части зоны (трех камер) теплоноситель, подаваемый вентиляторами из колпака зоны охлаждения, продувается через слой окатышей снизу вверх, во второй части теплоноситель с температурой 350...400 °С прокачивается через слой сверху вниз.

Второй технологической зоной на обжиговой машине является зона подогрева. Температура газа-теплоносителя в этой зоне достигает 700...1100 °С. В зоне подогрева в интервале 700...1000 °С происходит окисление магнетита в гематит. Степень окисления в зависимости от теплового режима достигает 60...80 %. В результате окисления, сопровождающегося рекристаллизацией магнетитовых зерен в гематитовые, происходит упрочнение окатышей. На выходе из зоны подогрева прочность окатышей достигает 100...160 кг/окатыш. При нагреве окатышей до 400...650 °С происходит удаление влаги и окисление пирита, образовавшийся при этом сернистый газ частично удаляется с отходящими газами. При нагреве окатышей до температуры 650...700 °С начинается диссоциация известняка с образованием твердого оксида магния и оксида углерода ( $\text{CO}_2$ ), удаляющегося с отходящими газами. При нагреве окатышей до 900...1000 °С идут процессы окисления магнетита, диссоциации

известняка, удаления остаточной влаги из слоя окатышей, а также десульфурации (частично). Скорость окисления офлюсованных известняком окатышей возрастает с увеличением температуры до 1150 °С, скорости фильтрации газотеплоносителя, содержания кислорода в нем и с уменьшением размера окатышей. Полученный в процессе разложения известняка оксид кальция начинает активно взаимодействовать с сернистым газом, образуя термически устойчивое соединение сульфата кальция ( $\text{CaSO}_4$ ). По этой причине активное удаление серы из окатышей начинается только при появлении железосиликатного расплава (при температуре 1150...1200 °С и выше), который поглощает кальций.

Из зоны подогрева окатыши поступают в зону обжига. Температурный режим в зоне устанавливается в соответствии с технологической картой для обжиговых машин (1250...1270 °С). В зоне обжига продолжается процесс окисления окатышей нижних слоев, идут процессы десульфурации и упрочнения. Наличие известняка в шихте приводит к образованию значительного количества шлакообразующих минералов, находящихся в жидкоподвижном состоянии, поэтому окатыши начинают спекаться между собой уже при температуре 1300 °С. Незначительное превышение температуры газа над слоем в этой зоне заметно влияет и на среднюю температуру всего слоя. Поэтому особенно важно выдерживать установленный температурный режим в зоне обжига. Нарушение его в ту или иную сторону ухудшает качество окатышей.

Максимальная температура в нижнем горизонте слоя достигается в зоне рекуперации, и она зависит от температуры слоя на выходе из зоны обжига. Температура в нижнем горизонте слоя на выходе в зону рекуперации должна быть равной 900...1000 °С. В зоне рекуперации магнетит окончательно окисляется, и сера выгорает в нижних горизонтах слоя.

В зоне охлаждения окатыши должны охлаждаться до температуры ниже 400 °С. Температура окатышей, разгружающихся с машины, зависит от температуры окатышей, поступивших в зону охлаждения, и от расхода подаваемого воздуха, подаваемого в него. Удельный расход воздуха для охлаждения окатышей должен составлять 2700...3200 м<sup>3</sup>/ч. Законченность процесса обжига контролируется по термопарам, установленным под паллетами в вакуум-камерах (температура должна быть 420...450 °С).

Температура окатышей, выдаваемых с обжиговой машины, зависит от причин, описанных ниже:

- от удельного расхода воздуха в зоне охлаждения и его температуры. Удельный расход воздуха, подаваемого вентилятором 4, необходимый для охлаждения окатышей до температуры на выходе из зоны охлаждения ниже 400 °С, составляет примерно 2700 м<sup>3</sup>/ч;

– от эффективности теплообмена между воздухом и окатышами в зоне охлаждения;

– от температуры окатышей, поступающих в зону охлаждения.

Затем окатыши поступают на участок сортировки, предназначенный для классификации окатышей по крупности. Кроме того, в функции этого участка входит отгрузка товарных окатышей потребителям и обеспечение обжиговых машин постелью. Основным технологическим оборудованием участка сортировки являются: грохот, классификаторы, средства непрерывного транспорта (пластинчатые и ленточные конвейеры). Детально описав процесс обжига окатышей в обжиговой машине, перейдём к моделированию работы обжиговой машины.

## 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ОБЖИГОВОЙ ПЕЧИ

**Обжиговая печь как объект управления.** Представим обжиговую печь как объект управления с управляющими воздействиями, управляемыми и возмущающими параметрами. Обжиговая печь представляет собой сложный динамический объект со множеством входных, выходных и режимных параметров. Кроме того, объект обладает большим числом рассредоточенных параметров. Блок-схема типовых воздействий технологического объекта управления выглядит следующим образом (рис. 3).

