

Тематический выпуск (окончание)

© 2019 г. П. АЛАВИАН (alavian@umich.edu)
(Университет Мичигана, Энн-Арбор, США),
Ю. ЮН (yeun@dgist.ac.kr)
(DGIST, Даegu, Республика Корея),
С.М. МЕЕРКОВ (smm@umich.edu)
(Университет Мичигана, Энн-Арбор, США),
Л. ЧЖАН (liang.zhang@uconn.edu)
(Университет Коннектикута, Storrs, США)

ПРОГРАММИРУЕМЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ СОВЕТЧИК — СРЕДСТВО ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ¹

Программируемый производственный советчик (ППС) — это устройство для автоматизации принятия решений в производственных системах. Программируя и устанавливая ППС в любой производственной системе, можно сделать ее интеллектуальной: она становится способной диагностировать собственное состояние и предоставлять менеджеру производства рекомендации для повышения производительности. В статье вкратце изложены теоретические, аналитические и вычислительные основы ППС, а также примеры реальных интеллектуальных производственных систем для сборки днища автомобиля и для горячего цинкования.

Ключевые слова: автоматизация принятия решений, аналитическая теория производственных систем, интеллектуальные производственные системы, Industry 4.0.

DOI: 10.1134/S0005231019110011

1. Введение

Производственные системы — это оборудование (“машины”), буферные резервы (“буферы”) и обслуживающий персонал, необходимые для производства нужного изделия. Современные производственные системы состоят из сотен или даже тысяч машин и людей. Во многих случаях производственное оборудование автоматизировано. Принятие же решений в производственных системах практически всегда “ручное” — большая часть методов принятия решений в повседневных операциях или при разработке проектов совершенствования производства основана на здравом смысле и опыте. В этой ситуации неудивительно, что производственные потери очень велики: в десятках прикладных исследований на различных промышленных предприятиях обнаружено, что потери производительности составляют 20–30%.

¹ Это исследование частично финансировалось Национальным институтом стандартов и технологий США (П. Алавиан и С.М. Меерков, грант № 70NANB17H214; Л. Чжан, грант № 70NANB18H024).

Для ликвидации этих потерь разработана аналитическая теория производственных систем (ТПС). Каждая задача, рассматриваемая в этой теории, возникла из производственной практики, и почти все полученные решения были применены на производстве. Основные результаты этой теории изложены в учебнике [1] и последующих публикациях (см., например, [2, 3]).

За последние 30 лет методы ТПС были применены на многих промышленных предприятиях, что привело к существенному сокращению производственных потерь и значительному росту производительности, часто на 10–20%. Эти применения осуществлялись “вручную”: группа исследователей строила математическую модель производственной системы, применяла методы ТПС и рассчитывала оптимальные меры для улучшения с аналитически предсказанными результатами. Как правило, предлагаемые улучшения реализовывались на предприятии и вели к росту производительности, близкому к предсказанному. Такие применения были выполнены на Дженерал Моторс, Форд, Крайслер, Тойота, Вольво, Тесла, Вистеон, Дженерал Электрик, Харли-Дэвидсон, Крогер, Крафт, МиллерКоорс, Лексмарк и т.д.

Недостаток “ручного” подхода состоит в том, что после завершения проекта системы часто возвращаются в неэффективное состояние, возможно, в силу других причин потери производительности. Этот опыт привел к идее автоматизации принятия решений в производственных системах путем создания устройства, которое могло бы использоваться для принятия решений в режиме реального времени менеджерами без специальной подготовки по ТПС или аналитике в целом.

Авторы разработали такое устройство и назвали его программируемым производственным советчиком (ППС). Концептуально ППС похож на ПЛК (программируемый логический контроллер [4]). Разница состоит в том, что ПЛК предназначен для автоматизации оборудования, а ППС автоматизирует процесс принятия решений. Установка ППС в любой производственной системе делает ее интеллектуальной: она обретает способность самостоятельно диагностироваться и автономно разрабатывать проекты улучшения производства, приводящие к повышению производительности. Такие системы называются интеллектуальными производственными системами (ИПС). Делая производственные системы интеллектуальными, ППС вносит вклад в ныне популярную область под названием Industry 4.0 (см. [5–7]).

ППС состоит из трех блоков:

- Информационный блок (ИБ), который разрабатывает и на основе данных о текущем состоянии производственного оборудования постоянно обновляет математическую модель производственной системы.
- Аналитический блок (АБ), который автоматически оценивает работоспособность системы и эффективность различных сценариев улучшения; это осуществляется с использованием аналитических методов ТПС.
- Оптимизационный блок (ОБ), который вычисляет оптимальные меры для достижения желаемого улучшения производительности и предлагает их менеджеру производства (МП) в качестве рекомендаций; это осуществляется на основе методов поиска, аналогичных тем, которые используются в теории искусственного интеллекта.

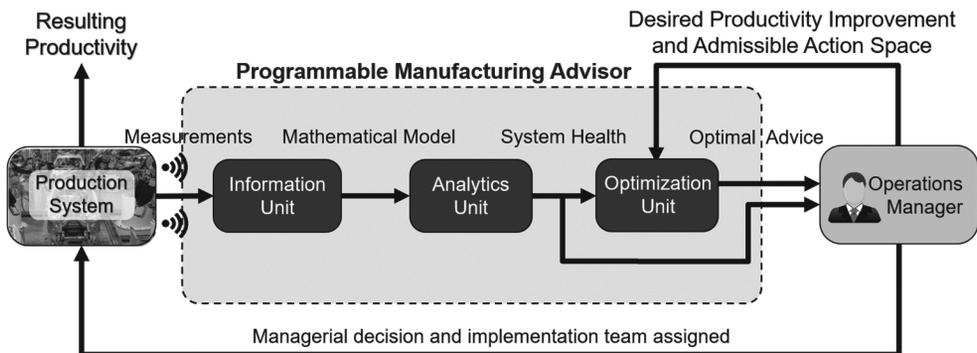


Рис. 1. Архитектура ИПС на основе ППС.

Архитектура ИПС показана на рис. 1. ППС имеет два входа и два выхода. На один вход подаются измерения состояния оборудования производственной системы. Другой вход вводит значения “Требуемого повышения производительности” (ТПП) и “Допустимых модификаций оборудования” (ДМО), сформулированные МП. ТПП указывает, какой показатель производительности должен быть улучшен и до какого уровня (например, увеличить пропускную способность на 10% или незавершенное производство на 30% и т.д.). ДМО определяет средства для достижения желаемых улучшений (например, модификация длительности машинных циклов или введение приоритетов в работе ремонтного персонала). Выходами ППС являются показатели “Здоровья системы” и “Оптимальный совет” для улучшения производства, оба предоставляемые МП. Выходом ИПС в целом является производительность, достигнутая после реализации проекта улучшений.

Цель данной статьи — описать аналитические основы ППС и его программную реализацию, а также продемонстрировать работу ИПС в системе сборки днища автомобиля и в горячем цинковании (гальванизации). Для этого в разделе 2 описываются типы производственных систем, а также параметры оборудования и показатели производительности. В разделах 3–5 представлены аналитические основы ИБ, АБ и ОБ соответственно. В разделе 6 описана программная реализация ППС. В разделах 7 и 8 представлены скриншоты, демонстрирующие работу интеллектуальных производственных систем. Наконец, в разделе 9 сформулированы выводы и возможные направления будущей работы. В конце статьи приведены списки сокращений и обозначений и, в дополнение, список сокращений в английской терминологии (которая используется в формулах, рисунках и скриншотах, включенных в эту статью).

