

УДК 004.832.32; 65.011.55

DOI 10.52575/2687-0932-2024-51-2-453-465

Разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений на основе прецедентов для оперативного планирования сталеплавильного цеха

Полещенко Д.А., Коврижных О.А.

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
Россия, 309516, Белгородская обл., Старый Оскол, мкр. Макаренко, 42
E-mail: po-dima@yandex.ru, kovroles@mail.ru

Аннотация. Проблема, которая затрагивается в данной статье, касается оперативного планирования сталеплавильного производства. Представлен анализ производственного предприятия относительно системного подхода и применен ситуационный подход для решения задачи посменно-суточного планирования. Авторы предлагают ИСППР, предназначенную для оперативного планирования сталеплавильного производства. В условиях сталеплавильного производства были разработаны модели поиска прецедентов и эффективные системы продукционных правил, которые предоставляют возможность адаптировать найденные прецеденты к текущей ситуации с высокой точностью и скоростью. Сокращение времени простоя агрегатов и переналадки оборудования в течение рабочей смены благоприятно повышает производительность стали, обеспечивая дополнительный объем продукции.

Ключевые слова: оперативное планирование сталеплавильного производства, система поддержки принятия решений, прецедент, нейросетевая модель, планирование, оптимизация

Для цитирования: Полещенко Д.А., Коврижных О.А. 2024. Разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений на основе прецедентов для оперативного планирования сталеплавильного цеха. Экономика. Информатика. 51(2): 453–465. DOI 10.52575/2687-0932-2024-51-2-453-465

Development of an Intelligent System for Precedent-Based Decision Support of a Steelmaking Plant for Operational Planning

Dmitry A. Poleshchenko, Olesia A. Kovrizhnykh

Stary Oskol technological institute n.a. A.A. Ugarov (branch) NUST "MISIS"
42 Makarenko St, Stary Oskol, Belgorod region, 309516, Russia
E-mail: po-dima@yandex.ru, kovroles@mail.ru

Abstract. The problem presented in the article concerns the operational planning of steelmaking production. The analysis of the production enterprise of the system approach is presented and the situational approach is applied to solve the problem of shift planning. The authors present an intelligent decision support system designed for planning steelmaking production operations. In the conditions of steelmaking production, precedent search models and efficient systems of product rules have been developed, which provide an opportunity to adapt the found precedents to the current situation with high accuracy and speed. Reducing the time costs of unit downtime and equipment changeovers during a work shift favorably increases steel productivity, providing additional output.

Keywords: operational planning of steelmaking, decision support system, precedent, neural network model, planning, optimization

For citation: Poleshchenko D.A., Kovrizhnykh O.A. 2024. Development of an Intelligent System for Precedent-Based Decision Support of a Steelmaking Plant for Operational Planning. Economics. Information technologies. 51(2): 453–465 (in Russian). DOI 10.52575/2687-0932-2024-51-2-453-465

Введение

Сталеплавильный цех в качестве организационно-технической системы представляет сложную систему управления, объединяющую в себе плотно взаимосвязанные и взаимодействующие компоненты как в пространстве, так и во времени. Эти компоненты образуют интегративные характеристики цеха и работают совместно, позволяя достигать поставленные цели, то есть гарантируют выполнение программы в рамках заданных производственных ограничений.

В настоящее время возникает проблема в моделировании логических рассуждений, которые базируются на накопленном опыте в виде сменно-суточных заданий (ССЗ) вместе с соответствующими расписаниями, которые были использованы в производстве на протяжении многих лет. Эта проблема имеет огромное значение для повышения эффективности интеллектуальных систем поддержки принятия решений в реальном времени (ИСППР) в области производственного оперативного планирования. Важно отметить, что тема исследования актуальна, так как ИСППР способны использовать механизмы поиска решений на основе накопленного опыта в области сталеплавильного производства, что значительно сокращает время, затрачиваемое на разработку и корректировку производственных планов.

Анализ сталеплавильного цеха с применением системного подхода для получения полного представления о функционировании и возможностях

В процессе производства стали важным фактором, обеспечивающим регулярное производство стальной продукции в установленных количествах и наименованиях, является оперативное планирование, что отражено в работе [Kovrizhnykh, Tsukanov, 2020].

На основе анализа классических методов, а также методов искусственного интеллекта можно сделать вывод, что использование этих методов приводит к существенным ограничениям применительно к поставленной задаче. Важно учитывать технические нормы и условия производства, они существенно воздействуют на сроки составления производственного расписания и негативно сказываются на эффективности управления сталеплавильным производством.

Проанализированы возможности внедрения экспертных знаний в процесс разработки расписания сталеплавильного цеха. В рамках СППР предлагается сочетание математических методов и моделей для построения оптимального производственного расписания с учетом особенностей сталеплавильного процесса, а также опыта и знаний специалистов из службы планирования данного производства.

Система рассуждений на основе прецедентов представляет собой подробный анализ проблемы или ситуации, а также описание логически связанных действий, необходимых для ее решения. При использовании системы для решения новой проблемы происходит поиск аналогичных ранее возникших случаев, которые затем адаптируются для решения текущей ситуации. Адаптация предыдущего прецедента учитывает все особенности текущей проблемы или ситуации. Такая система выстраивает возможность решать текущие задачи на основе предыдущего опыта в решении аналогичных ситуаций.

