

УДК 004.942

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕМПОРАЛЬНЫХ НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

А.В. Бобряков (*avbob@mail.ru*)

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

С.А. Прокопенко (*puss95@yandex.by*)

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва  
Белорусско-Российский университет, Могилёв

Современные технологии производства позволяют выпускать разнообразные виды продукции без необходимости обладания огромными производственными мощностями и при ограниченных ресурсах. Такие производства находятся под влиянием сложного и быстро меняющегося комплекса внешних условий, где эффективное планирование и оптимизация ресурсов становятся ключевыми факторами успеха, при этом учитываются возможные траектории производства сложных технических объектов, план занятости оборудования и персонала, что способствует оптимизации процессов и снижению себестоимости продукции. Эффективное планирование такой сложности невозможно без соответствующего модельного, алгоритмического и программного обеспечения. В статье предложен подход к моделированию процессов планирования производства сложных технических объектов с использованием предложенной разновидности темпоральных нейро-нечетких сетей Петри, рассмотрено алгоритмическое и программное обеспечение для реализации и сопровождения процессов планирования.

**Ключевые слова:** процессы планирования, темпоральные нейро-нечеткие сети Петри.

### Введение

Можно выделить особый класс производств, которые выпускают широкий ассортимент продукции, не обладая большим запасом ресурсов. На таких производствах одно и то же оборудование используется для выпуска различных сложных технических объектов (СТО).

Изготовление СТО проходит в соответствии с одной из возможных траекторий производства. Траектория производства СТО – это последовательный путь, который определяет все этапы, фазы и процессы, необхо-

димые для изготовления и сборки СТО и его компонентов: конкретные производственные задачи, с указанием технологий, методов и средств их достижения, перечень производственных ресурсов и оборудования, а также временных интервалов, выделяемых на их решение. Траектория производства является комплексным и многомерным процессом, требующим точного планирования, координации и управления. Она может варьироваться в зависимости от специфики СТО, технологий, регулирования и других факторов. Производство разных единиц одного и того же класса СТО может проходить по разным траекториям. Ошибки или задержки на любом этапе производства могут повлечь за собой увеличение себестоимости и срыва поставок.

Процесс планирования производства – это процесс создания детального плана действий, включающего множество траекторий производства СТО, необходимых для выпуска сложных технических объектов за определенный промежуток времени [Bobryakov et al., 2021]. Эффективные процессы планирования позволяют производствам выпускать на рынок конкурентоспособную продукцию – это достигается за счет снижения внутренних расходов на производство, отсутствия лишних затрат на ресурсы и т.д. Эффективность процесса планирования может определяться следующими критериями:

- своевременный выпуск продукции. Выполненные своевременно заказы позволяют повысить рейтинг производства среди однотипных производств, избежать штрафных санкций от заказчиков;
- количество бракованной (не соответствующей законодательным, технологическим требованиям) продукции. Большое количество бракованной продукции снижает рейтинг производства, увеличивает себестоимость продукции, повышает риск возникновения непрогнозируемых затрат в будущем, которые могут привести к банкротству производства;
- простой оборудования. Работа оборудования на холостом ходу и количество циклов «запуск/остановка» должно быть минимальным. Рациональное использование оборудования позволяет увеличить время между техническим обслуживанием, снизить риск внезапной поломки оборудования;
- себестоимость выпущенной продукции. Итоговые затраты на продукт не должны превышать критических значений;
- сокращение времени производства продукции (от начала производства – до передачи заказчику) – позволяет снизить количество «замороженных» активов, снизить затраты на хранение готовой продукции.

С каждым годом ужесточаются требования к качеству и срокам получения производимых СТО, возрастает внутренняя и внешняя конкуренция, оказывают своё влияние эпидемиологические, политические, экономические, социальные, технологические и экологические факторы. Производствам необходимо постоянно модернизировать свои процессы планирования, чтобы производимые сложные технические объекты были качественными и конкурентоспособными [Vobryakov et al., 2019].

Для выпуска продукции на таких производствах в условиях высокой конкуренции, ограниченных ресурсов, постоянно меняющихся внутренних и внешних условиях необходимо располагать модельным, алгоритмическим и программным обеспечением, которое позволяет в кратчайшие сроки адаптировать процессы планирования производства.