2. Типы, параметры и показатели качества производственных систем

2.1. Типы производственных систем

ТПС рассматривает производственные системы следующих типов:

- Поточные линии (рис. 2,а), где машины (кружки) и буферы (прямоугольники) расположены последовательно для производства нужного изделия

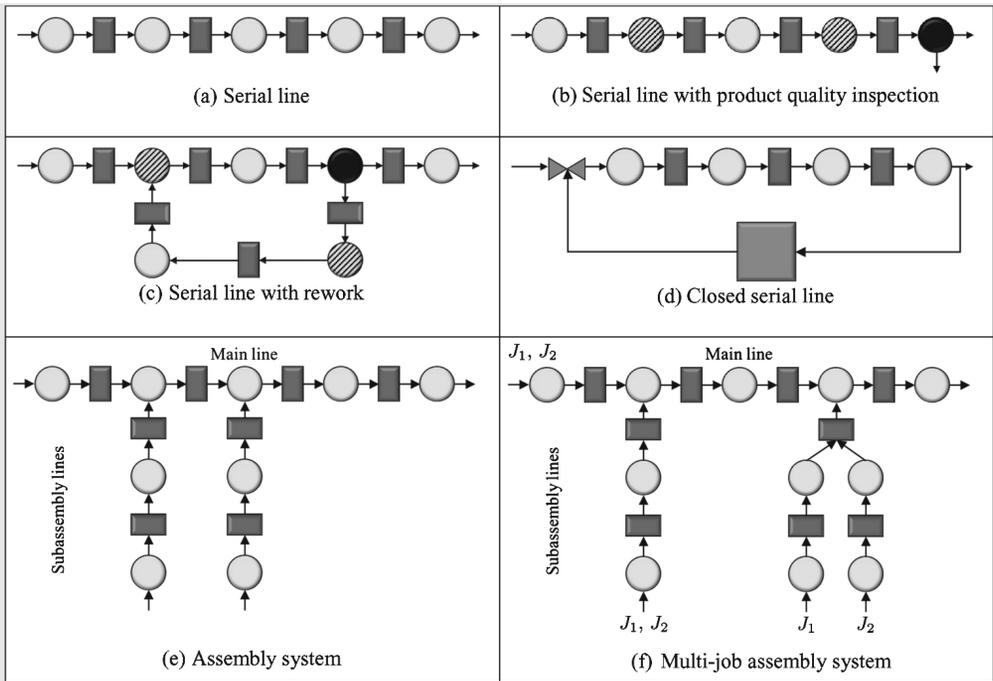


Рис. 2. Типы производственных систем.

(детали). Если время обработки на всех машинах одинаково, линия называется синхронной; в противном случае – асинхронной.

- Поточные линии с контролем качества продукции (рис. 2, *b*), где черные кружки обозначают устройства контроля качества, которые распознают и удаляют дефектные детали, изготовленные машинами, показанными заштрихованными кружками.
- Поточные линии с исправлением дефектов (рис. 2, *c*), где дефектные детали ремонтируются и возвращаются в производство.
- Замкнутые поточные линии (рис. 2, *d*), где детали транспортируются на тележках, и после изготовления детали тележка возвращается к буферу тележек (квадрат), чтобы быть доступной для следующей детали.
- Сборочные системы (рис. 2, *e*), где две или более поточных линий производят субблоки, которые объединяются на основной линии.
- Многодетальные производственные системы (рис. 2, *f*), где различные типы изделий (например, J_1, J_2) изготавливаются на одной и той же производственной системе, возможно, с различным временем обработки.

2.2. Параметры машин и буферов

Следующие параметры оборудования используются в анализе и проектировании ИПС:

- *Цикл машины* (τ) – время, необходимое для обработки детали на данной машине (часто измеряется в секундах). Во многих случаях оно являет-

ся постоянным или почти постоянным (т.е. случайным, но с небольшим коэффициентом вариации).

- *Производительность машины* (c) – количество деталей, которые машина изготавливает за единицу времени. Если единица времени час, а время цикла измеряется в секундах, производительность машины составляет

$$(1) \quad c = \frac{3600}{\tau} \text{деталей в ч.}$$

- В большинстве производственных систем машины имеют случайные простои из-за поломок. Среднее время безотказной работы и среднее время простоя обозначаются как T_{up} и T_{down} (как правило, в минутах). На практике T_{up} и T_{down} часто называют средним временем между отказами (СВМО) и средним временем ремонта (СВР) соответственно. В этой статье T_{up} и T_{down} или СВМО и СВР взаимозаменяемы.
- Показатель качества машины (g) – вероятность того, что изготовленная деталь недефектна.

Таким образом, машина характеризуется четырьмя независимыми параметрами: $\{\tau, T_{up}, T_{down}, g\}$.

В качестве характеристики машины также используется следующий зависимый параметр:

- Эффективность машины (e) – доля времени, в течение которого машина работоспособна:

$$(2) \quad e = \frac{T_{up}}{T_{up} + T_{down}}.$$

Что касается буферов, каждый из них характеризуется одним неотрицательным целым числом N , которое представляет емкость буфера.

2.3. Метрики эффективности

Метрики эффективности являются функциями параметров машин и буферов. Следующие показатели важны на практике и, следовательно, в ИПС.

- Пропускная способность (ПС) – среднее количество (недефектных) деталей, произведенных системой за единицу времени (например, за час). Пропускная способность за время машинного цикла в синхронных системах называется скоростью производства (СП). Очевидно, $ПС = H \cdot СП$, где H – количество машинных циклов в единицу времени (например, в час).
- Незавершенное производство в i -м буфере ($НП_i$) – среднее количество деталей в буфере b_i .
- Блокировка машины m_i ($БМ_i$) – вероятность того, что машина m_i работоспособна, буфер b_i заполнен, и машина m_{i+1} не извлекает детали из этого буфера.
- Голодание машины m_i ($ГМ_i$) – вероятность того, что m_i работоспособна, а буфер b_{i-1} пуст.



Рис. 3. Скриншот домашней страницы PSE Toolbox.

- Время производства (ВП) — среднее время, которое деталь проводит в системе — в обработке или в ожидании обработки (в буферах).

Для систем, работающих в заводском цеху, эти показатели производительности можно оценивать статистически, используя цеховые системы мониторинга. Однако поскольку ИПС предназначена, в частности, для оценивания эффективности потенциальных проектов улучшения производительности, статистический подход неприменим. Вместо этого должны использоваться либо имитационное моделирование, либо аналитические методы. Подход компьютерного имитационного моделирования требует точные модели производственных систем (см. [8–10]). Иногда такие модели называют “цифровыми двойниками”. Поскольку создание цифровых двойников для сложных систем практически невозможно, применим аналитический подход, который использует упрощенные модели рассматриваемых систем.