Важно отметить, что при выборе прецедентов следует учитывать контекст текущей задачи и не просто копировать действия из других случаев. Разумное использование рассуждений на основе прецедентов значительно сокращает время, необходимое для решения сложных задач, и повышает эффективность решения проблем.

Применение ситуационного подхода к решению задачи составления производственного расписания

Применение ситуационного подхода к составлению производственного расписания является ключевым аспектом ситуационного управления в производственном цехе. Ситуация в этом контексте определяется объемом и характеристиками выпускаемой продукции, а также

составом и производительностью оборудования, используемого в процессе производства. Сталеплавильный цех обладает широким ассортиментом металлопродукции, различными технологическими маршрутами и пересекающимися транспортными и технологическими потоками. Данный объект металлургического предприятия осуществляет производство металлопродукции сериями и имеет жесткую организационную структуру с узкоспециализированными подразделениями, такими как печи, внепечная обработка и разливка. Применение ССЗ служит основой для выполнения заказов, связанных с подготовкой продукции, и позволяет эффективно составлять расписание работы производственного цеха.

Методика ситуационного анализа в сталеплавильном процессе заключается в выявлении типичных ситуаций и их объединении в модули, основанные на стратегиях управления и аналогичных действиях, которые руководящие лица принимают при возникновении подобных обстоятельств. Одной из главных задач этого метода является выявление ситуаций, возникающих в производственном процессе. Они анализируются и сравниваются с уже известными ситуациями, после чего разрабатывается план развития событий, который представляется в виде производственного плана.

При использовании ситуационного поиска решения учитываются следующие основные этапы: описание ситуаций, идентификация текущей ситуации на основе имеющихся в базе типовых ситуаций и выбор подходящего расписания из базы расписаний. Производственную ситуацию в цехе можно описать как совокупность состава социально-статистических задач и состояния технологических агрегатов, которые обеспечивают возможность реализации производственного расписания.

Перестроение производственных расписаний является крайней потребностью при возникновении экстренных изменений в сталеплавильном процессе, к которым относят: внезапное поступление срочных заказов, непредвиденные проблемы с поставками материалов и поломка важного производственного агрегата, обеспечивающего производственный технологический процесс и других причин. Таким образом, обеспечение выполнения расписания оказывается тесно связанным с текущим функционированием агрегатов. Анализ аналогичных ситуаций, для которых уже применялись эффективные производственные расписания, позволяет адаптировать предшествовавшие решения к новым обстоятельствам, минуя трудоемкий поиск уникальных выходов из каждой непредвиденной ситуации.

Выбор производственного расписания (ПР) основывается на совокупности технологических ситуаций согласно формуле 1:

$$\text{ПР} = \{S(t)\} | t_{\text{см}}, \quad (1)$$

где $S(t)$ – производственная ситуация, $t_{\text{см}}$ – продолжительность рабочей смены.

Каждое производственное расписание отличается в зависимости от уникальной ситуации на предприятии, которая характеризуется следующими наборами данных: плановый набор данных, соответствующий ССЗ и технологический, соответствующий состоянию агрегатов.

При разработке производственного расписания учитывается предыдущая производственная ситуация, которая была решена и воплощена в предыдущем производственном расписании. Как описывает [Pal, Shiu, 2004; Althof, Auriol, Barlette, Manago, 1995], прецедент включает в себя: описание проблемы, решение проблемы и результат применения этого решения. При анализе новой проблемы (текущего процесса) ищется похожий прецедент в качестве аналога, чтобы попытаться использовать его решение, возможно, адаптировав его к текущему случаю, вместо того, чтобы каждый раз искать решение заново [Городилов, 2010]. После обработки текущего случая он заносится в базу прецедентов вместе с его решением для возможного будущего использования [Варшавский, 2008].

Выбор подходящего расписания для текущего производственного состояния подразумевает аналитическое изучение множества параметров: конфигурацию технологического процесса, марки выплавляемой стали, рабочие характеристики оборудования сталеплавильного цеха, последовательность операций и транспортные

маршруты. Результат применения решения хранится в описании принятого решения, что дает возможность проанализировать и определить способ получения этого результата. Данный метод описания решений является существенным инструментом в исследовательской работе, поскольку он позволяет по-настоящему разобраться в сложных процессах и выявить влияющие на них факторы.

Авторы [Карпов, Юдин, 2007; Глухих, Никифоров, 2019; Кочкин, Кочкина, Голубкин, 2013; Кулида, 2012; Еремеев, Варшавский, Поляков, 2021; Иванов, Зубков, 2020; Варшавский, 2008; Иванов, 2020; Кушников, Богомолов, Иващенко, Селютин, Резчиков, Кушникова, Марков, 2023] представляют подход к прецедентам, охватывая их как древовидные структуры, семантические сети, концептуальные графы, фреймы, записи в базе данных, предикативные выражения, рисунки и элементы мультимедийной информации. Понятие прецедента, следовательно, охватывает описание прежней проблематики, решения данной задачи и результата, доказательства целесообразности использования подобных стратегий.

Язык ситуационного управления [Поспелов, 1986] представляет собой модификацию языка семантических сетей, который используется для описания ситуаций. С его помощью возможно представление общей ситуации согласно формуле 2:

$$S(t) = S_1 \& S_2, \quad (2)$$

где S_1 – описание ситуации по плановым показателям, S_2 – описание ситуации по технологическим показателям.