Управляющие воздействия:  $K$  – удельный расход воздуха на зону охлаждения,  $270...300 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $\Pi_r$  – удельная подача газа,  $525 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Управляемые параметры:  $T$  – температура: зона сушки ( $90...100^\circ\text{C}$ ), зона подогрева ( $900...1100^\circ\text{C}$ ), зона обжига ( $1200...1300^\circ\text{C}$ ), зона рекуперации ( $1000^\circ\text{C}$ ), зона охлаждения ( $< 400^\circ\text{C}$ );  $H$  – высота слоя окатышей,  $300 \text{ мм}$ ;  $L$  – прочность готовых окатышей на раздавливание,  $180...200 \text{ кг}$ ;  $M_{\text{Fe}}$  – массовая доля железа,  $66,4 \%$ ;  $W$  – влажность окатышей на выходе,  $0...3 \%$ .

Возмущающие параметры:  $\Pi_o$  – подача окатышей в обжиговую печь ( $102,9 \text{ т/ч}$ );  $V_n$  – скорость движения паллет ( $1,5 \text{ м/мин}$ );  $N$  – влажность материала на входе ( $9,5 \%$ );  $P$  – давление в зоне обжига ( $5...15 \text{ Н/м}^3$ ).

Представлена блок-схема типовых воздействий обжиговой машины, основными являются температура в зонах обжига печи, удельная подача газа, расход воздуха и подача окатышей.

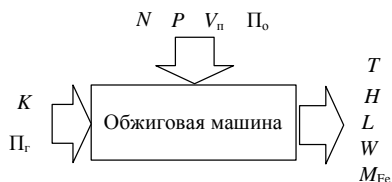


Рис. 3. Блок-схема типовых воздействий обжиговой печи

Обжиговая печь как объект автоматизации. Представим зону обжига печи объектом автоматизации – как самой важной и тяжелой для автоматизации зоны при обжиге железорудных окатышей. Управление технологическим объектом заключается во внесении таких управляющих воздействий, которые компенсируют возмущения и тем самым обеспечивают достижение цели управления технологическим объектом управления (ТОУ) в сложных производственных условиях. Для облегчения рассмотрения ТОУ как объекта автоматизации предлагается рассмотреть блок-схему типовых воздействий технологического объекта управления, которая изображена на рис. 4. В данной схеме управляющим воздействием будет удельная подача газа в зону обжига, выходной величиной – температура в зоне обжига печи, а возмущающим воздействием – подача окатышей.

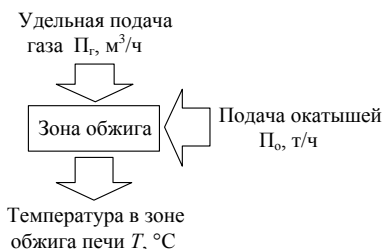


Рис. 4. Функциональная схема объекта управления САР поддержания температуры в зоне обжига печи

Максимальная удельная подача газа в зону обжига печи составляет  $1800 \text{ м}^3/\text{ч}$ , подача окатышей может быть  $86,3 \dots 105,15 \text{ т/ч}$ ; номинальной подачей окатышей является  $102,9 \text{ т/ч}$ , а подача газа  $525 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Температура в зоне обжига печи должна составлять  $1250 \text{ }^\circ\text{C}$  при удельной подаче  $525 \text{ м}^3/\text{ч}$ , подача окатышей должна составлять при этом  $102,9 \text{ т/ч}$ .

Модель объекта управления будет иметь вид

$$T = K \frac{P_g}{P_o}, \quad (1)$$

где  $T$  – температура окатышей в зоне обжига печи;  $K$  – коэффициент, характеризующий объект управления,  $\frac{^\circ\text{C} \cdot \text{т/ч}}{\text{м}^3/\text{ч}}$ ;  $P_g$  – подача газа,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $P_o$  – подача окатышей,  $\text{т/ч}$ .

Вычислим коэффициент, характеризующий объект управления (1):  $K = \frac{T \cdot P_o}{P_g}$ ;  $K = \frac{1250 \cdot 102,9}{525} = 245 \frac{^\circ\text{C} \cdot \text{т/ч}}{\text{м}^3/\text{ч}}$ ,  $T = 245 \frac{P_g}{P_o}$ .

Далее можем моделировать объект управления и построить статические характеристики температуры в зоне обжига печи по управлению и возмущению.



На рис. 5 изображено семейство статических характеристик по управлению – по удельной подаче газа, м<sup>3</sup>/ч.