Аналитические методы анализа, модернизации и проектирования производственных систем разрабатываются более 50 лет начиная с новаторских работ [11, 12] и заканчивая последующими исследованиями, обобщенными в монографиях [1, 13–20]. В настоящей работе используются методы ТПС ([1–3]), главным образом, потому, что они обеспечивают гарантии сходимости процедур рекуррентной оценки производительности и исследуют единым образом различные проблемы анализа и проектирования (например, оценка пропускной способности, идентификация узких мест, анализ времени производства, характеристические кривые, портреты производительности многодетальных систем и т.д.).

Для использования методов ТПС на практике авторы разработали пакет программного обеспечения, PSE Toolbox. Скриншот его домашней страницы показан на рис. 3. Его десять инструментов (с функциональными возможностями, показанными на рис. 3) могут быть использованы для анализа и проектирования производственных систем.

3. Информационный блок

В этом и двух последующих разделах описаны теоретические основы ППС блоков ИБ, АБ и ОБ.

Теоретические основы ИБ основаны на взаимодействии ИБ и АБ. Это связано с тем, что модель, используемая в АБ, диктует “что” и “как” измерять.

Таким образом, в основе проектирования ИБ лежит проблема математического моделирования производственных систем.

Математическая модель (ММ) дает упрощенную версию производственной системы, включая, однако, ее основные особенности. ММ состоит из структурной модели и параметрической модели. Структурная модель представляет реальную производственную систему одной из стандартных блок-схем, показанных на рис. 2. Параметрическая модель состоит из параметров машин и буферов, включенных в структурную модель. Методы математического моделирования производственных систем описаны в [1, гл. 3] и опираются на измерение и идентификацию параметров машин и буферов, т.е. $\{\tau, T_{up}, T_{down}, g, N\}$.

Как правило, цикл машины τ можно легко определить путем измерения времени обработки детали. Если машина нуждается в операциях загрузки/разгрузки, их продолжительность добавляется к времени обработки. Определение СВМО и СВР (т.е., T_{up} и T_{down}) требует больше усилий. Для этого необходимо измерить продолжительность каждого случайного времени работы и ремонта, $t_{up,i}$ и $t_{down,i}$ (где i обозначает i -е событие работы и ремонта). Тогда T_{up} и T_{down} можно оценить как

$$(3) \quad T_{up} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{up,i}}{n}, \quad T_{down} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{down,i}}{n},$$

где число событий простоя n должно быть достаточно большим, чтобы гарантировать статистически достоверные оценки. Авторами разработана теория для выбора наименьшего числа измерений n^* , которое необходимо и достаточно для обеспечения желаемой точности оценок T_{up} и T_{down} (см. [21]).

Чтобы определить параметр качества g , необходимо отслеживать общее количество произведенных деталей Q_{total} , скажем за смену, и количество исправных деталей среди них Q_g , а затем оценить g по формуле:

$$(4) \quad g = \frac{Q_g}{Q_{total}}.$$

Значения τ , T_{up} и T_{down} должны отслеживаться непрерывно, поскольку они изменяются во времени.

Емкость буфера N обычно постоянна и может быть получена путем оценки количества деталей, которые буфер может хранить. Если конвейер служит буфером, его емкость можно оценить, используя метод, описанный в [1, гл. 3].

4. Аналитический блок

Аналитический блок является центральным блоком ППС. Поэтому его описание здесь приведено более подробно.

4.1. Аналитические основы

Основой АБ являются методы ТПС. Они основаны на точной оценке производительности для двухмашинных систем (с использованием теории мар-

ковских процессов) и на процедурах рекуррентного агрегирования для приближенной оценки показателей производства в системах с большим количеством машин. Иллюстрация этих методов приведена ниже в терминах синхронных поточных линий с машинами, которые описываются экспоненциальной моделью надежности. Согласно этой модели длительности работы и ремонта машин являются экспоненциальными случайными величинами с параметрами λ и μ соответственно.

Система из двух экспоненциальных машин с параметрами (λ_1, μ_1) и (λ_2, μ_2) и буфером N описывается цепью Маркова в непрерывном времени. Можно вычислить ее стационарное распределение вероятностей, что приводит к следующим формулам для СП, БМ₁ и ГМ₂ (выражение для НП также было получено, но здесь опущено из-за недостатка места):

$$(5) \quad \begin{aligned} PR &= e_2[1 - Q(\lambda_1, \mu_1, \lambda_2, \mu_2, N)] = \\ &= e_1[1 - Q(\lambda_2, \mu_2, \lambda_1, \mu_1, N)], \end{aligned}$$

$$(6) \quad BL_1 = e_1 Q(\lambda_2, \mu_2, \lambda_1, \mu_1, N),$$

$$(7) \quad ST_2 = e_2 Q(\lambda_1, \mu_1, \lambda_2, \mu_2, N),$$

где

$$(8) \quad \begin{aligned} &Q(\lambda_1, \mu_1, \lambda_2, \mu_2, N) = \\ &= \begin{cases} \frac{(1 - e_1)(1 - \phi)}{1 - \phi e^{-\beta N}}, & \text{если } \frac{\lambda_1}{\mu_1} \neq \frac{\lambda_2}{\mu_2}, \\ \frac{\lambda_1(\lambda_1 + \lambda_2)(\mu_1 + \mu_2)}{(\lambda_1 + \mu_1)[(\lambda_1 + \lambda_2)(\mu_1 + \mu_2) + \lambda_2\mu_1(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)N]}, & \text{если } \frac{\lambda_1}{\mu_1} = \frac{\lambda_2}{\mu_2}, \end{cases} \end{aligned}$$

$$(9) \quad e_i = \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i}, \quad i = 1, 2,$$

$$(10) \quad \phi = \frac{e_1(1 - e_2)}{e_2(1 - e_1)},$$

$$(11) \quad \beta = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1 + \mu_2)(\lambda_1\mu_2 - \lambda_2\mu_1)}{(\lambda_1 + \lambda_2)(\mu_1 + \mu_2)}.$$

Подобный анализ для более длинных линий не может быть выполнен в аналитической форме, поэтому необходимы аппроксимации. Как упоминалось ранее, такие аппроксимации разработаны с использованием процедуры рекуррентной агрегации.

Чтобы описать эту процедуру, рассмотрим поточную линию с M машинами, обозначенными как t_i , каждая из которых характеризуется параметрами экспоненциальных распределений (λ_i, μ_i) , $i = 1, \dots, M$, и $M - 1$ буферами, b_i , с емкостями N_i , $i = 1, \dots, M - 1$. Процесс рекуррентной агрегации состоит в следующем. Вначале агрегируем две последние машины t_{M-1} и t_M в одну

“экспоненциальную” машину, обозначенную как m_{M-1}^b , где верхний индекс b обозначает обратную фазу процедуры агрегации. Параметры m_{M-1}^b выбираются с использованием второго выражения в (5) (подробности см. в [1, подраздел 11.1.2]). Затем эта машина, т. е. m_{M-1}^b , агрегируется с m_{M-2} , чтобы получить еще одну агрегированную машину m_{M-2}^b . Такая процедура продолжается до тех пор, пока все машины не будут агрегированы в m_1^b , что завершает обратную фазу процедуры агрегирования.