В этом случае ситуации представляются как некоторая совокупность по формулам 3 и 4:

$$S_1 = ((cr_1 N_1)(cr_2 V_1) \& (cr_1 N_2)(cr_2 V_2) \& \dots \& (cr_1 N_m)(cr_2 V_m)), \quad (3)$$

где c – марка стали, r_1 – имеет имя, r_2 – имеет объем, N – наименование марки стали, V – объем, $l..m$ – индексы, которые соответствуют номеру марки стали.

$$S_2 = ((br_1 D)(br_3 1)(br_4 L_1) \& (br_1 D)(br_3 2)(br_4 L_2) \& \dots \& (br_1 M)(br_3 6)(br_4 L_{17})), \quad (4)$$

где b – технологический агрегат (оборудование), r_1 – имеет имя, r_3 – имеет номер, r_4 – находится в состоянии технической готовности, $D(A, УП, УЦ, М)$ – наименование, которое обозначает ДСП (АКОС, УПА, УЦВС, МНЛЗ), $l..k$ – индексы, которые соответствуют порядковому номеру технологического агрегата, L – наименование, которое обозначает процент технической готовности.

Применение подобных структур в интерпретации описываемых контекстов является фундаментальным для устранения типичных неясностей, характерных для естественного языка. В контексте разрабатываемой системы стадии обобщения ситуаций: первоначально происходит слияние ситуаций в унифицированные категории (например, марки стали, относящиеся к одной группе и имеющие общий объем плавки). Затем принятие решений основывается на правилах вывода, использующих представленные данные. Далее при осуществлении ситуационного поиска решений затрагиваются этапы суммирования ситуаций (например, по маркам стали, принадлежащим одной группе и имеющим общий объем плавки) и принятия решений с использованием правил вывода.

Таким образом, имеется функциональная корреляция между наличием ситуации $S(t)$ и необходимостью принять решение g в соответствии с формулой 5:

$$S(t) \rightarrow g \quad (5)$$

Рекомендуется принять стратегию, основанную на анализе ранее возникших случаев, для создания ИСППР РВ. Система разрабатывалась с целью помочь ЛПР в определении оптимального графика работы в условиях текущей производственной ситуации. СС предлагает несколько вариантов производственного расписания, упорядоченных по степени их важности с учетом предпочтений, определенных критериями выбора. Несмотря на наличие упорядоченных выборов, окончательное решение сохраняется за действующим субъектом, которому предназначен совет.

В данном случае решаемая задача плохо формализована, следовательно, применяется механизм логического вывода, основанный на прецедентном подходе. С помощью данного метода система анализирует текущую ситуацию, и проводя аналогии с сохраненными в базе данных прецедентами, предлагает соответствующий совет.

Для анализа перемен производственных данных и расписаний применяют специализированные системы, опирающиеся на извлечение знаний из глубины архивов, используя инновационную методологию и экспертные оценки. Повышается эффективность выбранных решений за счет модификации алгоритмической базы, тесно коррелирующей с особенностями предметной деятельности.

Процедура решения задач в сталеплавильных предприятиях предполагает поиск пригодных прецедентов, что обуславливает разработку механизмов сопоставления новых ситуаций с ранее зафиксированными аналогами. Среди основных трудностей, сдерживающих эффективность систем определения прецедентов, стоит выделить проблемы отбора подходящих прецедентов и адаптации найденных решений. Именно эти препятствия обостряют необходимость в высококачественной адаптации методик с использованием авторитетных познаний специалистов и свежих архивных данных.

При поиске наиболее подходящих прецедентов для решения задачи часто прибегают к двум основным источникам информации: экспертному знанию и имеющимся архивам данных. Для получения полезной информации был проведен тщательный анализ многолетних расписаний сталеплавильного цеха, а также объема производственных данных. Полученное решение требует адаптации, которая осуществляется через использование знаний о предметной области и разработку новых алгоритмов на базе существующих данных.

При изучении процесса вывода на основе прецедентов можно выделить несколько этапов, образующих цикл логического рассуждения на основе применения аналогичных случаев. Циклическое усовершенствование подхода на основе прецедентов, известное как СВР-цикл, устремлено к ассимиляции актуального опыта для последующей операционной применимости.

Моделирование системы для поиска и адаптации подходящего прецедента является важным этапом при разработке производственного расписания. Необходимость нахождения максимально похожего прецедента выражается в значимости соответствия прецедента и его расписания. Обозначим прецедент общего вида в виде вектора, который будет состоять из элементов, содержащих значения массы для определенных групп марок стали и процент технической готовности агрегата. Это можно выразить формулой 6:

$$A_i = (V_1, \dots, V_h, L_1, \dots, L_k), \quad (6)$$

где A_i – вектор, который хранит информацию о ССЗ, i – номер вектора, V_h – вес выплавляемой стали, которая входит в определенную группу марок стали, $1..h$ – номер группы марки стали, L_k – процент технической готовности агрегата, $1..k$ – индексы, которые соответствуют порядковому номеру технологического агрегата.

Интеллектуальное исследование неявно классифицированных информационных векторов, находящихся в базе знаний системы, требует использования методов, не предполагающих наличия заранее установленных классовых принадлежностей. В частности, алгоритмы машинного обучения представляют собой очень эффективный инструмент для анализа данных. Они способны постепенно повышать точность своих результатов и расширять свои возможности. В контексте решения задачи анализа данных существует подход, называемый «обучение без учителя» или *unsupervised learning*. Он заключается в обработке данных, которые не содержат предварительной информации о классах или категориях, к которым они принадлежат. В рамках обучения без учителя можно использовать различные методы, такие как ассоциация, кластеризация, уменьшение размерности и нейросетевое обучение.