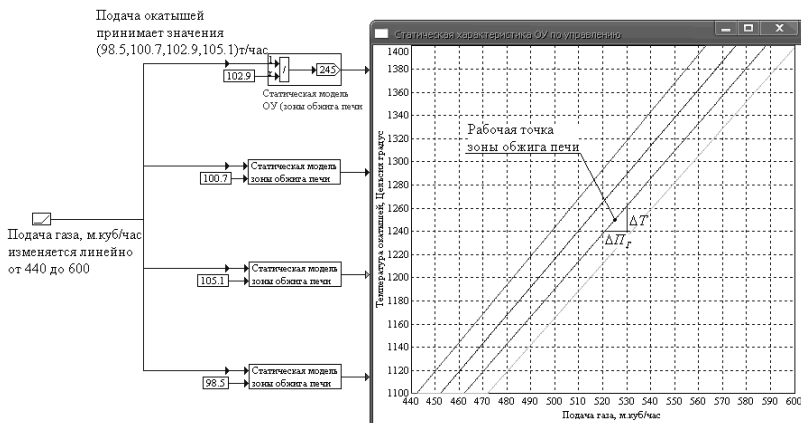


Рис. 5. Статические характеристики зоны обжига печи по управлению

Из полученных характеристик сделан вывод, что при увеличении подачи газа температура в зоне обжига увеличивается:

$$\Delta T = K_V \cdot \Delta \Pi_G, \quad (2)$$

где  $\Delta T$  – изменение температуры в зоне обжига печи, 21,5 °С;  $\Delta \Pi_G$  – изменение подачи газа, 9 м<sup>3</sup>/ч. Из формулы (2) находим

$$K_V = \frac{\Delta T}{\Delta \Pi_G}, \quad K_V = \frac{21,5 \text{ °С}}{9 \text{ м}^3/\text{ч}} = 2,38 \frac{\text{°С}}{\text{м}^3/\text{ч}}.$$

На рис. 6 изображено семейство статических характеристик по возмущению – подачи окатышей, т/ч.

Делаем вывод, что при увеличении подачи окатышей температура в зоне обжига уменьшается:

$$\Delta T = K_B \Delta \Pi_O. \quad (3)$$

Здесь  $\Delta T$  – изменение температуры в зоне обжига печи, 26 °С;  $\Delta \Pi_O$  – изменение подачи окатышей, 2 т/ч.

Из формулы (3) следует:  $K_B = \frac{\Delta T}{\Delta \Pi_O}, \quad K_B = \frac{26 \text{ °С}}{2 \text{ т/ч}} = 13 \frac{\text{°С}}{\text{т/ч}}.$

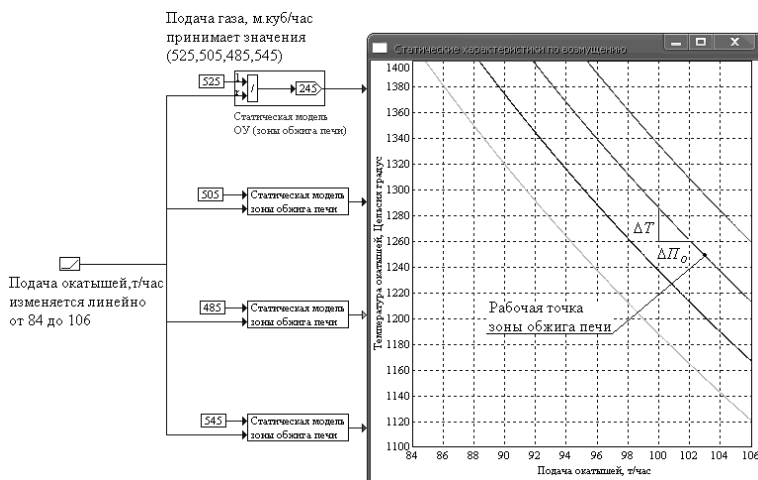


Рис. 6. Статические характеристики зоны обжига печи по возмущению

Таким образом, представлена функциональная схема поддержания температуры в зоне обжига печи, приведены статические характеристики зоны обжига печи по управлению и возмущению, найдены коэффициенты управления и возмущения для разработки системы автоматизации.

### 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБЖИГА ОКАТЫШЕЙ ПРИ ПОМОЩИ UML-ДИАГРАММ И СЕТЕЙ ПЕТРИ

Сложные технологические процессы принято моделировать, используя сильно специализированные программные пакеты. Работ, в которых для проектирования технологических процессов и систем используются нестандартные способы и технологии, почти не встречалось. Спроектируем обжиговую печь при помощи UML-диаграмм и аппарата сетей Петри.

Опираясь на модифицированную методику взаимного использования UML-диаграмм и сетей Петри, после словесного описания технологического процесса перейдем к проектированию диаграммы прецедентов.

На рис. 7 представлена диаграмма прецедентов, описывающая функционирование технологического процесса обжига окатышей. На данной диаграмме представлено три актера: администратор, сервис-инженер и оператор системы. Администратор может добавлять, изменять и удалять пользователей, просматривать их полный список, а также профиль каждого пользователя.

Сервис-инженер может просматривать свой профиль, а также устранять аварийные режимы, которые фиксирует оператор. Оператор следит за поддержанием температуры в зонах обжиговой машины, контролирует подачу газа и подачу воздуха. При необходимости оператор изменяет состояние задвижек (открытие/закрытие), отвечающих за подачу воздуха или газа. При возникновении аварийной ситуации и отсутствии автоматического закрытия задвижек оператор может в аварийном режиме изменить их состояние на закрытое, после чего сообщить об аварии для ее устранения сервис-инженером.