Последующая прямая фаза агрегирования состоит в агрегировании первой машины m_1 с агрегированной версией остальной части системы, т.е. с m_2^b , что приводит к агрегированной машине m_2^f , где f обозначает прямую фазу агрегирования. Параметры m_2^f выбираются с использованием первого выражения в (5). Затем агрегируется m_2^f с m_3^b , получается m_3^f и т. д., пока все машины не будут агрегированы в m_M^f , что завершает прямую фазу процедуры агрегации. Затем обратные и прямые фазы итерированы. Аналитически эта рекуррентная процедура формализуется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \mu_i^b(s+1) &= \mu_i(1 - Q(\lambda_{i+1}^b(s+1), \mu_{i+1}^b(s+1), \lambda_i^f(s), \mu_i^f(s), N_i)), \\
 & \hspace{15em} i = 1, \dots, M-1, \\
 \lambda_i^b(s+1) &= \lambda_i + \mu_i Q(\lambda_{i+1}^b(s+1), \mu_{i+1}^b(s+1), \lambda_i^f(s), \mu_i^f(s), N_i), \\
 & \hspace{15em} i = 1, \dots, M-1, \\
 (12) \quad \mu_i^f(s+1) &= \mu_i(1 - Q(\lambda_{i-1}^f(s+1), \mu_{i-1}^f(s+1), \lambda_i^b(s+1), \mu_i^b(s+1), N_{i-1})), \\
 & \hspace{15em} i = 2, \dots, M, \\
 \lambda_i^f(s+1) &= \lambda_i + \mu_i Q(\lambda_{i-1}^f(s+1), \mu_{i-1}^f(s+1), \lambda_i^b(s+1), \mu_i^b(s+1), N_{i-1}), \\
 & \hspace{15em} i = 2, \dots, M, \\
 & \hspace{10em} s = 1, 2, \dots,
 \end{aligned}$$

с начальными условиями

$$\lambda_i^f(0) = \lambda_i, \quad \mu_i^f(0) = \mu_i, \quad i = 2, \dots, M-1,$$

и граничными условиями

$$\begin{aligned}
 \lambda_1^f(s) &= \lambda_1, \quad \mu_1^f(s) = \mu_1, \quad s = 1, 2, \dots, \\
 \lambda_M^b(s) &= \lambda_M, \quad \mu_M^b(s) = \mu_M, \quad s = 1, 2, \dots,
 \end{aligned}$$

где функция Q определена в (8).

Теорема 1. Рекуррентная процедура (12) обладает следующими свойствами:

(i) *Последовательности $\lambda_2^f(s), \dots, \lambda_M^f(s), \mu_2^f(s), \dots, \mu_M^f(s)$ и $\lambda_1^b(s), \dots, \lambda_{M-1}^b(s), \mu_1^b(s), \dots, \mu_{M-1}^b(s)$, $s = 1, 2, \dots$ сходятся к пределам λ_i^f , μ_i^f , λ_i^b и μ_i^b .*

(ii) Эти пределы являются единственными решениями следующих уравнений:

$$\begin{aligned}
 \mu_i^b &= \mu_i \left[1 - Q \left(\lambda_{i+1}^b, \mu_{i+1}^b, \lambda_i^f, \mu_i^f, N_i \right) \right], \quad i = 1, \dots, M-1, \\
 \lambda_i^b &= \lambda_i + \mu_i Q \left(\lambda_{i+1}^b, \mu_{i+1}^b, \lambda_i^f, \mu_i^f, N_i \right), \quad i = 1, \dots, M-1, \\
 \mu_i^f &= \mu_i \left[1 - Q \left(\lambda_{i-1}^f, \mu_{i-1}^f, \lambda_i^b, \mu_i^b, N_{i-1} \right) \right], \quad i = 2, \dots, M, \\
 \lambda_i^f &= \lambda_i + \mu_i Q \left(\lambda_{i-1}^f, \mu_{i-1}^f, \lambda_i^b, \mu_i^b, N_{i-1} \right), \quad i = 2, \dots, M.
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

(iii) Кроме того, эти пределы удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\begin{aligned}
 e_M^f &= e_1^b = \\
 &= e_{i+1}^b \left[1 - Q \left(\lambda_i^f, \mu_i^f, \lambda_{i+1}^b, \mu_{i+1}^b, N_i \right) \right] = \\
 &= e_i^f \left[1 - Q \left(\lambda_{i+1}^b, \mu_{i+1}^b, \lambda_i^f, \mu_i^f, N_i \right) \right], \quad i = 1, \dots, M-1,
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

где

$$e_i^f = \frac{\mu_i^f}{\lambda_i^f + \mu_i^f}, \quad e_i^b = \frac{\mu_i^b}{\lambda_i^b + \mu_i^b}, \quad i = 1, \dots, M.$$

□

Доказательство : см. [1, подраздел 20.2.1].

Утверждение (iii) означает, что с точки зрения каждого буфера b_i , $i = 1, \dots, M-1$, часть поточной линии до этого буфера представляется агрегированной машиной m_i^f , а часть после этого буфера — агрегированной машиной m_{i+1}^b . Поэтому все метрики производительности такой виртуальной двухмашинной линии можно оценить с помощью выражений (5)–(8). Другими словами, оценки СП, БМ_{*i*} и ГМ_{*i*} многомашинной системы можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \widehat{PR} &= e_{i+1}^b \left[1 - Q \left(\lambda_i^f, \mu_i^f, \lambda_{i+1}^b, \mu_{i+1}^b, N_i \right) \right] = \\
 &= e_i^f \left[1 - Q \left(\lambda_{i+1}^b, \mu_{i+1}^b, \lambda_i^f, \mu_i^f, N_i \right) \right], \quad i = 1, \dots, M-1,
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

$$\widehat{BL}_i = e_i Q \left(\lambda_{i+1}^b, \mu_{i+1}^b, \lambda_i^f, \mu_i^f, N_i \right), \quad i = 1, \dots, M-1,
 \tag{16}$$

$$\widehat{ST}_i = e_i Q \left(\lambda_{i-1}^f, \mu_{i-1}^f, \lambda_i^b, \mu_i^b, N_{i-1} \right), \quad i = 2, \dots, M.
 \tag{17}$$

Точность этих оценок была определена аналитически и численно, и было показано, что ошибка $\widehat{СП}$ в большинстве случаев находится в пределах 1%. Эта процедура агрегирования и ее обобщения для других типов производственных систем были реализованы в АБ для анализа разного типа производственных систем.

Уравнения (13) отражают все качественные и количественные свойства поточных линий. В результате изучения этих свойств были получены решения ряда задач, важных для приложений. Только три из них, играющих важную роль в ППС, описаны ниже: проблема идентификации узких мест, проблема портрета производительности многодетальных производственных систем и проблема управления с обратной связью допуском сырья для обеспечения желаемого времени производства.

4.2. Идентификация узкого места

На практике узкое место (УМ) обычно определяется как наихудшая машина в системе с точки зрения автономной производительности (АП). Это определение не учитывает структуру системы, емкость буферов, положение машины в системе и т.д. Чтобы учесть эти особенности, определим узкое место следующим образом.

Определение 4.1. Узкое место — это машина с максимальным влиянием на пропускную способность системы. Формально это определяется как

$$(18) \quad \frac{\partial TP}{\partial c_i} > \frac{\partial TP}{\partial c_j}, \quad \forall j \neq i,$$

где, как упомянуто в разделе 2, c_i — производительность i -й машины.

