

УДК 658.5.011

## СОКРАЩЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦИКЛА НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ МЕТОДОВ МЕНЕДЖМЕНТА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИННОВАЦИЙ

**Г. И. Коршунов,**

доктор техн. наук, профессор

**С. Л. Поляков,**

ассистент, соискатель

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Приводится описание подхода к организации производства на основе применения теории ограничений и формализации производственных процессов монтажа печатных плат. Вводится математическая модель для принятия оптимального решения в условиях ограничений. Показано, что разработанная математическая модель позволяет оптимизировать производственные операции, имеющие наибольшее время выполнения, за счет внедрения технологических инноваций.

**Ключевые слова** — методы организации производства, моделирование производственных процессов.

### Введение

В современных условиях успешное функционирование промышленного предприятия обуславливается применением эффективных методов организации производства и активной инновационной деятельностью [1]. Это обосновывает важность разработки формализованных методов управления предприятием. Предлагаемая работа посвящена описанию подхода к моделированию производственных процессов для повышения эффективности деятельности предприятия на примере контрактного производства электроники. Использование математического моделирования в решении поставленных задач по повышению эффективности позволяет существенно сократить время и ресурсы, а также обеспечивает возможность контроля производства в целом и оптимизации его процессов.

### Моделирование и формализация процессов монтажа печатных плат

Несмотря на устойчивый рост промышленного производства электроники, в данной области наблюдается низкий уровень общей материально-технической базы, что представляет серьезную проблему для большинства промышленных

предприятий. Как правило, реализуемые технологические инновации направлены на приобретение современных технологий и оборудования у зарубежных компаний, что затрудняет переход от сырьевой к инновационной модели развития предприятия. Кроме этого, наличие в отрасли государственных компаний снижает эффективность использования инновационного потенциала российской промышленности из-за отсутствия мотивации к производственному росту, обновлению материально-технической базы и совершенствованию технологических процессов.

Высокий уровень научно-технического потенциала и низкий уровень материально-технической базы предприятий в данной отрасли подтверждают актуальность проблемы повышения эффективности управленческой деятельности на основе количественных методов и моделей принятия решений.

В настоящее время наиболее действенной является процессная модель управления, применяя которую можно рассматривать деятельность предприятия как последовательность взаимосвязанных процессов по производству продукции. При этом в данной модели часто выход одного процесса образует непосредственно вход следующего. Таким образом, анализ производственных процессов как отдельных объектов позволяет управлять ими с максимальной степенью эффек-

тивности на любой стадии производственной деятельности.

Производство электроники включает в себя множество процессов различной сложности и продолжительности. В данной статье рассматриваются процессы монтажа печатных плат — этапа наиболее ответственного и определяющего качество функционирования всего изделия.

Для формализации процессов монтажа печатных плат целесообразно применять процессный подход, тогда весь процесс производства можно представить как совокупность операций, необходимых для достижения конечной цели. Процесс монтажа печатных плат в общем виде включает операции в следующей последовательности:

- входной контроль заготовок печатных плат ( $P_1$ );
- нанесение паяльной пасты ( $P_2$ );
- установка чип-компонентов ( $P_3$ );
- групповая пайка ( $P_4$ );
- контроль качества монтажа ( $P_5$ ).

Тогда весь процесс можно записать в виде

$$P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\}.$$

Одним из основных критериев оценки эффективности деятельности промышленного предприятия является длительность производственного цикла (Lead Time), которая в основном зависит от сложности изделия, материально-технической базы предприятия, эффективности применяемых форм и методов организации производства.

Сокращение длительности производственных процессов является одной из наиболее актуальных задач организации современного производства [2], от которой во многом зависит оценка эффективности деятельности предприятия. Применение процессного подхода дает возможность сократить время выполнения каждого производственного процесса за счет оптимизации его основных показателей, что ведет к сокращению длительности производственного цикла в целом. Для дальнейшего описания процессов необходимо ввести ряд условных обозначений:

$T$  — длительность всего производственного цикла;

$t_i$  — длительность  $i$ -й операции;

$\Delta T$  — сокращение длительности производственного цикла;

$\Delta t_i$  — сокращение длительности  $i$ -й операции.

При этом необходимо соблюдать принцип пропорциональности, который подразумевает соответствие производительности всех процессов друг другу и обеспечивает равномерную нагрузку на всех операциях.