Однако в производственной среде методы уменьшения размерности не являются наиболее подходящими для нахождения максимально похожих субъектов,



структурированных данных в базе знаний с текущим объектом. Это обусловлено тем, что вектор, который представляет субъект, содержит равнозначные компоненты и отражает показатели загрузки агрегатов и объема выплавки по маркам стали. В таких случаях требуется применять более специализированные методы для достижения требуемой цели.

Ассоциативные правила, выработанные на базе производственных директив, подчас не имеют высокой точности в связи с тем, что формирование указанных заданий складывается под влиянием текущих заказов и ограничений экономического и производственного характера. Постоянное изменяющееся влияние этих заказов и ограничений делает процесс создания ассоциативных правил особенно запутанным.

В условиях, когда анализируется массив из свыше 10 000 прецедентов, целесообразность применения кластеризационных методов подчёркивается острой необходимостью классификации данных для упрощения пространства поиска и ускорения процесса выявления, требуя распределения данных без предварительно установленных меток и определения количества кластеров. Для эффективной оценки сходства между двумя векторами возможно применение разнообразных алгоритмов оценки расстояния, которое является ключевым в данном контексте анализа данных. Манхэттенский метод вычисления расстояния выделяется как наиболее адекватный, благодаря его способности детально фиксировать даже минимальные отклонения между заданными векторами.

Кластеризация является одной из ключевых техник без учителя в области машинного обучения, представляющая собой алгоритмическую группировку схожих наблюдений в наборе данных на основе определенной метрики. Это мощный инструмент, позволяющий автоматически выявлять группы данных, которые обладают схожими свойствами или характеристиками. Кластеризация играет важную роль в анализе данных, позволяя выделить внутреннюю структуру и закономерности в исследуемых данных.

Тестирование эффективности методик на модели, обученной предварительно, осуществляется посредством анализа набора, включающего тысячу элементов-векторов ССЗ, аналогичных тем, что были использованы в обучении. В ходе классификации элементов обучающего вектора в различные кластеры осуществлялась последующая оценка точности идентификации каждого вектора внутри полученных кластеров, а также проверка его отличия от векторов, относящихся к другим кластерам. Для количественной оценки точности применяемого метода применяется математическое выражение, обозначаемое как формула 7:

$$F = \frac{e}{o} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где e – количество векторов ССЗ, определенных в правильные кластеры, o – количество тестовых векторов.

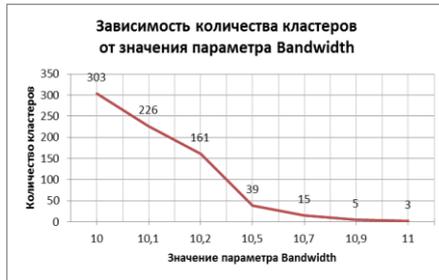
На рис. 1 показано, что результат использования метода K-means не превосходит 64,4 %, что представляет собой сравнительно малый показатель для решаемой задачи. При сравнении скорости работы алгоритмов MeanShift и K-means можно заметить, что производительность первого напрямую зависит от настройки параметра пропускной способности. Это приводит к тому, что метод MeanShift работает значительно медленнее, чем K-means в процессе кластеризации. Для эффективного выполнения поставленной задачи критически важно обеспечить высокую скорость работы алгоритма. Стремительность поиска подходящего прецедента напрямую влияет на скорость построения нового расписания и сокращение временных издержек. Таким образом, уменьшение времени, затрачиваемого на поиск, приводит к более оперативному выполнению поставленных задач. При увеличении количества кластеров метрика качества метода BIRCH начинает ухудшаться, но наибольшее значение 93 % достигается при 10 кластерах. Из-за недостаточно высокого качества применения части рассмотренных методов кластеризации, а также требования больших временных затрат на этапах определения ближайшего вектора и обучения, они не могут быть использованы для решения поставленной задачи. Некоторые методы остаются неприменимыми в данном контексте.



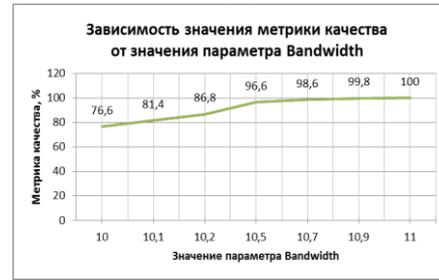
1.1.



1.2.



1.3.



1.4.

Рис. 1. Результаты метрик качества применения методов: 1.1. – K-means; 1.2. – BIRCH; 1.3. – Mean Shift (значение параметра Bandwidth задано для количества кластеров); 1.4. – Mean Shift (значение параметра Bandwidth задано для значения метрики качества)
 Fig. 1. Results of method application quality metrics: 1.1. – K-means; 1.2. – BIRCH; 1.3. – Mean Shift (Bandwidth parameter value is set for the number of clusters); 1.4. – Mean Shift (Bandwidth parameter value is set for quality metric value)

Кластеризация в сложных производственных процессах может быть выполнена с использованием конкурентных нейронных сетей и семейства алгоритмов ART. Главной отличительной чертой конкурентной нейронной сети является необходимость обладать информацией о точном числе кластеров, что затрудняет процесс в условиях разнообразных векторов. Однако, благодаря возможности адаптации и самоорганизации, конкурентные нейронные сети способны автоматически определить оптимальное количество кластеров, основываясь на внутренней структуре данных. Это повышает эффективность и точность проведения кластеризации, снижая необходимость пользовательского вмешательства в процесс. В итоге применение алгоритмов ART в производственных процессах способствует более надежному и автоматизированному анализу и классификации данных.