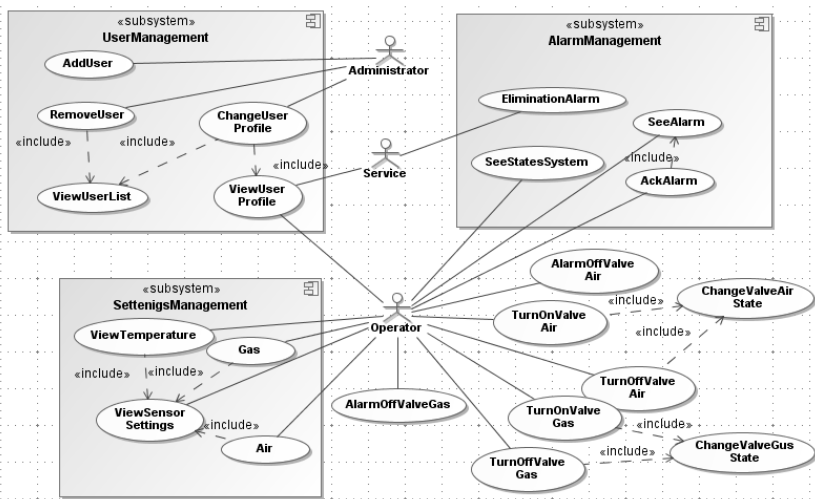


Рис. 7. Диаграмма прецедентов:

технологический процесс (ТП) обжига окатышей

Следующим этапом является проектирование диаграммы классов (рис. 8). На данной диаграмме представлено семь следующих классов: *Periphery* (данный класс отвечает за сбор значений различных датчиков), *SystemInputOutput* (система ввода/вывода предназначена для установления значений устройствам и вывода оперативной информации), *Calcar* (в обжиговой печи необходимо стабильно поддерживать нужную температуру), *Conveyor* (у конвейера поддерживаются следующие величины: скорость, высота слоя окатышей, подача окатышей), *Valve* (при помощи заслонок регулируется подача газа и воздуха для поддержания оптимальной температуры), *Sensor* (устройство, необходимое для установки значений), *System* (данный класс выполняет запуск и останов всего процесса).

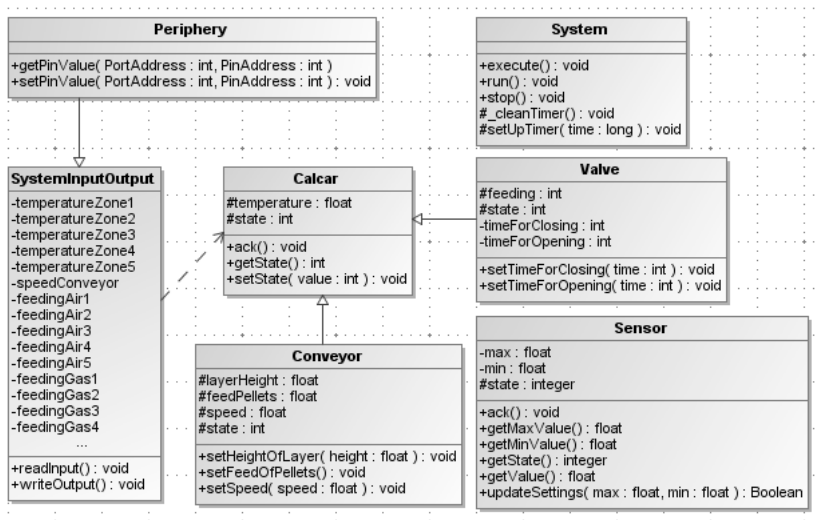


Рис. 8. Диаграмма классов ТП обжига окатышей

После создания диаграммы классов приступают к разработке диаграммы объектов (рис. 9), которая состоит из 15 элементов, описывающих каждую из зон обжиговой печи, конвейер, заслонки для подачи воздуха и газа. Одной из сложно управляемых зон в обжиговой печи является зона обжига, так как необходимо поддерживать температурный режим в пределах 1250...1270 °С, что весьма проблематично выполнять на всей площади обжиговой машины. Уделим большее внимание зоне обжига и рассмотрим ее динамические свойства.

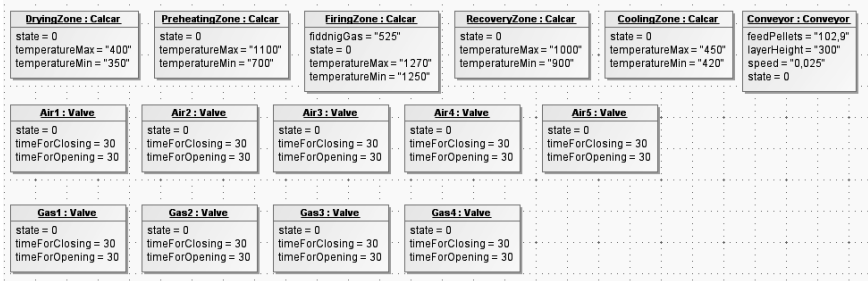


Рис. 9. Диаграмма объектов ТП обжига окатышей

Спроектировав статические аспекты системы, приступают к созданию диаграммы активности (рис. 10).

