УДК 658.511

Е. А. Скорнякова, В. М. Васюков, В. Ш. Сулаберидзе

Методы алгоритмизации планирования высокопроизводительного сборочного производства

Проведен анализ наиболее популярных систем планирования производства. К основному их недостатку относится отсутствие инструментов бережливого производства. Существует потребность в создании систем, ориентированных на клиента и учитывающих бережливые принципы. Описан уникальный алгоритм расчета оптимального времени такта, заложенный в основу разработанной системы планирования. Приведены методы алгоритмизации процесса планирования и результаты создания плана с использованием нескольких алгоритмов.

Ключевые слова: производственное планирование, время такта, алгоритмизация планирования, бережливое производство, высокопроизводительное предприятие.

Автоматизация процесса производственного планирования является обязательным условием для промышленных предприятий, стремящихся поддерживать качество изготавливаемой продукции и повышать спрос на нее. Несмотря на большое количество разработанных методик в области производственного планирования, их внедрение в производственный процесс и применение на практике вызывает серьезные трудности. Особенно эта проблема актуальна для высокопроизводительных предприятий, имеющих поточную организацию производства. Наибольшую известность получили системы *MRP II* [1] и *ERP* [2], а также более современные системы *CSRP*, *MES* и *APS*. В зависимости от целей планирования и функций, которые должны быть автоматизированы, руководство выбирает к внедрению одну или несколько систем. Следует отметить, что значительное число разработок связано с системами оперативного планирования. Эта область планирования является одной из самых изученных, но и наиболее сложных ввиду ряда факторов, таких как специфика производимой продукции и технологических процессов. Следует отметить, что указанные системы не имеют в своем арсенале инструментов бережливого производства, необходимых для эффективного управления производством. Некоторые из систем включают функции выравнивания плана [2] по определенным критериям, но это выравнивание носит условный характер. К ключевым инструментам и методам береж-

ливого производства, которые являются обязательными при планировании относятся:

- цикл *PDCA*, реализованный в виде элементов автоматизированной системы, включающей планирование сроков сбора данных для плана и его создания, обязательную оценку плана, анализ отклонений процесса и меры по устранению этих отклонений;
- стандартизированная работа, выраженная в планировании производства и производственных процессов на основе расчета оптимального времени такта;
- процесс постоянного обмена информацией *Nemawashi* – осуществление оперативного обмена данными за счет использования единой информационной среды;
- визуализация, выраженная в возможности системы представлять результаты построенного плана в виде наглядных графиков и таблиц.

Также следует отметить, что эти системы относятся к выталкивающему типу (*push systems*) [1], а это в принципе противоречит бережливому производству.

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных вопросам организации поточных производств и разработке автоматизированных систем планирования, следует отметить, что не сформулированы идеи оперативного создания планов с плавающим горизонтом планирования на основе расчета оптимального времени такта в автоматизированной системе. Проводимые исследования нацелены на автоматизацию планирования [3, 4] высокопроизводительного предприятия, процессы которого организованы в виде потока.

Ключевым элементом процесса планирования поточного производства является время такта (ВТ) [5]. ВТ представляет скорость, с которой клиент хочет получать единицу готовой продукции и которая в общем случае рассчитывается как отношение доступного для производства времени к общему количеству единиц заказанной продукции.

Также на основе собранной статистики по простоям производства в формулу может быть заложен некий поправочный коэффициент (коэффициент операционной производительности $K_{оп}$).

С учетом коэффициента операционной производительности объем производства можно рассчитать по формуле

$$Q_{п} = \frac{t_{\text{дост.раб}}}{\text{ВТ}} K_{оп}, \quad (1)$$

где $Q_{п}$ – количество произведенных продуктов;

$t_{\text{дост.раб}}$ – доступное для производства время;

ВТ – время такта;

$K_{оп}$ – коэффициент операционной производительности.

Доступное для производства время рассчитывается по формуле

$$t_{\text{дост.раб}} = t_{\text{общ}} - t_{\text{пл.ост}},$$

где $t_{\text{общ}}$ – общее рабочее время;

$t_{\text{пл.ост}}$ – плановые остановки.

При этом следует отметить, что полученное значение обязательно должно быть округлено в меньшую сторону, в противном случае результат производства за смену всегда будет ниже плана. Эта проблема особенно актуальна для высокопроизводительных производств, так как ввиду больших объемов количеству в 1–2 единицы продукции не придается большого значения, но в результате неправильного использования формулы за месяц накапливается отставание в десятки единиц продукции. Происходят эти ошибки чаще всего при построении плана в приложениях пакета *Microsoft Office*, так как при отсутствии в формуле расчета явного округления в меньшую сторону оно автоматически округляется в большую. В итоге незначительные на первый взгляд ошибки в расчетах приводят к постоянным переработкам сотруд-

ников линии сверх установленного времени и, как следствие, влияют на моральное и физическое состояние работников производства.