## 1. Алгоритмическое обеспечение процесса планирования

Планирование, как подход к управлению производством, представляет собой процесс формирования согласованного множества траекторий производства СТО определяющих рациональную последовательность действий по производству и реализации продукции. Основные этапы процесса планирования представлены на рис. 1.



Рис. 1. Процесс составления плана производства

Использование механизма планирования при производстве СТО позволяет:

- определить оптимальную последовательность производственных операций и ресурсов, необходимых для их выполнения;
- определить, какие ресурсы будут необходимы для производства продукции, и как их можно оптимально использовать;
- сократить затраты на производство благодаря оптимизации процессов и использованию ресурсов с максимальной эффективностью;
- контролировать процесс производства на всех его этапах, что позволяет быстро реагировать на возможные проблемы и сбои.

Процесс планирования при производстве продукции должен использовать множество информационно-аналитических (ИАП) и производственно-технологических процессов (ПТП), а также учитывать особенности протекающих процессов:

- информационно-аналитические процессы (сбора, обработки и анализа информации) предоставляют разнородную слабоструктурированную информацию в больших объемах;
- производственно-технологические процессы могут быть реализованы с использованием различных траекторий производства;
- ИАП характеризуются высокой динамикой изменения системных и внешних факторов;
- ПТП должен осуществляться в соответствии с законодательными ограничениями;
- между процессами могут быть временные отношения. К примеру, процесс должен начинаться сразу после окончания предыдущего или спустя какой-то промежуток времени;
- возможность возникновения рисков и проблем (поломка оборудования, некачественные ресурсы, порча комплектующих и т.д.).

Существующие распространенные подходы (системы массового обслуживания, MRP (Material Requirements Planning, планирование потребностей в материалах), ERP (Enterprise Resource Planning, планирование ресурсов предприятия), ЛТ (Just-in-Time, точно в срок), Lean-подход) к планированию в производстве имеют недостатки и ограничения, которые могут привести к неэффективным результатам функционирования производства. Многие подходы к планированию:

- не учитывают изменения внешних условий и требований рынка;
- не учитывают все аспекты производства и не могут обеспечить полное представление о том, как изменения в одной части производства могут повлиять на производство в целом;

- используют ручной или полуавтоматический подход к планированию, что приводит к ошибкам и задержкам в производственных процессах;
- не обеспечивают достаточной гибкости для адаптации к управления изменениям внешних условий и требований рынка, что может привести к дополнительным затратам и задержкам в производстве;
- дороги в эксплуатации и могут потребовать дополнительных затрат для внедрения в существующие производства.

Для моделирования процессов планирования необходим инструментарий, который:

- обладает проработанным математическим аппаратом;
- способен учитывать особенности процессов;
- обладает наглядным графическим представлением;
- допускает использование расширений и модификаций;
- прост во внедрении и эксплуатации.

## **2. Темпоральная нейро-нечеткая сеть Петри**

Одним из популярных подходов для моделирования и управления процессами в сложных системах являются сети Петри [Wang et al., 2018]. Сети Петри являются мощным инструментом исследования моделируемых систем благодаря их возможности описания многих классов дискретных, асинхронных, параллельных, распределенных, недетерминированных систем, благодаря наглядности представления их работы, развитому математическому и программному аппарату анализа [Balbiani et al., 2019]. Сети Петри – достаточно выразительная модель параллелизма, обладающая в то же время значительным набором разрешимых свойств [Andrade et al., 2010].

Применение классических сетей Петри для моделирования процессов планирования затруднительно, однако одной из особенностей сетей Петри является возможность использования различных расширений (цветные, нечеткие и т.д.), которые позволяют их использовать для решения задач.

Нейро-нечеткая сеть Петри в качестве переходов может использовать нейро-нечеткие компоненты. Использование нейро-нечетких компонентов необходимо для работы с большим количеством разнородной слабоструктурированной информации [Kwan et al., 1994], а также для выявления ресурсной комбинации, которая может привести к браку, чрезвычайной ситуации.

В представленной разновидности сетей Петри используются нейро-нечеткие компоненты в переходах, основанные на нейроне Квана и Кэи, представлен на рис. 2, для выявления ситуаций, которые могут привести к получению брака. Данный нейро-нечеткий компонент способен обучаться, чтобы выбирать траекторию в необходимый момент времени при заданных условиях с наименьшей вероятностью брака.