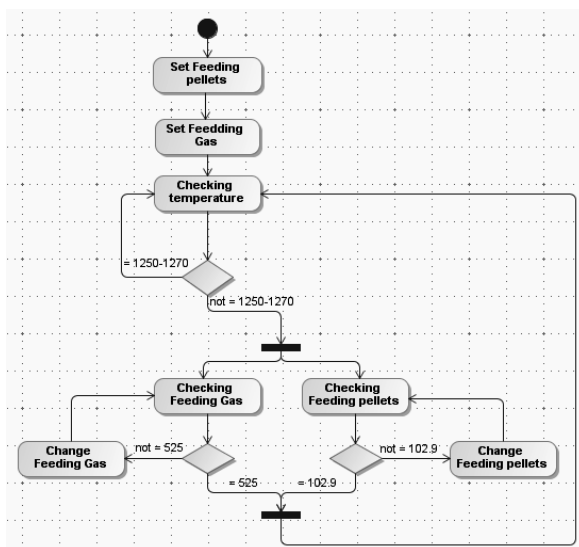


Рис. 10. Диаграмма активности ТП обжига окатышей (этап 1)

На данной диаграмме происходит проверка температуры в зоне обжига печи, которая должна соответствовать диапазону 1250...1270 °С. При оптимальной режиме работы процесс проверки температуры повторяется. При отклонении параметров температуры происходит проверка значений подачи газа и подачи окатышей. Если данные значения отклоняются от нормы, происходит их регулировка, после чего происходит измерение температуры и цикл поддержания заданных значений повторяется.

Поскольку язык UML не имеет формальных правил построения и проверки спроектированных диаграмм, полученную диаграмму транслируем в соответствующую сеть Петри. Полученная сеть Петри не отражает многих особенностей данного технологического процесса, по ней лишь можно отследить последовательность действий, проверки значений и при необходимости их исправления. Поэтому изменим сеть Петри и отразим все технологические процессы (рис. 11).

К переходу *Change corner* добавляется функция  $\frac{t1}{2,38}$ , которая высчиты-

вает подачу газу относительно температуры в зоне обжига печи. Коэффициент 2,38 получен из фактических номинальных данных:  $T = K \cdot \Pi_r$ ,

$K = \frac{1250}{525} = 2,38$ . К переходу *Interaction* тоже добавляется функция  $245,0 \frac{g}{p}$  согласно формуле (1).

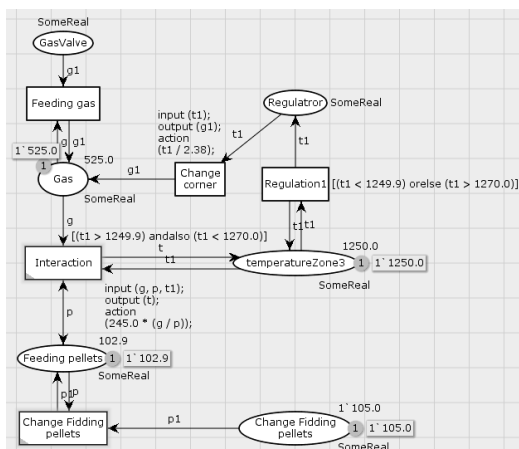


Рис. 11. Сеть Петри, соответствующая диаграмме активности ТП обжига окатышей (этап 1)

На втором этапе сеть выглядит следующим образом:

$P = \text{Temperature of Zone3, Gas, Feeding pellets, temperatureZone3,}$

$\text{Regulator, Change Fidding pellets, Checking1, Checking2 ;}$

$T = \text{Interaction, Regulation1, Regulation2, Change corner, Change,}$

$\text{Fidding pellets ;}$

$m_I = 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1$  .

На переходах добавляем вычисление функции времени<sup>1</sup> (рис. 12). Также введем приоритет на срабатывание перехода *Change corner\_n*, что способствует проверке возможности срабатывания данных переходов.