Доступное для производства время ($t_{\text{дост.раб}}$) представляет собой общее рабочее время смены за вычетом плановых остановок.

Коэффициент $K_{оп}$ позволяет закладывать в план риски, связанные с внеплановыми остановками по причине возможных дефектов, внедрением в производство различных проектов, производством тестовых партий продуктов, тестированием нового оборудования и т. д.

В созданной системе планирования каждый из участников (цеха, отделы) имеет возможность задать свою цель по $K_{оп}$ с обязательным указанием причины. В таком случае при построении плана система выявляет минимальный $K_{оп}$ ($K_{оп\min}$) для каждой смены и использует его для расчетов.

В идеальном случае объем производства полностью соответствует заказу на производство, т. е. продукция должна поставляться точно в срок (*Just In Time*), но практически всегда это условие не соблюдается ввиду стремления производителя использовать свои ресурсы максимально эффективно, поэтому был введен следующий критерий построения плана:

$$\begin{cases} \Delta = Q_{п} - Q_3; \\ \Delta \rightarrow \min, \end{cases} \quad (2)$$

где Q_3 – количество заказанной продукции.

При построении плана решается следующее неравенство:

$$\sum_{i=0}^n Q_{3i} \leq \sum_{j=0}^m K_{оп\min_j} \frac{t_{\text{дост.раб}_j}}{\text{ВТ}_j}, \quad (3)$$

где i — вид продукта, $i \in 1...n$;

j – количество смен.

В случае если данное неравенство не решается, вводятся дополнительные рабочие смены:

$$\sum_{i=0}^n Q_{3i} \leq \left(\sum_{j=0}^m K_{оп\min_j} \frac{t_{\text{дост.раб}_j}}{\text{ВТ}_j} + \sum_{k=0}^l K_{оп\min_k} \frac{t_{\text{дост.раб}_k}}{\text{ВТ}_k} \right), \quad (4)$$

где k – количество дополнительных смен.

Также задача построения оптимального плана может быть решена с использованием теории графов [6], где вес узлов – производительность смены ($Q_{a,b,c}$, в которой a – номер недели в году; b – номер дня в неделе; c – номер смены), а вес ребра – сложность организации смены (W), определенная экспертным методом. Чтобы граф было удобнее читать для веса ребра W введены индексы x и y , обозначающие предыдущую и последующую смены соответственно.

На рис. 1 приведен граф, описывающий алгоритм построения плана производства.

В качестве временной единицы построения плана выбрана неделя. Данная единица оптимальна для описания выбранного алгоритма, так как учитывает все основные критерии построения плана, задаваемые специалистом по планированию (количество смен и работа в выходной день). Следует отметить, что такой вид графа позволяет учитывать особенности российского законодательства в части Трудового кодекса Российской Федерации – добавлять в план работы в выходной день и изменять рабочий график (график сменности) с учетом

определенных временных требований, заданных специалистом по планированию.

На рис. 2 приведен пример построения плана производства для одной рабочей недели с ВТ в 3,2 минуты, плановой остановкой производства в пятницу.

При обходе данного графа можно формировать маршруты с требуемыми показателями веса и выбирать оптимальный маршрут.

Также следует отметить, что при создании программного продукта разработка алгоритма, заложенного в основу автоматизированной системы, проводилась в несколько этапов. Первоначально был использован алгоритм (А1), рассчитывающий идеальное ВТ для определенных временных промежутков, задаваемых цехами и подразделениями предприятия как минимальный интервал времени ($T_{\text{смены}}$) с одним ВТ, т. е. интервал времени, за который цех или производственное подразделение может подготовиться к переходу на новое ВТ. Подготовка осуществляется следующим образом: на основе текущих стандартных операционных карт [7] проводится анализ времени цикла каждой операции

Рис. 1. Ориентированный граф построения производственного плана

Рис. 2. Представление задачи построения производственного плана в виде ориентированного графа

и проектируются новые производственные процессы со временем цикла, максимально приближенным или равным ВТ, на которое планируется переход.