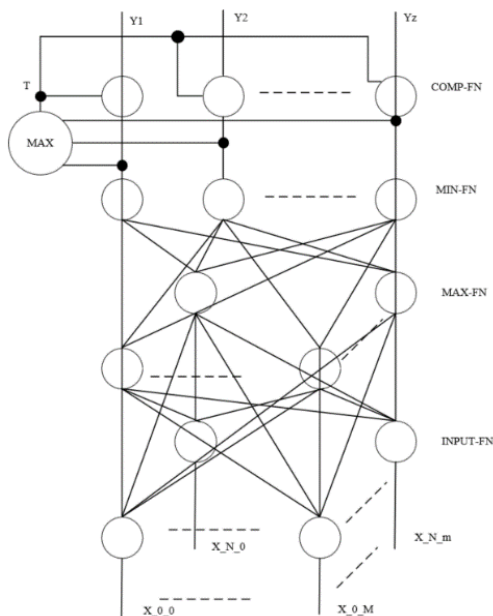


Рис. 2. Структура нейрона Квана и Кэи

Темпоральная логика Аллена основана на определении 13 базовых отношений [Allen, 1983] между временными интервалами, таких как «пересекаются», «начинаются», «заканчиваются» и другие. Каждое из этих отношений может быть выражено в терминах других отношений, что обеспечивает полноту и замкнутость системы. Использование темпоральной логики Аллена необходимо для задания отношений между процессами. Применение темпоральной логики Аллена позволяет снизить количество возможных траекторий производства.

Темпоральная нейро-нечеткая сеть Петри в общем виде может быть представлена следующим образом:

$$TNPN = (P, T, I, O, C, \alpha, f, B, R, Pl, m_0),$$

где  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_{np}\}$  – конечное непустое множество вершин сети Петри. Вершина в сети Петри показывает текущее состояние процесса;  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_{nt}\}$  – конечное непустое множество переходов сети Петри. Переход в сети Петри представляет собой действие, которое приводит к изменению состояния процесса;  $I = \{I_1, I_2, \dots, I_{nc}\}$  – конечное непустое множество входных функций сети Петри;  $O = \{O_1, O_2, \dots, O_{nc}\}$  – конечное непустое

тое множество выходных функций сети Петри. Выходная функция определяет, какие изменения произойдут в системе или процессе, когда переход будет выполнен. Например, выходная функция может уменьшать количество ресурсов, изменять значения меток на вершинах, увеличивать количество задач в очереди или запускать определенный процесс;  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_{nc}\}$  – конечное непустое множество времен, которые могут быть присвоены дугам в сети Петри. Если время указано 0, то им можно пренебречь;  $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{nc}\}$  – вектор значений порогов нечеткого срабатывания переходов. Значения порогов нечеткого срабатывания в сети Петри могут использоваться для определения степени соответствия меток на вершинах сети нечеткому множеству, а также для принятия решений о том, какой переход должен быть выполнен в текущий момент времени. На значение данного параметра влияет текущее состояние оборудования, квалификация оператора, степень готовности заготовки и т.д.;  $f = \{f_1, f_2, \dots, f_{nc}\}$  – вектор значений функции принадлежности нечеткого срабатывания переходов. Вектор значений функции принадлежности нечеткого срабатывания переходов в сети Петри используется для описания неопределенности или нечеткости в процессе моделирования системы;  $B = \{B_1, B_2, \dots, B_{nb}\}$  – множество базисных интервальных отношений логики Аллена;  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_{nr}\}$  – конечное непустое множество ресурсов (комплектующие, вспомогательное оборудование и т.д.), необходимых для функционирования сети Петри;  $Pl$  – план выпуска, который включает в себя множество сложных технических объектов, которые необходимо произвести, дата начала действия плана, дата окончания действия плана;  $m_0$  – вектор начальной маркировки, каждая компонента которого определяется значением функции принадлежности нечеткого наличия маркера в соответствующей позиции.