<sup>1</sup> Для того чтобы лучше воспринимать процесс моделирования времени в цветных сетях Петри, введем *реальное время* и *имитационное время*. Реальное время – время физического мира, в котором происходит моделирование с возможностью наблюдать за происходящим. Имитационное время только символизирует представление времени, которое может быть опционально добавлено к модели. Имитационное время инкрементирует число, которое является глобально доступным в исполняемой модели. Значение этого числа можно рассматривать в момент време-

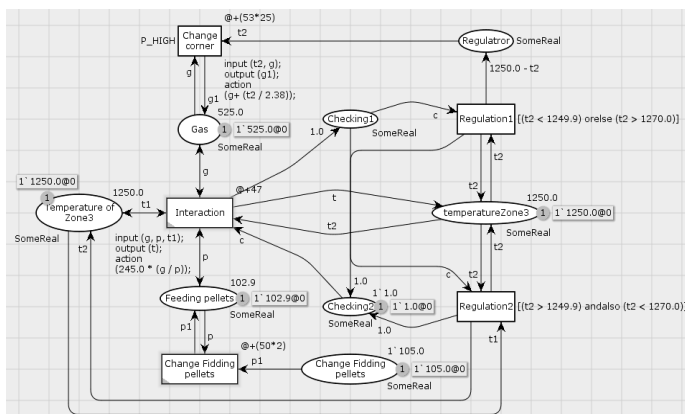


Рис. 12. Сеть Петри, соответствующая диаграмме активности ТП обжига окатышей (этап 2)

Функция перехода *Change corner* изменяется:  $g + \frac{t2}{2,38}$  с целью добавить

приращение подачи газа на необходимую величину для поддержания оптимального температурного режима.

На третьем этапе получаем сеть Петри (рис. 13), которая моделирует поддержание необходимого уровня температуры в зоне обжига печи. К сети добавляются шесть переходов *Change corner\_n*, для каждого из которых добавлено условие срабатывания. Поскольку в программное среде CPN Tools нет возможности добавить условие на время, разграничим температурное отклонение на несколько уровней:

$0;\pm 5$  ;  $\pm 5;\pm 10$  ;  $\pm 10;\pm 15$  ;  $\pm 15;\pm 30$  ;  $\pm 30;\pm 60$  ;  $\pm 60;\pm 100$  ;  $\pm 100;\pm 150$  .

К переходу *Change Fidding pellets* добавлено условие  $p1 > 94,9 \wedge p1 < 115,1$  , которое позволяет изменить возмущающее воздействие на систему в пределах номинальных значений подачи окатышей от  $94,4 \text{ м}^3$  до  $115,1 \text{ м}^3$ . При большей подаче окатышей может произойти завал конвейера, а при меньшем – выпекание железорудных окатышей даже при

ни, указанный в имитационном времени, при увеличении числа часы переводятся вперед на более позднее время. Единицы имитационного времени представляют конкретные единицы абсолютного времени – как микросекунды, так и тысячелетия, в зависимости от того, что мы моделируем, но синтаксически время – это просто число. Для краткости имитационное время иногда называют модельным временем.

номинальной подаче газа для данной подачи окатышей. При изменении подачи окатышей вне установленных пределов следует вывод о некорректности работы других систем обжиговой машины.

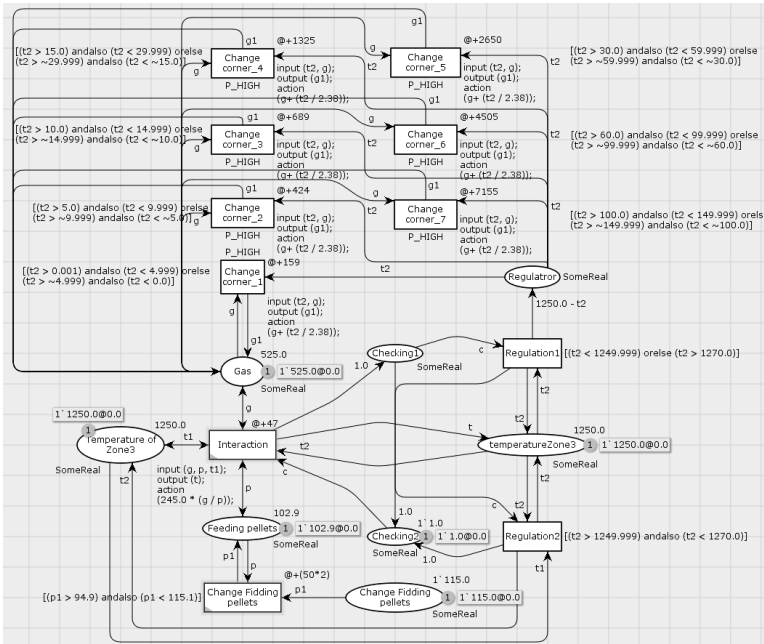


Рис. 13. Сеть Петри, соответствующая диаграмме активности ТП обжига окатышей (этап 3)

Пространство состояний данной сети содержит 32 вершины и 36 взаимосвязей, в сети нет мертвых переходов и заикливаний (рис. 14).

На рис. 14 приведены маркировки 1, 31 и 32 состояний. Поскольку в сети присутствует восемь мест, то для каждого состояния разметка содержит восемь пунктов. В названии маркировки первым указывается название страницы, на которой представлена сеть Петри, в данном случае *New\_Page*. Следующим представляется название места и фишки, соответствующие данному месту.

После незначительных изменений сеть Петри моделирует поддержание температуры в зоне обжига печи при возможном изменении величины подачи окатышей. Измененную сеть Петри преобразуем в UML-диаграмму активности (рис. 15).