Исключительное преимущество нейронных сетей семейства ART заключается в их способности формировать кластеры по заданным критериям сходства без необходимости знания точного количества кластеров. Это позволяет автономно исследовать и группировать данные, обеспечивая гибкость и эффективность алгоритма.

ART-2 является отличным решением для выполнения задачи, поскольку она способна кластеризовать и осуществлять идентификацию информации различных типов без необходимости предварительной обработки. В процессе практической эксплуатации нейросеть не нуждается в жестком разделении на этапы обучения и практики, она способна постоянно улучшать свои навыки. В условиях производственного процесса, при неопределенности и изменчивости, наилучшее качество кластеризации образов достигается благодаря такому подходу.

Сеть ART-2 обладает только одним слоем нейронов в своей структуре. Количество выходных значений не фиксировано и зависит от степени совпадения нового входного вектора с существующими кластерами, количество входных переменных соответствует числу значений в векторе ССЗ. Схема нейронной сети ART-2 изображена на рисунке 2. При достижении критического порога происходит образование нового кластера, что приводит к

увеличению общего числа кластеров, взаимосвязанного с подобностью всех совместно структурированных зон.

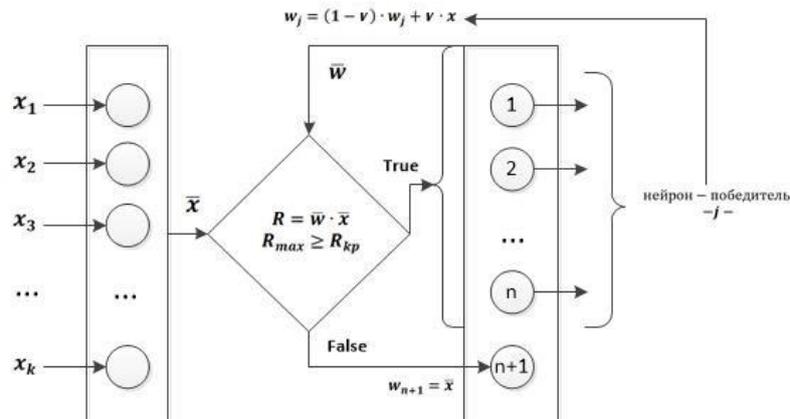


Рис. 2. Схема работы нейронной сети ART-2
 Fig. 2. Schematic diagram of the ART-2 neural network

В процессе работы нейронная сеть проходит через два этапа: инициализация и кластеризация. Параметры нейронной сети определяются экспериментально на первом этапе работы.

Элементы вектора ССЗ и кластера группируются в зависимости от их сходства после применения зависимости для оценки величины сходства $R_{кр}$. Чем выше $R_{кр}$, тем сильнее сходство элементов. Для определения степени схожести между вектором ССЗ и кластером используется статистическая зависимость, где более высокое значение $R_{кр}$ означает более сильную схожесть элементов вектора ССЗ и кластера. После этого осуществляется процесс кластеризации, в ходе которого элементы группируются в различные категории в зависимости от степени их схожести. Путем такого исследования разных вариантов значений параметра схожести определяется наиболее подходящий вариант.

Путем проведения исследования разных вариантов для значения параметра сходства $R_{кр} \in [0,1; 1,3]$ и скорости обучения $v \in [0,1; 1]$ с шагом 0,1 было выявлено, что оптимальные результаты достигаются при определенных значениях этих параметров. Например, значения параметра сходства $R_{кр} \in [0,1; 0,8) \cup (0,9; 1,3]$ не обеспечивают оптимальной близости между векторами, и это означает, что каждый вектор представляет собой свой собственный кластер. Путем эксперимента было установлено, что лучшее качество работы ART-2 достижимо при $R_{кр} = 0,9$ и $v = 0,1$.

Все векторы ССЗ были приведены к нормализованным значениям переменных в диапазоне от 0 до 1, чтобы обеспечить единичную сумму квадратов элементов каждого вектора, согласно формуле 8:

$$\hat{x}_i = \frac{x_i}{\sqrt{\sum_{p=1}^M x_p^2}}, \quad (8)$$

В процессе кластеризации нейронная сеть принимает входную последовательность векторов, где каждый из них представляет элемент множества из ССЗ. Чтобы определить степень сходства каждого вектора с уже существующими классами, применяется формула 9.

$$R_j = \sum_{i=1}^M w_{ij} \hat{x}_i, \quad (9)$$

где M – длина вектора ССЗ, w – весовые коэффициенты, \hat{x}_i – нормированные значения вектора.

Затем осуществляется выбор кластера с определенным номером j , который обладает наибольшей степенью сходства согласно формуле 10:

$$R_{\max} = \max_{j=1, K} (R_j), \quad (10)$$

В момент, при котором условие $R_{max} < R_{кр}$ выполняется, говорят, что входной вектор не совпадает ни с одним из кластеров, тогда создается новый нейрон, представляющий собой кластер, в котором весовые коэффициенты приравниваются к элементам нормированного вектора \hat{x} .