Переход  $T$  является активным (разрешенным или возбужденным), если выполняется условие:

$$\begin{cases} \min\{m_i\} \geq \alpha_k; \\ R_f(t_j) = true; \\ B_f(\{t\}_j, Time_0) = true. \end{cases} \quad (2.1)$$

Переход  $T$  является потенциально активным, если выполняется условие:

$$\begin{cases} \min\{m_i\} \geq \alpha_k; \\ R_f(t_j) = true. \end{cases} \quad (2.2)$$

Если переход активен при некоторой маркировке  $m$ , то для него выполняется правило активности перехода. Срабатывание перехода приведет к новой маркировке  $m$  для каждой входной позиции:

$$m_i = 0. \quad (2.3)$$

Для каждой из выходной позиций:

$$m_j = \max\{m_j, \min\{m_i, f_k\}\}. \quad (2.4)$$

### 3. Пример планирования производства СТО на основе ТННСП

Рассмотрим использование ТННСП для моделирования процесса планирования на примере производства компонента «Д00.02.01.015 (М22х1,5-6Н) Корпус» устройства «Насос Дозатор Д125-01» в момент времени  $t$ .

#### 3.1. Определение ассортимента выпуска

Производству необходимо выпустить деталь «Д00.02.01.015 (М22х1,5-6Н) Корпус». Особенность данной детали в том, что она может быть произведена по одной из трех возможных траекторий производства. Технологическая схема производства представлена на рисунке 3. Пунктирной линией обозначены отношения между операциями в нотации темпоральной логики Аллена.

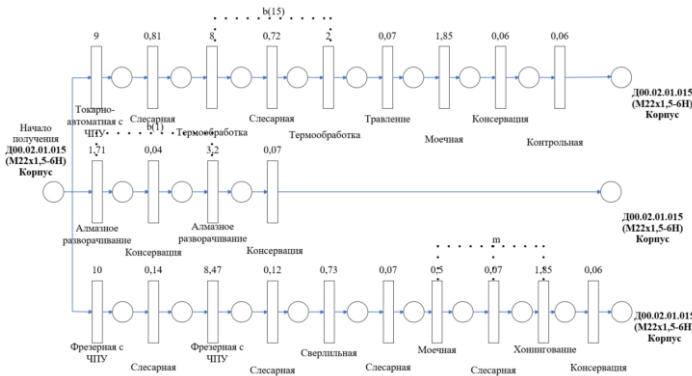


Рис. 3. Технологическая карта производства «Д00.02.01.015 (М22х1,5-6Н) Корпус» в нотации сети Петри

#### 3.2. Определение доступных стационарных ресурсов

Стационарные ресурсы – это ресурсы, которые не могут быть легко перемещены с одного места на другое. Они обычно связаны с определенным местоположением или фиксированной структурой (к примеру, слесарный станок закреплен за определенными сотрудниками). К стационарным ресурсам относятся станки, здания, персонал, рабочие места и т.д.



В момент времени  $t$  для проведения операции «Токарно-автоматная с ЧПУ» доступно 3 рабочих места, «Фрезерная с ЧПУ» доступно 2 рабочих места, «Алмазное разворачивание» нет доступных рабочих мест.

### 3.3. Формирования траекторий

Проецируя технологическую карту на имеющиеся возможные ресурсы, мы получаем схему на рис. 4. На схеме видно, что выполнение операции «Алмазное разворачивание» блокируется выполнением следующей операцией, так как она должна выполняться через минуту, а это невозможно из-за занятости оборудования.

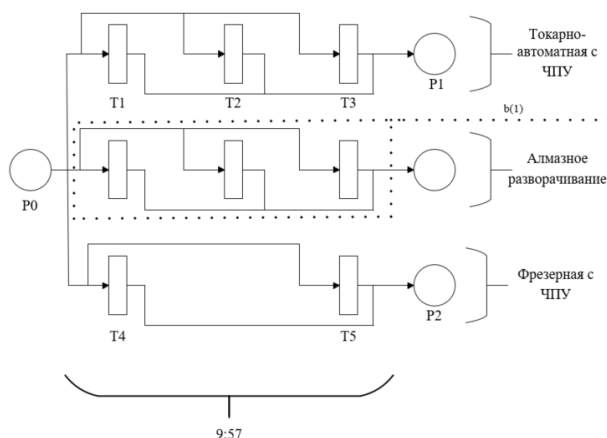


Рис. 4. Проекция части технологической карты производства «Д00.02.01.015 (М22х1,5-6Н) Корпус» в нотации сети Петри на ресурсы