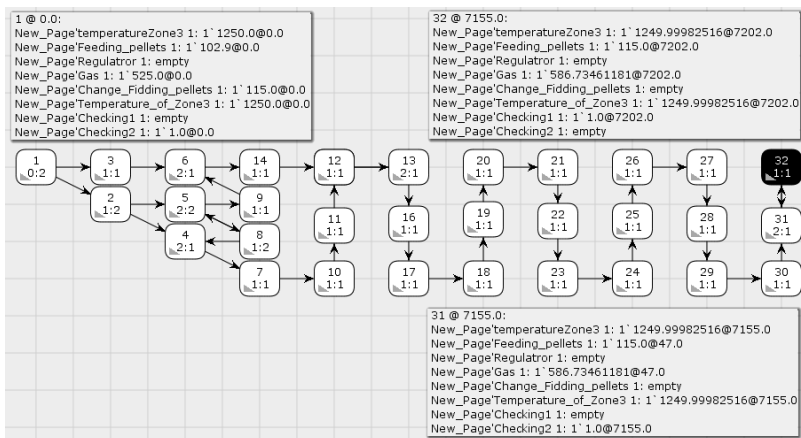


Рис. 14. Пространство состояний сети Петри ТП обжига окатышей

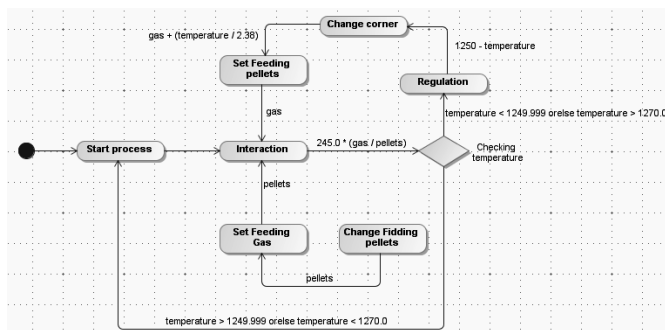


Рис. 15. Измененная диаграмма активности

После изменения диаграммы активности разработчик переходит к следующему этапу разработки программного обеспечения, а именно к написанию или генерации программного кода. Используя данную методику, разработчики ПО могут качественно спроектировать систему и избежать ошибок на более поздних этапах работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описана структура предприятия подготовки железорудных окатышей, перечислены основные стадии производства. Выделен и описан процесс обжига окатышей с детальным описанием характеристик каждой технологической зоны: сушки, подогрева, обжига, рекуперации, охлаждения. Для созда-

ния автоматизированной системы обжиговая машина была представлена как объект управления с выделением управляющих воздействий, управляемых и возмущающих величин. После зона обжига печи была представлена объектом автоматизации как наиболее важной и тяжело регулируемой стадией обжига окатышей. Построены статические характеристики по управлению и возмущению для расчета коэффициентов поддержания температуры и подачи газа. При помощи UML-диаграмм спроектированы статические и динамические свойства системы. Построены диаграмма прецедентов, классов и объектов, а также диаграмма активности, которая транслировалась в сеть Петри для проверки корректности построения. Анализ полученной сети показал, что необходимо добавить ряд условий и функций к переходам, что позволит контролировать температуры в зоне обжига при изменении подачи окатышей как возмущающего фактора. Переходы сети были нагружены имитационным временем с целью приблизить модель к реальным условиям. Диаграмма активности была изменена согласно полученной в несколько этапов сети Петри.

Таким образом, можно утверждать, что применение методики позволит спроектировать систему и проанализировать ее модель, что позволит найти возможные ошибки в логике модели и устранить их еще на этапе проектирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Питерсон Дж.* Теория сетей Петри и моделирование: пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
2. *Коротиков С.В.* Применение сетей Петри в разработке программного обеспечения центров дистанционного контроля и управления: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.11 / Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2007. – 216 с.
3. *Романников Д.О., Марков А.В.* Пример применения методики разработки ПО с использованием UML-диаграмм и сетей Петри // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 1 (67). – С. 175–180.
4. *Романников Д.О.* Разработка программного обеспечения с применением UML диаграмм и сетей Петри для систем управления локальным оборудованием: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.11 / Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2012. – 195 с.
5. *Марков А.В.* Разработка программного обеспечения при совместном использовании UML-диаграмм и сетей Петри: (обзор) // Сборник научных трудов НГТУ. – 2013. – № 1 (71). – С. 96–131.
6. *Воевода А.А., Романников Д.О., Зимаев И.В.* Применение UML диаграмм и сетей Петри при разработке встраиваемого программного обеспечения // Научный вестник НГТУ. – 2009. – № 4 (37). – С. 169–174.
7. *Коротиков С.В., Воевода А.А.* Применение сетей Петри в разработке программного обеспечения центров дистанционного управления и контроля // Научный вестник НГТУ. – 2007. – № 4 (29). – С. 15–32.