Иначе, если выполняется другое условие $R_{max} \geq R_{кр}$, можно считать, что входной вектор имеет максимальную схожесть с кластером j . В этом случае весовые коэффициенты соответствующего нейрона будут пересчитаны согласно формуле 11:

$$w_{ij} = (1 - v)w_{ij} + v\hat{x}_i, \quad (11)$$

где v – скорость обучения.

После этапа инициализации нейронная сеть обрабатывает вновь поступившие векторы, содержащие информацию о сменах и заданиях. Алгоритм обрабатывает данную информацию по мере поступления векторов.

Производственное расписание, выполняемое во время смены, может быть изменено в связи со сбоями в работе, вызванными, например, поломками оборудования, возникновение новых срочных заказов и других неожиданных событий. В таких случаях, когда возникают незапланированные события, необходимо внести изменения в уже составленное расписание. Природа изменений зависит от того, насколько относительно смены расписание было выполнено на момент появления незапланированной ситуации, повлиявшей на нормальный ход расписания, и, следовательно, какие работы уже выполнены и не требуют перераспределения. Электросталеплавильный цех представляет собой сложное техническое сооружение, в которых взаимосвязанные производственные объекты используются для плавки стали с помощью электродуговых печей, главная цель такого процесса – получение прочной и качественной литой заготовки на последующих этапах.

В ССЗ сталеплавильного производства указывается номер производственного заказа, наименование требуемой марки стали с соответствующим кодом. Рассмотрим представленный элемент типичного примера ССЗ в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Фрагмент данных ССЗ (от 14.09.2021/1)
Fragment of daily shift assignment (from date 14.09.2021/1)

Номер производственного заказа	Наименование марки стали	Код марки стали	Нормативно-техническая документация выплавки	Порядковый номер МНЛЗ	Количество планируемых плавков	Для особых отметок
760351 002	09Г2С	2314	51-1082/15	2-3-4	1	с 14.09
790141 001	Э76Ф	3476	51-1523/17	2-3-4	8	
760366 013	20Х	4206	51-0130/13	2-3-4	4	
500504 001	3961	3961	51-1195/15	6	8	

Таблица 1 представляет номер производственного заказа, наименование марки стали, код марки стали, номер локального документа (НТД выплавки), который содержит информацию о порядке производства марки стали, порядковый номер МНЛЗ, на котором возможно осуществление разливки.

Данные, содержащиеся в ССЗ, могут быть структурированы способом объединения марок стали в группы по очередности прохождения групп агрегатов, назначению и химическому составу. В статье [Боева, Коврижных, 2021] рассматривается разнообразие технологических маршрутов и наличие множества однотипных технологических агрегатов в типичной схеме транспортных и технологических потоков в производстве стали, которая характеризуется перекрестными и последовательно-параллельными связями.

С помощью ситуационного подхода можно своевременно выявлять нештатные ситуации при отклонении от установленного графика работы и сроков выполнения задач. Это позволяет

сохранить плановый график работы. В зависимости от характера и масштаба отклонения, а также операции, на которой произошло отклонение, формируются специальные инструкции и правила, которые позволяют привести ситуацию в соответствие с требованиями.

Этот набор включает в себя регулирование наличия свободных агрегатов, использование допустимых маршрутов, позволяющих корректно реагировать на отклонения от плана и перейти в положительное разрешенное состояние. Единственный оптимальный вариант выхода из непредвиденной ситуации выбирается, исходя из заданного критерия (или нескольких вариантов, если их оценки равноценны). Общая процедура действия системы изображена на рис. 3.

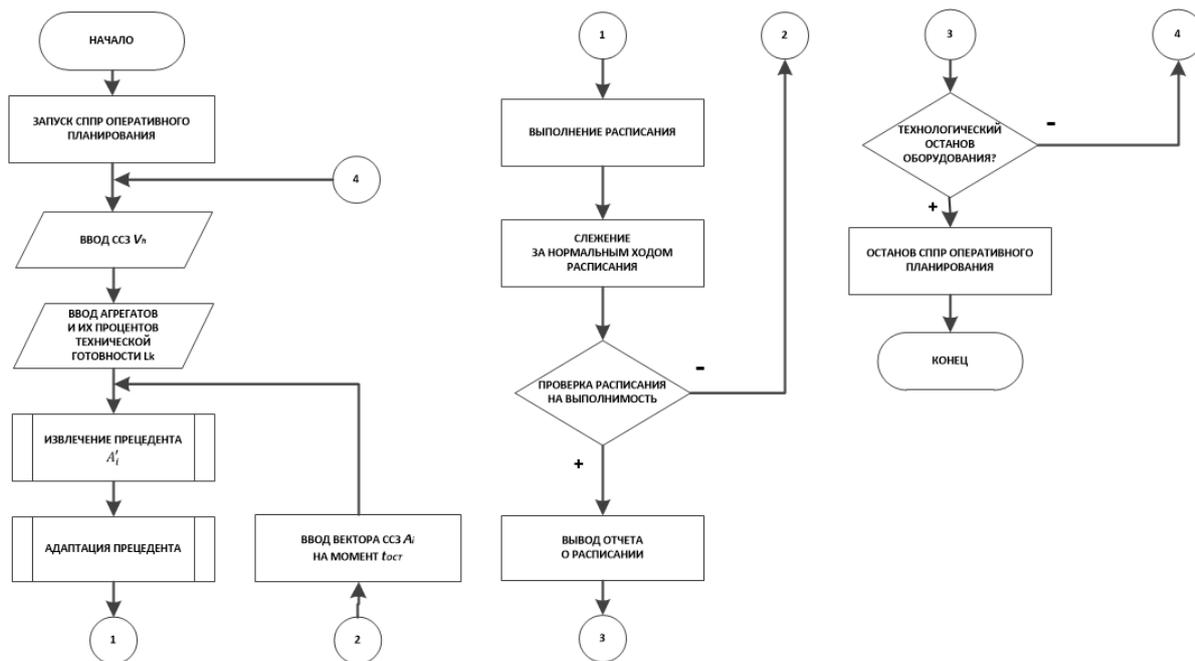


Рис. 3. Общий алгоритм функционирования системы
 Fig. 3. General algorithm of the system operation