Для определения какой из переходов  $T_1$ – $T_5$  может сработать – рассмотрим процесс функционирования темпоральной нейро-нечеткой сети Петри при следующих параметрах:  $m_0 = \{0.25, 0, 0\}$ ,  $f = \{0.23, 0.23, 0.22, 0.22, 0.22\}$ ,  $\alpha = \{0.7, 0.6, 0.49, 0.24, 0.3\}$ . Активным переходом согласно формулам 2.1 и 2.2 является переход  $T_4$ . Срабатывание перехода  $T_4$  согласно формулам 2.3 и 2.4 приведет к маркировке:

$$m_0 = \{0, \max\{0, \min(0.25, 0.22)\}, 0\} = \{0, 0.22, 0\}.$$

Поэтапно выполняя все переходы, будет получена траектория производства «Д00.02.01.015 (М22х1,5-6Н) Корпус» в момент времени  $t$ .

### 3.4. Определения необходимых ресурсов

Получив траекторию производства компонента «Д00.02.01.015 (М22х1,5-6Н) Корпус», можно определить какие ресурсы и в какой момент времени необходимы для реализации получения компонента.

### 4. Разработанные программно-инструментальные средства

Для реализации ТННСП были разработаны программно-инструментальные средства, позволяющие реализовать и сопровождать процесс планирования и производства сложных технических объектов. Экранная форма инструмента построения траектории производства СТО представлена на рис. 5.

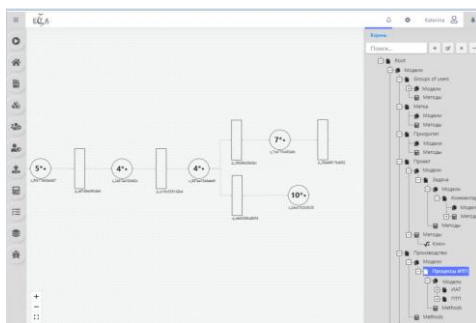


Рис. 5. Экранная форма разработанного инструмента

По окончании функционирования инструмента построения плана выдается отчет показывающий потребность в ресурсах, а также временные промежутки, когда они должны быть использованы для производства СТО.

### Заключение

Для получения результатов применения темпоральных нейро-нечетких сетей Петри при реализации механизма планирования и управления на производственно-сборочном предприятии было проанализирована деятельность предприятия за последние 3 года (2 года без применения ТННСП). За 3 года функционирования производства было проведено 6 523 621 технологических операций, выпущено 119 856 единиц продукции. В результате применения ТННСП удалось:

- снизить простой оборудования на 13%;
- сократить на 9% количество технологических операций, которые приводили к браку;
- снизить количество просроченных заказов на 49% (на 245 заказов за год).

## Список литературы

- [Allen 1983] Allen J.F. Maintaining knowledge about temporal intervals // Communications of the ACM. – 1983. – Vol. 26, No. 11. – P. 832-843.
- [Andrade et al. 2010] Andrade E., Maciel P., Callou G., Araujo C. An Approach Based in Petri Net for Requirement Analysis. – 2010. – DOI: 10.5772/7495.
- [Balbiani et al. 2019] Balbiani P., Boudou J., Diéguez M., Fernández-Duque D. Intuitionistic Linear Temporal Logics // ACM Transactions on Computational Logic. – 2019. – 21. – P. 1-32.
- [Bobryakov et al. 2019] Bobryakov A.V., Krutolevich S.K., Misnik A.E., Prakapenka S.A. Methodology for Development of Industrial Analytical Systems for Data Collection and Processing // Proceedings of the 14th International Conference on Interactive Systems. – 2019.
- [Bobryakov et al. 2021] Bobryakov A.V., Krutalevich S.K., Misnik A.E., Prokopenko S.A. Modeling of Industrial and Technological Processes in Complex Systems Based on NeuroFuzzy Petri Nets // Journal of Physics: Conference Series, Volume 2096, International Conference on Automatics and Energy (ICAE 2021) 7-8 October 2021, Vladivostok, Russia.
- [Kwan et al. 1994] Kwan H., Cai L. A fuzzy neural network and its application to pattern recognition // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 1994. – Vol. 2, No. 3. – P. 185-193. – DOI: 10.1109/91.298447.
- [Wang et al. 2018] Wang S., You D. and Seatzu C. A Novel Approach for Constraint Transformation in Petri Nets With Uncontrollable Transitions // IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – 2018. – Vol. 48, No. 8. – P. 1403-1410.