Оказывается, что машина с наименьшим АП является УМ, только когда емкость всех буферов бесконечна или когда рабочая сила распределена оптимальным образом (т.е. у нее все буферы в среднем наполовину полны [1]). Во всех остальных случаях УМ может быть любой машиной, в том числе машиной с максимальной АП.

К сожалению, производные, входящие в (18), не могут быть вычислены аналитически, потому что ПС (как функцию c_1, \dots, c_M) для $M > 2$ нельзя представить аналитически. Поэтому была разработана следующая упрощенная процедура идентификации УМ (см. [1, гл. 5 и 13]).

- Оцените БМ и ГМ всех машин, включенных в структурную модель системы.
- Поставьте стрелки между каждой парой последовательных машин согласно правилу: если $БМ_i > ГМ_{i+1}$, поставьте стрелку, направленную от m_i к m_{i+1} , если же $БМ_i < ГМ_{i+1}$, поставьте стрелку, направленную от m_{i+1} к m_i .
- Если есть только одна машина без исходящих стрелок, то это — УМ (в смысле (18)).
- Если имеется несколько машин без исходящих стрелок, то машина с максимальным значением зажатости (3) является УМ, где *зжатость* определяется следующим образом:

$$(19) \quad \begin{aligned} S_1 &= |ST_2 - BL_1|, \\ S_i &= |ST_{i+1} - BL_i| + |ST_i - BL_{i-1}|, \quad i = 2, \dots, M-1, \\ S_M &= |ST_M - BL_{M-1}|. \end{aligned}$$

Эта процедура также реализована в АБ для анализа эффективности производственных систем.

4.3. Портрет производительности многодетальных систем

Идея портрета производительности (ПП) многодетальных систем мотивирована фазовыми портретами динамических систем в пространстве состояний (см., например, [22, 23]). Действительно, фазовые портреты позволяют графически представлять траектории системы для различных начальных условий. Аналогично ПП позволяет графически представлять производительность системы для различных значений набора производимых деталей.

Более конкретно, ПП представляет ПС и УМ как функции набора деталей (НД), производимых системой и таким образом позволяет менеджеру оценить поведение системы для всех комбинаций НД, которые зачастую меняются ежедневно. Это приводит к управленческим действиям, соответствующим изменениям в ПС. Аналитические методы для расчета ПП были разработаны в [3] и реализованы в АБ.

4.4. Управление допуском сырья с использованием обратной связи

Важной характеристикой производственных систем является характеристическая кривая (ХК), которая описывает ВП как функцию скорости допуска сырья или (в системах с неограниченными буферами) как функцию ПС. Структурно эта функция имеет колено, как показано точкой на рис. 4. Состояния ниже колена неэффективны, так как ПС может быть увеличена без заметного увеличения ВП. Состояния выше колена тоже непродуктивны, так как ВП становится чрезвычайно большим без значительного увеличения ПС. Таким образом, желаемая рабочая точка находится на колене.

Чтобы обеспечить работу системы на колене или в любой другой точке ХК, необходимо регулировать скорость допуска сырья в производственную систему. Если параметры оборудования известны точно, это можно сделать, рассчитав скорость допуска сырья, соответствующую желаемой точке на ХК. Когда параметры машины известны неточно, для поддержания желаемого ВП необходимо управлять скоростью допуска сырья, используя обратную

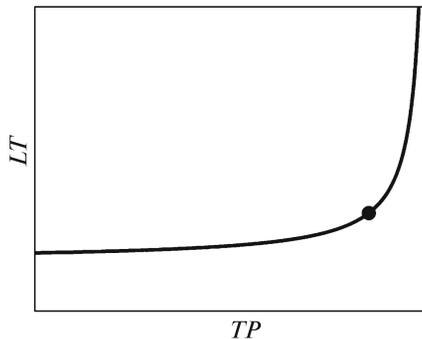


Рис. 4. Характеристическая кривая.

связь. Как было показано в [2], для этой цели может быть использован закон управления, описанный ниже.

Рассмотрим поточную линию с бесконечными буферами и M машинами с экспоненциальной моделью надежности. ВП в такой системе может быть оценено следующим образом:

$$(20) \quad \widehat{LT} = M\tau + \sum_{i=0}^{M-1} \left(\frac{e_i}{\mu_i} + \frac{e_{i+1}}{\mu_{i+1}} \right) \left(\frac{1 - e_{i+1}}{e_{i+1} - e_0} \right),$$

где, как и прежде, e_i , $i = 1, \dots, M$ — эффективность машины, $\mu_i = 60/\text{СВР}$, $i = 1, \dots, M$, а e_0 — эффективность виртуальной машины, моделирующей механизм допуска сырья.

Для любого допустимого требуемого времени выполнения заказа $ВП_d$ скорость допуска сырья e_0^* , которая обеспечивает $ВП_d$, является единственным действительным корнем следующего полиномиального уравнения M -го порядка:

$$(21) \quad (LT_d - M\tau) \prod_{i=0}^{M-1} (e_{i+1} - e_0) - (1 - e_1) \left(\frac{e_0}{\mu_0} + \frac{e_1}{\mu_1} \right) \prod_{i=1}^{M-1} (e_{i+1} - e_0) - \\ - \prod_{i=1}^{M-1} \left((1 - e_{i+1}) \left(\frac{e_i}{\mu_i} + \frac{e_{i+1}}{\mu_{i+1}} \right) \prod_{j=0, j \neq i}^{M-1} (e_{j+1} - e_0) \right) = 0.$$

На основании этого $e_0^*(ВП_d)$ детерминированная почасовая скорость допуска сырья E_H^* определяется соотношением

$$(22) \quad E_H^* = \lfloor H e_0^*(LT_d) \rfloor,$$

где $\lfloor x \rfloor$ обозначает наибольшее целое число, не превышающее x , а H — количество машинных циклов в час.

Наконец, чтобы определить закон управления с обратной связью допуска сырья, представим номинальное значение незавершенного производства в системе следующим образом:

$$(23) \quad WIP_{nominal} = \frac{e_0^*}{\tau} (LT_d - M\tau).$$

Тогда закон обратной связи задается как

$$(24) \quad E(s+1) = \begin{cases} E_H^*, & \text{если } WIP_{total}(s) \leq WIP_{nominal}, \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $s = 0, 1, \dots$ — индекс интервала допуска; $E(s+1)$ — количество сырья, допущенного в начале интервала $s+1$; E_H^* определено в (22); $WIP_{total}(s)$ — незавершенное производство в системе в конце интервала допуска s .

Этот закон управления реализован в АБ.

5. Оптимизационный блок

Теоретические основы ОБ основаны на процедурах поиска, обычно используемых в теории искусственного интеллекта. Причина состоит в следующем.

Как отмечено в разделе 1, ОБ предназначен для расчета оптимальных рекомендаций по достижению желаемого улучшения производства. Хотя это действительно проблема оптимизации, обычные методы оптимизации, такие как линейное и нелинейное программирование, не могут быть использованы для поиска решения. Это обусловлено тем, что показатели производительности, подлежащие оптимизации (например, ПС, НП, ВП и т. д.), не могут быть представлены явными функциями системных параметров (например, τ , СВМО/СВР, N и т. д.). Ситуация здесь схожа с ситуацией в компьютерных шахматных играх, приведшей к разработке различных методов поиска, основанных на знаниях игры и интуиции дизайнеров. Аналогично в ОБ единственный доступный подход заключается в использовании процедур поиска в пространстве параметров, подкрепленных свойствами теории производственных систем, в частности качественными свойствами метрик производительности (например, непрерывность, монотонность, обратимость и улучшаемость). Эти свойства были исследованы в [1, 2], и были использованы в алгоритмах, разработанных для ОБ.