При принятии решения относительно управления сталеплавильным цехом неотъемлемую роль всегда играет квалификация специалиста, несмотря на то, что система выдает варианты, более оптимальные. Для принятия верного решения жизненно важно обладать всесторонней информацией и четким пониманием процессов производства. Для ознакомления с процессами, происходящими в сталеплавильном цехе, можно воспользоваться методом извлечения данных. Этот подход заключается в анализе долгосрочных графиков производства и раскрытии скрытых закономерностей и правил, лежащих в их основе.

Тем не менее время выполнения заказа незначительно увеличивается при выполнении непрерывного технологического цикла, разработанная программа имеет множество преимуществ. Составление скорректированного расписания занимает всего несколько минут и автоматически обновляется на сервере. Планирование производства обеспечивает своевременную передачу заказов по технологической цепочке, благодаря резервному времени, исключающему возможные задержки и ущерб качеству металлургической продукции.

Повышение производительности в производстве стали достигается за счет сокращения времени простоя оборудования и ускоренной переналадки агрегатов во время рабочей смены, что приведет к увеличению производства стали на 1,5 %.

Заключение

Авторами был осуществлен анализ методов построения производственного расписания для управления комплексно структурированными производствами в процессе решения задачи,

связанной с комбинированным процессом. В условиях сталеплавильного производства были созданы модели для адаптации прецедентов к текущей ситуации. Методы, применяемые в настоящее время, оказались недостаточно эффективными в результате проведенного анализа. Также были разработаны системы продукционных правил для поиска прецедентов. Новые методы в области адаптации ранее разработанных расписаний на основе сменного суточного задания сделали возможным создание прецедентов, которые могут быть использованы в системе управления для решения разнообразных задач и поддержки принятия решений. Для сложноструктурированных производств разработано программное обеспечение, которое эффективно применяет предложенные модели и алгоритмы для решения поставленных задач. Созданная система демонстрирует растущую эффективность в производстве благодаря увеличению объема выплавки.

Список литературы

- Боева Л.М., Коврижных О.А. 2021. Оперативная корректировка производственных планов с использованием технологий и алгоритмов гибких производственных систем. Экономика. Информатика. 48 (4): 802–809. DOI 10.52575/2687-0932-2021-48-4-802-809.
- Варшавский П.Р. 2008. Механизмы правдоподобных рассуждений на основе прецедентов (накопленного опыта) для систем экспертной диагностики. Труды 11-ой национальной конференции по ИИ с международным участием (КИИ-2008, г. Дубна, Россия). В 3-х т., Т. 2. М.: ЛЕНАНД:106–113.
- Глухих И.Н., Никифоров Д.В. 2019. Разработка процесса принятия решений при моделировании и проектировании месторождений углеводородов на основе вывода по прецедентам. Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании: материалы VIII Международной научно-технической конференции; отв. ред. О. Н. Кузяков. Тюмень: ТИУ:17–21.
- Городилов А.Б. 2010. Адаптивное управление наукоемким производством на основе прецедентов. Материалы XXX Российской школы по проблемам науки и технологий, посвященной 65-летию Победы «Наука и технологии». Екатеринбург: УрО РАН: 260–264.
- Еремеев А.П., Варшавский П.Р., Поляков С.А. 2021. Программная реализация модуля анализа данных на основе прецедентов для распределенных интеллектуальных систем. Программные продукты и системы. 3:381–389.
- Иванов И.Г. 2020. Поддержка принятия решений в процессе испытаний перспективных космических средств на основе прецедентов. Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 175 (2): 51–56.
- Иванов И.Г., Зубков Г.А. 2020. Модель адаптивной системы диагностирования бортовой аппаратуры космического аппарата на основе искусственной нейронной сети и прецедентов. Цифровизация и глобализация мировой науки и техники: новые исследовательские методы и подходы. Материалы V Международной научно-практической конференции: 25–28.
- Карпов Л.Е., Юдин В.Н. 2007. Адаптивное управление по прецедентам, основанное на классификации состояний управляемых объектов. Труды ИСП РАН. 2:37–58.
- Кочкин Г.А., Кочкина В.Р., Голубкин И.А. 2013. Проблемы рассуждений по прецедентам, детализации, интеграции и оценки схожести прецедентов. Инженерный вестник Дона. 4 (27), с. 107.
- Кулида Е.Л. 2012. Формирование траектории движения объекта на основе прецедентов. Материалы 6-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD-2012, Москва). М.: ИПУ РАН. 2: 321–322.
- Кушников В.А., Богомолов А.С., Иващенко В.А., Селютин А.Д., Резчиков А.Ф., Кушникова Е.В., Марков А.И. 2023. Задача идентификации производственных ситуаций в системах управления производственными процессами авиаремонтного предприятия Мехатроника, автоматизация, управление. 24 (9): 451–461.
- Поспелов Д.А. 1986. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука. Гл.ред.изд.физ.-мат. лит., 288 с.
- Klaus Dieter Althof, Eric Auriol, Ralph Barlette, Michel Manago. 1995. A Review of Industrial Case-Based Reasoning Tools, AI Intelligence.
- Sankar K. Pal, Simon C.K. Shiu. 2004. Foundations of Soft Case-Based Reasoning. New Jersey: Wiley, 344 p.
- Tsukanov M.A., Kovrizhnykh O.A. 2020. The Need to Ensure Stability of the Schedule of Complex-Structured Productions. Proceedings – 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical



Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA: Virtual, Lipetsk: 735–739. DOI 10.1109/SUMMA50634.2020.9280680.