8. Воевода А.А., Марков А.В. Методика автоматизированного проектирования программного обеспечения функционирования сложных систем на основе совместного использования UML диаграмм и сетей Петри // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 2 (42). – С. 110–115.

9. Воевода А.А., Марков А.В., Романников Д.О. Разработка программного обеспечения: проектирование с использованием UML диаграмм и сетей Петри на примере АСУ ТП водонапорной станции // Труды СПИИРАН. – 2014. – Вып. 3 (34). – С. 218–231.

**Марков Александр Владимирович** – магистр техники и технологии по специальности «Автоматизация и управление» (аспирант кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета). Основное направление исследования – анализ UML-диаграмм и сетей Петри. Имеет более 30 публикаций. E-mail: muviton3@gmail.com

## Using UML-diagrams and Petri nets for designing software for firing pellets\*

**A.V. Markov**

*Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marks Avenue, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, postgraduate student of the department of automation. E-mail: muviton3@gmail.com*

Describes a technique for preparation and processing of iron ore pellets. The technology of firing pellets in a burning car, including the gradual passage of pellets drying zone, preheating zone, firing zone, recovery zone and cooling zone. Each zone is set a certain temperature. The model of burning zone of the furnace with the release of model effects, the control is selected, managed and disturbance. Using the coefficients of static characteristics are required for controller design of automated system.

With help of use case diagrams, class (7 classes) and objects (15 objects) designed piece of software that is responsible for the static properties. After, projected activity diagram, followed by a translation in the corresponding Petri net. After several improvements Petri net job of controlling temperature in the burning zone of kiln. Using the system and transitions coefficients obtained previously, temperature regulation occurs. Transition system consists of seven transitions, each of which controls temperature depending deviation from the nominal value. Given the state space of the resulting Petri net. Upon completion of the design of Petri net diagram activities shall be amended accordingly.

**Keywords:** Petri Nets, UML, firing pellets, tree of reachability, technique of designing software, controller of automated system, temperature control, control object

---

\* Received 28 August 2014.

## REFERENCES

1. Peterson J.L. *Petri net theory and the modeling of systems*. New Jersey, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1981. 288 p. (Russ. ed.: Piterson Dzh. *Teoriya setei Petri i modelirovanie*. Moscow, Mir Publ., 1984. 264 p.).
2. Korotikov S.V. *Primenenie setej Petri v razrabotke mnogopotchnogo programmnoho obespecheniya s ogranichennymi razdelyaemymi resursami na primere centrov distancionnogo upravleniya i kontrolya*. Diss. kand. tehn. nauk [The use of Petri nets in software development centers, remote monitoring and control. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2007. 216 p.
3. Romannikov D.O., Markov A.V. Primer primeneniya metodiki razrabotki PO s ispol'zovaniem UML-diagramm i setei Petri [Modification of the methodology of software development using UML diagrams and Petri nets]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science bulletin of Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 1 (67), pp. 175–180.
4. Romannikov D.O. *Razrabotka programmnoho obespecheniya s primenением UML diagramm i setei Petri dlya sistem upravleniya lokal'nym oborudovaniem*. Diss. kand. tekhn. nauk [Software development using UML diagrams and Petri nets for local control systems equipment. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2012. 195 p.
5. Markov A.V. Razrabotka programmnoho obespecheniya pri sovmestnom ispol'zovanii UML-diagramm i setei Petri (obzor) [Studies devoted to the development of software when used UML diagrams and Petri nets]. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU – Transaction of scientific papers of Novosibirsk state technical university*, 2013, no. 1 (71), pp. 96–131.
6. Voevoda A.A., Romannikov D.O., Zimaev I.V. Primenenie UML diagramm i setei Petri pri razrabotke vstraivaemogo programmnoho obespecheniya [An approach to the using UML and Petri nets for embedded software designing]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science bulletin of Novosibirsk state technical university*, 2009, no. 4 (37), pp. 169–174.
7. Korotikov S.V., Voevoda A.A. Primenenie setei Petri v razrabotke programmnoho obespecheniya tsentrov distantsionnogo upravleniya i kontrolya [Using Petri nets in software development of remote monitoring and control center]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science bulletin of Novosibirsk state technical university*, 2007, no. 4 (29), pp. 15–32.
8. Voevoda A.A., Markov A.V. Metodika avtomatizirovannogo proektirovaniya programmnoho obespecheniya funkcionirovaniya slozhnykh sistem na osnove sovmestnogo ispol'zovaniya UML diagramm i setej Petri [Methodology of computer-aided design software of complex systems based on combined use of UML diagrams and PETRI nets]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie – Modern Technologies. System analysis. Modeling*, 2014, no. 2 (42), pp. 110–115.
9. Voevoda A.A., Markov A.V., Romannikov D.O. Razrabotka programmnoho obespecheniya: proektirovanie s ispol'zovaniem UML diagramm i setei Petri na prime-re ASU TP vodonapornoj stantsii [Software development: software design using UML diagrams and Petri nets for example automated process control system of pumping station]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS proceedings*, 2014, iss. 3 (34), pp. 218–231.