6. Программная/аппаратная реализация ППС

Программное обеспечение ППС реализовано в виде веб-приложения. Его серверная часть, написанная на языке программирования Node JS, отвечает за хранение и обработку данных производственных систем и пользовательских данных. Все расчеты ППС реализованы в бэкенде². Веб-интерфейс разработан с использованием JavaScript. Он обрабатывает представление данных и их визуализацию. Доступ к программному обеспечению ППС можно получить из облака — наиболее экономичный и масштабируемый вариант, или установить на производстве, что обеспечивает повышенную безопасность. В этом случае ППС устанавливается в виде сервера и дисплея. Сервер предназначен для хранения данных о состоянии производственного оборудования (полученных с помощью измерений на производственных площадках) и для поддержки программного обеспечения ППС. Дисплей позволяет вводить управляющие воздействия и отображать значения выходов ППС.

7. Интеллектуальная система сборки днища автомобиля

Сборка днища автомобиля представляет собой производственную систему, в которой выполняются два типа изделий в многодетальном режиме. В этом разделе представлены скриншоты, демонстрирующие работу ППС, разработанную для этой системы.

² Фронтенд и бэкенд — это варианты архитектуры программного обеспечения. Термины появились в программной инженерии вследствие развития принципа разделения ответственности между внешним представлением и внутренней реализацией. Фронтенд (англ. front-end) — клиентская сторона пользовательского интерфейса к программно-аппаратной части сервиса. Бэкенд (англ. back-end) — программно-аппаратная часть сервиса.

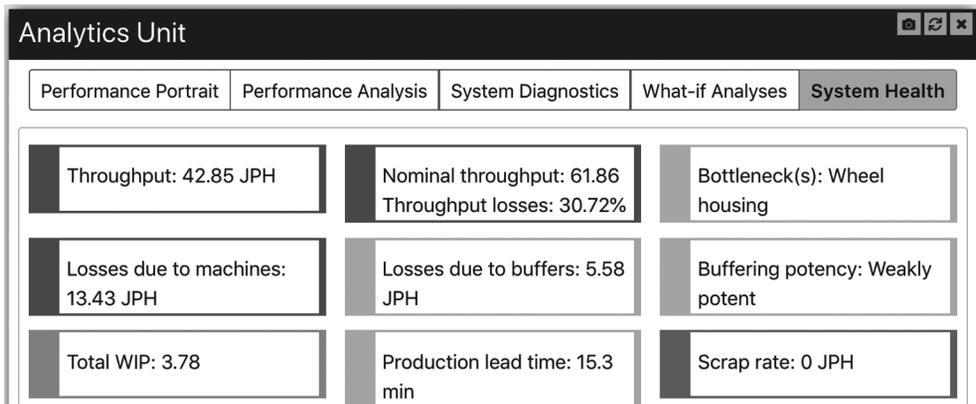


Рис. 5. “Здоровье системы” сборки автомобильного днища.

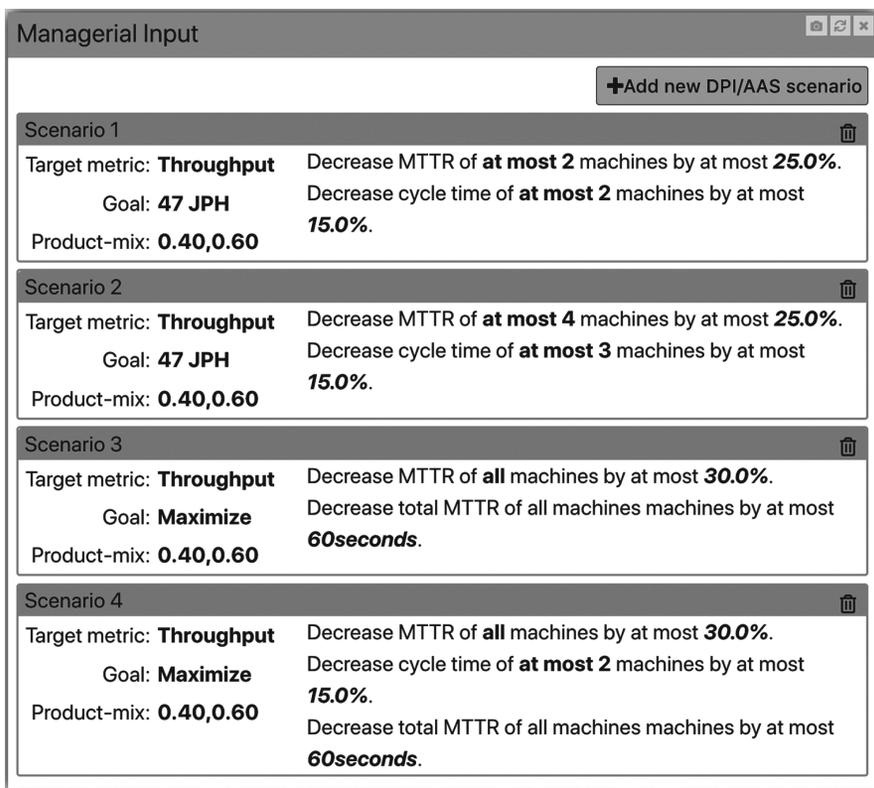


Рис. 6. Сценарии улучшения системы сборки автомобильного днища.

Выход АБ представляющий “Здоровье системы”, показан на рис. 5, откуда видно, что система производит 42,65 днищ в час, в то время как она номинально может производить 61,86, т.е. потери производительности составляют 30,72%. Потери производительности из-за машин составляют 13,43 днищ в час и из-за буферов 5,58. Узкое место в системе – операция под названием “Wheel housing”.