References

- Boeva L.M., Kovrizhnykh O.A. 2021. Operational adjustment of production plans using technologies and algorithms of flexible production systems. *Economics. Information technologies*. 48 (4): 802–809 (in Russian). DOI: 10.52575/2687-0932-2021-48-4-802-809
- Varshavskij P.R. 2008. Mechanisms of plausible reasoning based on precedents (accumulated experience) for expert diagnostic systems. *Mechanisms of plausible reasoning based on precedents (accumulated experience) for expert diagnostic systems*. M: LENAND. 2:106–113 (in Russian).
- Gluhih I.N., Nikiforov D.V. 2019. Development of decision-making process in modeling and design of hydrocarbon fields based on inference by precedents. *New Information Technologies in Oil and Gas Industry and Education: Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference*; ed. by O. N. Kuzyakov. Tyumen: TIU. 324 p:17–21 (in Russian).
- Gorodilov A.B. 2010. Adaptive management of knowledge-intensive production on the basis of precedents. *Proceedings of the XXX Russian school on problems of science and technology, dedicated to the 65th anniversary of Victory "Science and Technology"*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences: 260–264 (in Russian).
- Eremeyev A.P., Varshavsky P.R., Polyakov S.A. 2021. Software implementation of precedent-based data analysis module for distributed intelligent systems. *Software Products and Systems*. 3: 381–389 (in Russian).
- Ivanov I.G. 2020. Precedent-based decision support in the process of testing advanced space vehicles. *Voprosy electromechaniki. Proceedings of VNIIEМ*. 175 (2): 51–56 (in Russian).
- Ivanov I.G., Zubkov G.A. 2020. Model of adaptive system of diagnostics of onboard spacecraft hardware based on artificial neural network and precedents. *Digitalization and globalization of world science and technology: new research methods and approaches. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference*: 25–28 (in Russian).
- Karpov L.E., Yudin V.N. 2007. Adaptive control by precedents based on classification of states of controlled objects. *Proceedings of ISP RAS.2*: 37–58 (in Russian).
- Kochkin G.A., Kochkina V.R., Golubkin I.A. 2013. Problems of precedent reasoning, specification, integration, and similarity evaluation of precedent. *Engineering Bulletin of Don* 2013. № 4(27). P.107 (in Russian).
- Kulida E.L. 2012. Object motion trajectory formation based on precedents. *Proceedings of the 6th International Conference "Management of Large-Scale Systems Development" (MLSD-2012, Moscow)*. Moscow: IPU RAS. 2: 321–322 (in Russian).
- Kushnikov V.A., Bogomolov A.S., Ivashchenko V.A., Selutin A.D., Rezchikov A.F., Kushnikova E.V., Markov A.I. 2023. Problem of identification of production situations in control systems of production processes of aircraft repair enterprise. *Mechatronics, automation, control*. 24 (9): 451–461 (in Russian).
- Pospelov D.A. 1986. *Situational management: theory and practice*. M.: Nauka. Gl.ed.ed.izd.izd.fiz.-mat. lit, 288 p (in Russian).
- Klaus Dieter Althof, Eric Auriol, Ralph Barlette, Michel Manago. 1995. *A Review of Industrial Case-Based Reasoning Tools*, AI Intelligence (in English)
- Sankar K. Pal, Simon C.K. Shiu. 2004. *Foundations of Soft Case-Based Reasoning*. New Jersey: Wiley, 344 p (in English)
- Tsukanov M.A., Kovrizhnykh O.A. 2020. The Need to Ensure Stability of the Schedule of Complex-Structured Productions. *Proceedings – 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA: Virtual, Lipetsk: 735–739*. (in English) DOI 10.1109/SUMMA50634.2020.9280680

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 31.10.2023

Received October 31, 2023

Поступила после рецензирования 04.03.2024

Revised March 04, 2024

Принята к публикации 05.06.2024

Accepted June 05, 2024

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Полещенко Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных и информационных систем управления им. Ю.И. Еременко, СТИ НИТУ «МИСИС», г. Старый Оскол, Россия

Коврижных Олеся Александровна, аспирант кафедры автоматизированных и информационных систем управления им. Ю.И. Еременко, СТИ НИТУ «МИСИС», г. Старый Оскол, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry A. Poleshchenko, Candidate of Technical Sciences, Docent, Docent of the Faculty of Automation and Information Technology n.a. Y.I. Eremenko Ugarov Stary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov (branch) NUST "MISIS", Stary Oskol, Russia

Olesia A. Kovrizhnykh, Postgraduate Student the Faculty of Automation and Information Technology n.a. Y.I. Eremenko Stary Oskol Technological Institute n.a. A.A. Ugarov (branch) National University of Science and Technology "MISIS", Stary Oskol, Russia