В качестве альтернативного был создан алгоритм (А2) (рис. 3), учитывающий $T_{\text{смены}}$, но для поиска идеальной Δ (использовано обозначение D для дельты разных промежутков)

Рис. 3. Алгоритм расчета ВТ для разных временных промежутков

рассчитывающий различные варианты ВТ для промежутков разной длительности. Интервал является фиксированным значением, временные промежутки, в которые используется одно время такта, должны отвечать условию:

$$T_i \geq T_{\text{смены}} \text{ при } i \in 0 \dots n, \quad (5)$$

где T_i – временные промежутки различной длины.

Также должно выполняться следующее условие, которое ограничивает ВТ, возможное к использованию для выполнения заказа:

$$BT_i \geq BC_{\text{max}} \text{ при } i \in 0 \dots n, \quad (6)$$

где BT_i – время такта, рассчитываемое для различных временных промежутков;

BC_{max} – максимальное значение времени цикла, полученное на основе информации от производственных подразделений (максимальная скорость оборудования или ограничения ручного процесса).

$T_{\text{смены}}$ и BC_{max} определяются из сводной таблицы в базе данных автоматизированной системы.

С целью выявления оптимального алгоритма была проведена апробация результатов исследования в процессе производственного планирования. Для проверки алгоритмов выявления наилучшего, построение планов было осуществлено для заказа (31), учитывающего прогноз спроса на продукцию на 24 производственных периода, и заказа (32), характеризующегося значительно возросшим спросом в середине заказа (рис. 4). Исходные данные следующие: $T_{\text{смены}}$ – 60 календарных

дней; $BC_{\text{max}} = 160$ с; $t_{\text{общ}} = 480$ мин. День, с которого возможен переход на новое ВТ, – понедельник.

Данные по рабочему времени, плановым остановкам производства и коэффициенту $K_{\text{оп}}$ для каждой рабочей смены на два года представляют большой массив, поэтому не приведены в настоящей статье.

Для создания планов с целью определения оптимального алгоритма было проведено сравнение трех вариантов построения планов производства: ручное построение плана (РП), алгоритм 1 (А1) и алгоритм 2 (А2).

Выполнение заказов осуществлялось тремя путями: только ВТ, ВТ и возможные рабочие выходные (ВТ + рабочие выходные), ВТ, возможные рабочие выходные и введение дополнительной смены (ВТ + рабочие выходные + дополнительные смены).

Результаты экспериментов приведены ниже. Так, на рис. 5, а показано кумулятивное (накопительное) значение Δ планов, построенных для выполнения первого заказа двумя путями – только ВТ и ВТ + рабочие выходные. Для второго заказа приведен только график (рис. 5, б), отражающий кумулятивное значение Δ (кумулятивную Δ) для плана, построенного с использованием ВТ + рабочие выходные + дополнительные смены; так как второй заказ значительно превышает производственные мощности и кумулятивную Δ планов, построенных другими путями, и имеет слишком большой разброс значений, полученные графики не являются наглядными.

Рис. 4. Заказы на производство продукции:
■ – 31; ■ – 32

Рис. 5. Результаты экспериментов:

а – кумулятивная Δ планов, построенных для выполнения 31; — — — — — только ВТ (РП); — — — — — только ВТ (А1); — — — — — только ВТ (А2); — — — — — ВТ + рабочие выходные (РП); — — — — — ВТ + рабочие выходные (А1); — — — — — ВТ + рабочие выходные (А2); б – кумулятивная Δ планов, построенных для выполнения 32; — — — — — РП; — — — — — А1; — — — — — А2

Учитывая объемы заказа и ограничения $T_{\text{смены}}$ и $ВЦ_{\text{max}}$, можно отметить, что достижение нулевой Δ для каждого производственного периода невозможно. Поэтому выбор наилучшего алгоритма осуществлялся исходя из:

- количества периодов, в которых кумулятивная Δ приближена к нулю (кумулятивная $\Delta = \pm 50$);

- наименьшего значения кумулятивной Δ ;
- наибольшего значения кумулятивной Δ .

Значения каждого из критериев для планов, показанных на рис. 5, приведены в таблице.

Практически во всех случаях построения плана благодаря А2 наименьшая кумулятивная Δ достигается чаще, чем в случае с ручным построением плана и А1 (см. таблицу).