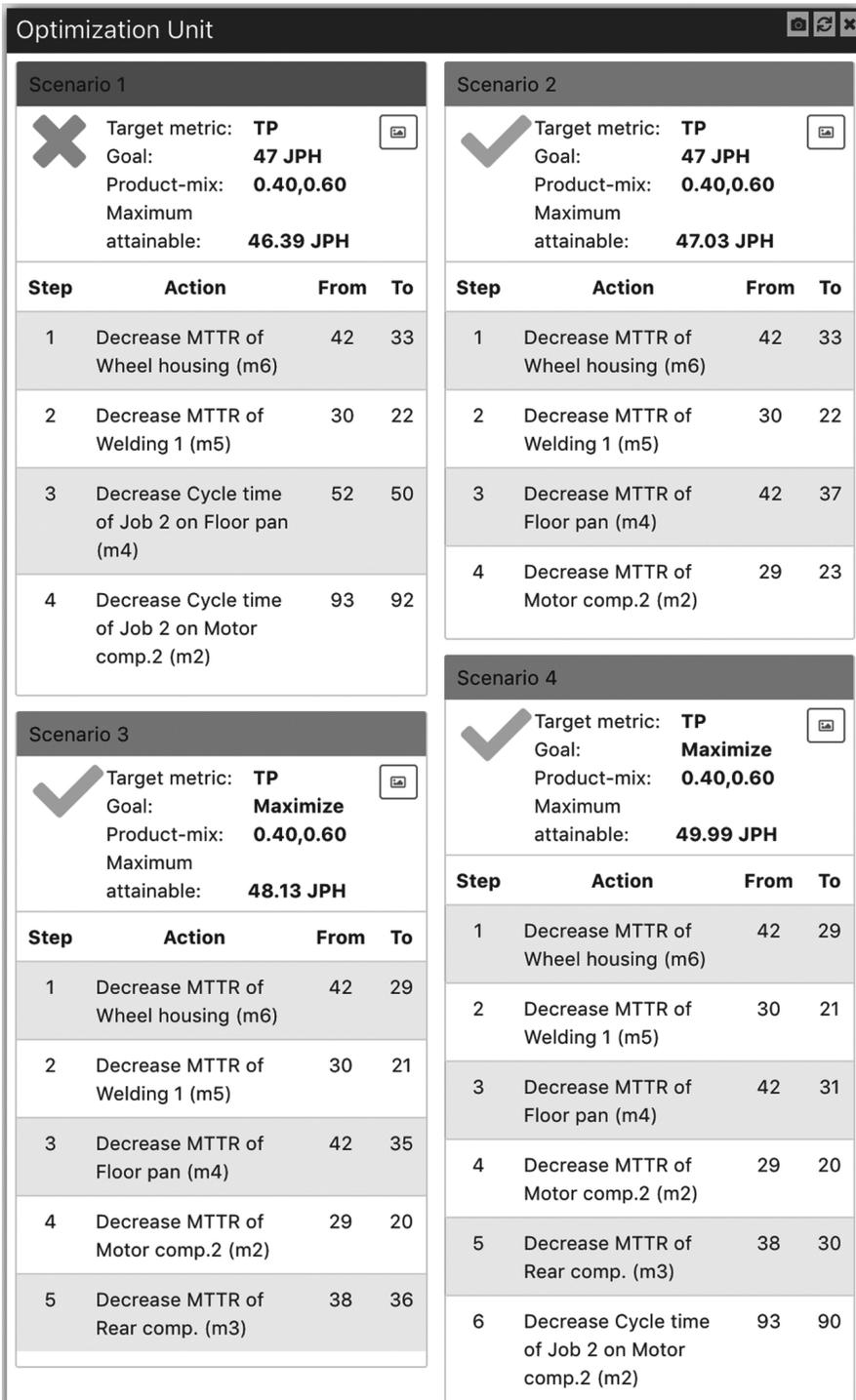


Рис. 7. Производительность и модификация оборудования системы сборки автомобильного днища в соответствии со сценариями 1–4.

Основываясь на этой информации, менеджер формулирует четыре сценария возможного улучшения системы. Они показаны на рис. 6. Первые два нацелены на 10% увеличение ПС за счет уменьшения СВР и цикла машины, как указано на рис. 6. Другие два сценария нацелены на максимизацию ПС за счет указанных на рис. 6 модификаций.

Выход ОБ показан на рис. 7. Оказывается, что сценарий 1 не приводит к желаемому результату, в то время как сценарий 2 может быть осуществлен с помощью указанных на рисунке модификаций оборудования. Сценарии 3 и 4 тоже могут быть осуществлены и приводят к производительности почти 50 дниц в час.

Выбирая для осуществления сценарий 2, получаем ПС = 47,69 дниц в час, т.е., как и ожидалось, рост производительности в 11%.

8. Умная система горячего цинкования

Горячее цинкование представляет собой малую производственную систему, предназначенную для покрытия железных листов слоем цинка, чтобы избежать окисления и ржавления. Ее главная особенность заключается в том, что она не имеет аппаратно ограниченных буферов. Это приводит к чрезмерно большому незавершенному производству (НП) и, как результат, длительному ВП. Цель ИПС в этом случае состоит в том, чтобы увеличить ПС и уменьшить ВП, используя управление с обратной связью на основе метода, описанного в подразделе 4.4. Ниже приведена иллюстрация этих операций ИПС.

Состояние здоровья этой системы представлено на рис. 8. Оказывается, что потери производительности составляют 19,26% и, что особенно неприятно, ВП = 1026 минут. Поэтому для улучшения этой системы ПС должна быть увеличена (см. сценарии на рис. 9) и допуск сырья должен регулироваться с помощью обратной связи, как описано в подразделе 4.4. А именно, определяя желаемую ПС = 28 деталей в час и желаемое ВП = 20 мин, ИПС вычисляет величины почасового допуска сырья и параметры обратной связи для достижения этой цели. Результаты вычислений показаны на рис. 10.

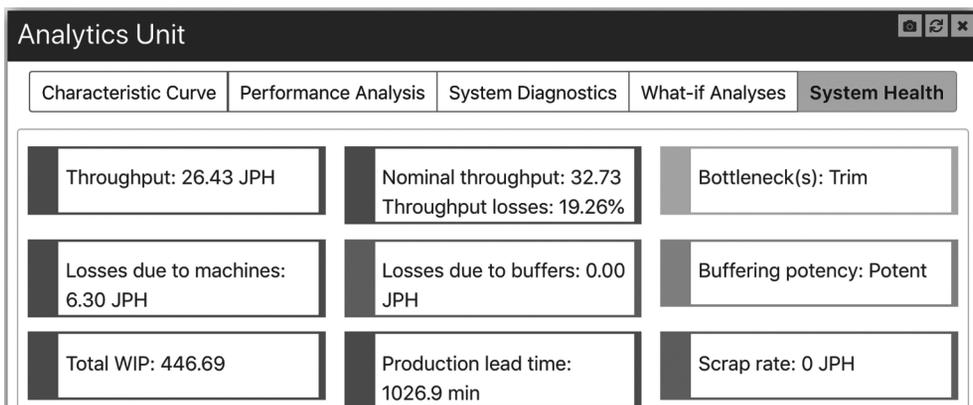


Рис. 8. “Здоровье системы” горячего цинкования.

Managerial Input

+Add new DPI/AAS scenario

Scenario 1 🗑️

Target metric: **Throughput** Decrease MTTR of **at most 2** machines by at most **50.0%**.

Goal: **29 JPH**

Scenario 2 🗑️

Target metric: **Throughput** Decrease cycle time of **at most 2** machines by at most **20.0%**.

Goal: **29 JPH**

Рис. 9. Сценарии увеличения ПС в системе горячего цинкования.

Analytics Unit

Characteristic Curve Performance Analysis System Diagnostics What-if Analyses System Health

Lead time unit for analysis: Seconds Minutes Hours Cycle time: 1.83 Minutes

Lead time (Minutes)

release rate (per cycle)

LTd	20	Minutes
RI	60	Minutes
Calculate >		

Per-cycle release rate	0.8765
Per-RI release rate	28 parts / 60 Minutes
WIP in release buffer	1.16
WIP	1.16, 1.06, 2.12, 0.97, 6.38
Total WIP	12.84
Closed-loop WIP threshold	5
Optimal CONWIP	5

Рис. 10. Характеристическая кривая и параметры обратной связи для допуска сырья в системе горячего цинкования.

Оказывается, что для обеспечения желаемого поведения допуск сырья должен быть 28 деталей в час и осуществляться, только когда $НП \leq 5$. При этих условиях система оперирует на колене характеристической кривой, как показано на рис. 10.