Соблюдение принципа пропорциональности нашло отражение в теории ограничений (Theory of Constraints — TOC) Э. М. Голдратта [3], кото-

рая позволяет выявить и оптимизировать ограничивающий фактор («узкое место»), влияющий на результат производственной деятельности. Выявление ограничений при сокращении длительности производственного цикла производится по наибольшему времени, затрачиваемому на выполнение операции ( $t_{i \max}$ ). Согласно теории Голдратта, «узким местом» будет считаться операция, имеющая максимальное время выполнения ( $P_i(t_{i \max})$ ). Сокращение времени выполнения ограничивающей операции на данном этапе является основной задачей по оптимизации производственных процессов:

$$F(t_{i \max}) \rightarrow \min\{T_i\}.$$

Наиболее эффективным инструментом повышения конкурентоспособности предприятия, позволяющим достичь высоких результатов в условиях ограничений, является оптимизация производственных процессов за счет внедрения технологических инноваций, благодаря которой можно добиться быстрого и необходимого повышения эффективности производственных процессов на основе совершенствования технологии производства.

После расширения «узкого места» возникает необходимость согласования всего производственного цикла и выявления нового ограничивающего фактора, таким образом, происходит «процесс непрерывного улучшения» (Process of on Going Improvement — POOGI).

Применительно к ТОС, когда от ограничивающей операции зависит общая производительность всего цикла, наиболее целесообразным считается использование метода «барабан-буфер-веревка» (Drum-Buffers-Rope — DBR) [4], способного эффективно управлять выявленными ограничениями. В данном методе «узкое место» — это «барабан», который символизирует ограничение в производственном цикле и задает ритм работы для всех производственных процессов. При подчинении всех более производительных процессов ритму «барабанной дроби» работы самого медленного процесса ( $P_i(t_{\max})$ ) происходит выравнивание и стабилизация всего производственного цикла.

Буферные запасы при применении метода DBR способствуют обеспечению «барабана» ресурсами для непрерывной работы. При использовании в производстве автоматической линии по принципу параллельности, когда производственный процесс представляет собой несколько параллельно проводимых операций, буферные запасы теряют свою значимость, поскольку обеспечение ресурсами на каждой операции происходит только после завершения предыдущей операции.

Заключительный термин метода DBR — «веревка», который символизирует связь наиболее производительной операции и «барабана» — операцию, задающую темп всему производственному циклу. Длина «веревки» определяется буферными запасами и ограничивает подачу ресурсов в процесс производства.

Для определения ограничивающего фактора необходимо провести анализ процесса монтажа печатных плат, который включает в себя пять последовательных операций.

На первом этапе производится входной контроль заготовок печатных плат, создаются так называемые буферные запасы для непрерывной работы автоматической линии. Входной контроль заготовок печатных плат ( $P_1$ ) необходим для определения различных дефектов, а также пригодности плат для загрузки в автоматическую линию. Автоматический процесс монтажа печатных плат осуществляется параллельным выполнением основных операций: нанесения паяльной пасты ( $P_2$ ), установки чип-компонентов ( $P_3$ ) и пайки припоя ( $P_4$ ). После конвекционной печи платы принимаются автоматическим разгрузчиком и проводится контроль монтажа печатных плат ( $P_5$ ).

Заготовки поступают в автоматическую линию на операцию нанесения паяльной пасты с помощью автоматического принтера трафаретной печати. Паяльная паста наносится на контактные площадки печатной платы через трафарет, отверстия в котором (апертуры) в точности повторяют рисунок, расположение и форму контактных площадок на плате. С помощью специальных ракелей отверстия трафарета заполняются пастой, и она наносится на контактные площадки платы.

Следующим этапом монтажа является установка чип-компонентов автоматом-установщиком. Основная его задача — правильное размещение чип-компонентов на печатной плате. Перед началом монтажа специальная видеосистема определяет расположение реперных меток на плате и производит ее позиционирование. После этого манипулятор устанавливает компоненты на печатную плату. Последовательность действий, выполняемых оборудованием, выглядит следующим образом: захват компонента из питателя, центрирование его с помощью видеосистемы, установка на плату.

В связи с необходимостью установки большого количества компонентов разного типа данная операция имеет наибольшую длительность из всех операций производственного цикла ( $P_3 (t_3 \max)$ ). Это связано с постоянным ростом требований к радиоэлектронной аппаратуре как по функциональным, так и по эксплуатационным характеристикам, что ведет к увеличению конструк-

тивной сложности печатных плат и, как следствие, к росту количества устанавливаемых компонентов.

После установки компонентов печатная плата транспортируется в конвекционную печь для обеспечения равномерного прогрева всего изделия, плавного управляемого роста температуры до нужного пикового значения и дальнейшего постепенного охлаждения спаянной платы, предотвращающего температурный стресс. На заключительной операции платы принимаются автоматическим разгрузчиком и производится контроль монтажа печатных плат при выполнении требований к качеству по стандарту IPC-A-610C [5].