Анализ построенных планов

Критерий	Заказ 1						Заказ 2		
	Только ВТ			ВТ + рабочие выходные			ВТ + рабочие выходные + дополнительные смены		
	РП	А1	А2	РП	А1	А2	РП	А1	А2
Количество периодов, для которых кумулятивная $\Delta = \pm 50$	2	0	5	4	3	4	1	4	5
Наименьшее значение кумулятивной Δ	-1518	-2017	-1521	-1358	-1525	-1521	-6778	-7335	-6607
Наибольшее значение кумулятивной Δ	1347	195	528	1449	259	463	1107	566	334

Критерии наименьшего и наибольшего значения кумулятивной Δ оценивались в совокупности, и для двух случаев из трех А2 обладает наилучшим их сочетанием. В случае плана для 31, построенного с использованием ВТ и рабочих выходных по А1, следует отметить, что был получен достаточно длительный период, характеризующийся отрицательной кумулятивной Δ (см. рис. 5, а), что говорит о длительном невыполнении заказа, и такой план не может быть выбран в качестве наилучшего. Учитывая проведенный анализ созданных планов, в качестве оптимального был выбран А2.

Разработанный алгоритм создания плана производства заложен в основу автоматизированной системы производственного планирования, реализованной в виде веб-сайта. Такой вариант реализации позволяет осуществлять работу с системой только при наличии доступа в Интернет и не имеет специфических системных требований. Следует отметить, что программный продукт создавали на основе исходного задания, сформулированного специалистами по планированию. Каждый из элементов тестировали и дорабатывали на всех стадиях разработки с учетом специфики исследуемого процесса. Проведенные исследования показали повышение результативности процесса производственного планирования за счет внедрения автоматизированной системы, выраженные в полном соблюдении сроков сбора информации для построения производственного плана благодаря автоматически рассылаемым уведомлениям, уменьшению времени создания плана производства с 30 до 1 мин, исключении ошибок в производственном плане и сокращении времени оценки опций в среднем на

80 % [8]. Результаты проведенных исследований внедрены на приборостроительном предприятии АО «Лазерные системы».

Список литературы

1. Гаврилов Д. А. Управление производством на базе стандартов MRP II. СПб.: Питер, 2005. 416 с.
2. Евгеньев Г. Б. Основы автоматизации технологических процессов и производств. В 2 т. Т. 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 448 с.
3. Скорнякова Е. А. Модель системы оперативного реагирования при производственном планировании // Качество и жизнь. 2018. № 2. С. 39–41.
4. Скорнякова Е. А., Бабаев С. А. Проблемы принятия оперативных управленческих решений из-за отклонений в процессе производственного планирования высокопроизводительного предприятия // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2018. № 4. С. 35–39.
5. Лайкер Дж. Дао Toyota: 14 принципов менеджмента ведущей компании мира. М.: Альпина Паблишер, 2014. 400 с.
6. Кофман А. Введение в прикладную комбинаторику. М.: Наука, 1975. 480 с.
7. ГОСТ Р 56908–2016. Бережливое производство. Стандартизация работы. М.: Стандартинформ, 2017. 11 с.
8. Скорнякова Е. А., Сулаберидзе В. Ш. Проблемы автоматизации процесса производственного планирования // Сборник тезисов Всероссийской научно-технической конференции «Наука и АСУ – 2018». Москва, 2018. С. 67.

Поступила 10.12.18

Скорнякова Елизавета Алексеевна – старший преподаватель кафедры «Метрологическое обеспечение инновационных технологий и промышленной безопасности» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: планирование производства, автоматизация производственных процессов, бережливое производство.

Васюков Василий Михайлович – индивидуальный предприниматель Васюков Василий Михайлович, г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: информационные системы и компьютерные технологии.

Сулаберидзе Владимир Шалвович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры «Метрологическое обеспечение инновационных технологий и промышленной безопасности» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: исследование новых материалов, прикладная метрология.

Algorithmisation methods for scheduling in high-performance assembly manufacturing

The authors analysed the most popular production planning and scheduling software systems. Their main disadvantage is that they lack lean manufacturing tools. There exists a demand for client-oriented systems based on lean principles. The paper describes a unique algorithm for computing the optimum takt time, which forms the basis of the scheduling system developed by the authors. We present methods of algorithmising the scheduling process and results of generating schedules using several algorithms.

Keywords: production scheduling, takt time, algorithmisation of scheduling, lean manufacturing, high-performance enterprise.

Skornyakova Elizaveta Alekseevna – Assistant Professor, Department of Metrological Support of Innovation Technologies and Industrial Security, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg.

Science research interests: production scheduling, manufacturing process automation, lean manufacturing.

Vasyukov Vasily Mikhaylovich – sole proprietor Vasyukov Vasily Mikhaylovich, Saint Petersburg.

Science research interests: data processing systems and digital technologies.

Sulaberidze Vladimir Shalvovich – Doctor of Engineering Sciences, Senior Research Fellow, Professor, Department of Metrological Support of Innovation Technologies and Industrial Security, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg.

Science research interests: investigating novel materials, applied metrology.