9. Выводы и планы

Статья представляет структуру и аналитику ППС как центрального элемента ИПС. Основным требованием для успешной работы ИПС является наличие достоверных данных о состоянии производственного оборудования в режиме реального времени. В большинстве случаев эти данные можно получить из ПЛК, используемых для автоматизации оборудования.

Хотя представленные результаты обнадеживают, ряд проблем, связанных с ППС, остается открытым. Эти проблемы следующие:

- Разработать метод автоматической очистки и проверки данных. Весьма распространенный факт, что данные, собранные на заводской площадке, содержат ошибки. Невозможность обнаружить и исправить эти ошибки снижает точность параметрической модели, используемой в ИБ.
- Разработать аналитические методы для работы ИПС в переходных режимах, т.е. использовать не усредненные показатели производительности, а их значения в реальном времени.
- Провести анализ чувствительности к различным параметрам машины (например, τ , СВМО, СВР и т.д.). Это увеличило бы эффективность алгоритмов поиска, используемых в ОБ.
- Разработать процедуры поиска для одновременной оптимизации нескольких показателей производительности, например, ПП и ВП (в рамках многокритериальной оптимизации).

Хотя решение каждой из этих открытых проблем имеет важное значение, главными задачами предстоящей работы являются применения ИПС в крупных, средних и малых производственных организациях.

Сокращения и обозначения

Соответствие русских и английских терминов и аббревиатур

Русские аббревиатуры	Английские аббревиатуры
АБ – аналитический блок	AU – analytics unit
АП – автономная производительность машины	SAT – stand-alone throughput
БМ – вероятность блокировки машины	BL – blockage
ВП – время производства	LT – lead time
ГМ – вероятность голодания машины	ST – starvation
ДМО – допустимая модификация оборудования	AAS – admissible action space
З – зажатость	severity
ИБ – информационный блок	IU – information unit
ИПС – интеллектуальная производственная система	SPS – smart production system

ММ – математическая модель	MM – mathematical model
МП – менеджер производства	OM – operations manager
НД – набор деталей	product-mix
НП – незавершенное производство	WIP – work-in-process
ОБ – оптимизационный блок	OU – optimization unit
ПЛК – программируемый логический контроллер	PLC – programmable logic controller
ПП – портрет производительности	PP – performance portrait
ППС – программируемый производственный советник	PMA – programmable manufacturing advisor
ПС – пропускная способность	TP – throughput
СВМО – среднее время между отказами	MTBF – mean time between failures
СВР – среднее время ремонта	MTTR – mean time to repair
СП – скорость производства	PR – production rate
ТПП – требуемое повышение производительности	DPI – desired productivity improvement
ТПС – теория производственных систем	PSE – production systems engineering
УМ – узкое место	BN – bottleneck
ХК – характеристическая кривая	CC – characteristic curve

Обозначения: b – буфер; c – производительность машины; e – эффективность машины; E – допуск сырья; g – показатель качества машины; H – количество машинных циклов в единицу времени; λ – параметр экспоненциального распределения времени работы машины; m – машина; μ – параметр экспоненциального распределения времени ремонта машины; N – емкость буфера; Q_g – количество недефектных деталей; Q_{total} – количество произведенных деталей; τ – цикл машины; $t_{down,i}$ – продолжительность случайного времени простоя; $t_{up,i}$ – продолжительность случайного времени работы; T_{down} – среднее время простоя; T_{up} – среднее время работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Li J., Meerkov S.M.* Production Systems Engineering. Springer, 2009. (Chinese translation, 2012.)
2. *Meerkov S.M., Yan C.B.* Production lead time in serial lines: Evaluation, analysis, and control // IEEE Transac. Automat. Sci. Engineer. 2016. V. 13. No. 2. P. 663–675.
3. *Alavian P., Denno P., Meerkov S.M.* Multi-job production systems: Definition, problems, and product-mix performance portrait of serial lines // Int. J. Product. Res. 2017. V. 55. No. 24. P. 7276–7301.
4. *Bolton W.* Programmable Logic Controllers. N.Y.: Newnes, 2015.
5. *Kagermann H., Helbig J., Hellinger A., Wahlster W.* Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry. 2013. Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Forschungsunion.
6. *Schlechtendahl J., Keinert M., Kretschmer F., Lechler A., Verl A.* Making existing production systems Industry 4.0-ready // Product. Engineer. 2015. V. 9. No. 1. P. 143–148.

7. *Liao Y., Deschamps F., Loures E.F.R., Ramos L.F.P.* Past, present and future of Industry 4.0 – A systematic literature review and research agenda proposal // *Int. J. Product. Res.* 2017. V. 55. No. 12. P. 3609–3629.
8. *Law A.M., Kelton W.D., Kelton W.D.* Simulation Modeling and Analysis. V. 2. N.Y.: McGraw-Hill, 1991.
9. *Jerry B.* Discrete Event System Simulation. Pearson Education, 2005.
10. *Altiok T., Melamed B.* Simulation Modeling and Analysis with Arena. Elsevier, 2010.
11. *Севастьянов Б.А.* Задача о влиянии емкости бункеров на среднее время простоя автоматической линии станков // *Теория вероятностей и ее применения.* 1962. Т. 7. № 4. С. 438–447.
12. *Buzacott J.A.* Automatic transfer lines with buffer stocks // *Int. J. Product. Res.* 1967. V. 5. No. 3. P. 183–200.
13. *Viswanadham N., Narahari Y.* Performance Modeling of Automated Manufacturing Systems. Prentice Hall, N.J.: Englewood Cliff. 1992.
14. *Askin R.G., Standridge C.R.* Modeling and Analysis of Manufacturing Systems. N.Y.: Wiley, 1993.
15. *Buzacott J.A., Shanthikumar J.G.* Stochastic Models of Manufacturing Systems. Prentice Hall, N.J.: Englewood Cliff, 1993.
16. *Papadopoulos H.T., Heavey C., Browne J.* Queueing Theory in Manufacturing Systems Analysis and Design. Chapman and Hill, London, UK, 1993.
17. *Gershwin S.B.* Manufacturing Systems Engineering. Prentice Hall, N.J.: Englewood Cliff, 1994.
18. *Altiok T.* Performance Analysis of Manufacturing Systems. N.Y.: Springer-Verlag, 1997.
19. *Papadopoulos T.C., O’Kelly M.E.J., Vidalis M.I., Spinellis D.* Analysis and Design of Discrete Part Production Lines. Springer, 2009.
20. *Curry G.L., Feldman R.M.* Manufacturing Systems Modeling and Analysis. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
21. *Alavian P., Eun Y., Liu K., Meerkov S.M., Zhang L.* The (α, β) -precise estimates of MTBF and MTTR: Definitions, calculations, and induced effect on machine efficiency evaluation // The 9th IFAC Conf. Manufactur. Model., Management and Control (MIM’2019), Berlin, Germany, August 2019. Also, uploaded at http://web.eecs.umich.edu/~smm/publications/mtbf_mttr_estimates.pdf
22. *Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Е.* Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959.
23. *Khalil H.K.* Nonlinear Systems. Prentice Hall, N.J.: Upper Saddle River, 2002.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.В. Назиньм.

Поступила в редакцию 13.07.2018

После доработки 05.09.2018

Принята к публикации 08.11.2018