Устранение ограничений на операции установки чип-компонентов путем внедрения технологических инноваций позволит сократить время производственного цикла за счет оптимизации основных показателей данной операции: производительности по IPC 9850 [6] и количеству автоматических установщиков. Исходя из этого предложен критерий минимизации времени выполнения единичной пайки для автоматического монтажа печатных плат при наличии заданных ограничений.

В данном случае потребуются разработка математической модели для оценки эффективности внедрения технологической инновации и принятия оптимального решения. Одним из основных инструментов решения задач по оптимизации производственных процессов является метод динамического программирования, основанный на выборе оптимального решения по заданному показателю.

В основе метода лежит «принцип оптимальности», сформулированный Р. Беллманом [7]: на каждом шаге управляющее воздействие определяется с учетом его влияния на результат в целом, так как управляющее воздействие, оптимизирующее целевую функцию на данном шаге, не гарантирует оптимальное решение для всего процесса.

Для построения математической модели необходимо ввести условные обозначения:

$S_0$  — начальное состояние системы;

$S_{\text{кон}}$  — конечное состояние системы;

$Y$  — управляющее воздействие, которое приводит систему в конечное состояние. В данном случае под управляющим воздействием понимается распределение ресурсов на применение технологических инноваций на каждом этапе процесса монтажа печатных плат:

$$Y = (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5), 0 \leq y_i,$$

где  $y_i$  — управляющее воздействие на  $i$ -м шаге.

В качестве критерия оптимизации принимаем максимальное время операции  $t_{\max}$ . В этом слу-

чае от  $t_{\max}$  будет зависеть время выполнения всего технологического цикла:

$$T = t_{\max} N,$$

где  $t_{\max}$  — максимальное значение  $t_i$ ;  $N$  — количество операций.

Таким образом, основное уравнение будет иметь вид

$$t_{\max} = \max_{1 \leq i \leq N} (t_i^0 - \Delta t_i(\sigma_i)) \rightarrow \min, \sum_{i=1}^N \sigma_i \leq Y.$$

Определим все состояния системы при переходе из  $S_0$  в  $S_5$ .

На первом шаге под действием переменной управления  $y_1$  система переходит из состояния  $S_0$  в состояние  $S_1$ , т. е.

$$S_1 = S_1(S_0, y_1), 0 \leq y_1 \leq Y, y_1 \in Y.$$

Здесь целевая функция равна  $f_1(S_0, y_1)$ .

На втором шаге под действием переменной управления  $y_2$  система переходит из состояния  $S_1$  в состояние  $S_2$ , т. е.

$$S_2 = S_2(S_1, y_2), 0 \leq y_2 \leq Y, y_2 \in Y.$$

Здесь целевая функция равна  $f_2(S_1, y_2)$ .

На третьем шаге под действием переменной управления  $y_3$  система переходит из состояния  $S_2$  в состояние  $S_3$ , т. е.

$$S_3 = S_3(S_2, y_3), 0 \leq y_3 \leq Y, y_3 \in Y.$$

Здесь целевая функция равна  $f_3(S_2, y_3)$ .

На четвертом шаге под действием переменной управления  $y_4$  система переходит из состояния  $S_3$  в состояние  $S_4$ , т. е.

$$S_4 = S_4(S_3, y_4), 0 \leq y_4 \leq Y, y_4 \in Y.$$

Здесь целевая функция равна  $f_4(S_3, y_4)$ .

На последнем, пятом шаге под действием переменной управления  $y_5$  система переходит из состояния  $S_4$  в состояние  $S_5$ , т. е.

$$S_5 = S_5(S_4, y_5), 0 \leq y_5 \leq Y, y_5 \in Y.$$

Здесь целевая функция равна  $f_5(S_4, y_5)$ .

На каждом этапе выбирается такое управление, которое приводит к оптимальному результату, т. е. обеспечивает максимальное значение критерия минимизации времени ограничивающей операции.

В соответствии с алгоритмом обратной прогонки определим оптимальное управление для всех состояний на каждом шаге, начиная с последнего. Вводим последовательность функций  $\{f_k(y)\}$ ,  $k = 1, N$ . Каждая функция имеет смысл минимального времени выполнения  $k$  оставшихся опе-

раций при допустимых управляющих воздействиях  $y$   $0 < y < Y$ :

$$f_k(\sigma) = \max_{1 \leq i \leq k} (t_i^0 - \Delta t_i(\sigma_i)) \rightarrow \min.$$

Для получения функционального уравнения необходимо рассмотреть  $k$  операций, в которых можно применить технологические инновации. Если в  $k$ -й операции применить управляющее воздействие  $y_k$ , то с учетом  $f_k(y)$  минимальное время выполнения  $k$  операций составит

$$f_k(S_k) = \min_{0 \leq \sigma_k \leq \sigma} \left[ \max (t_k^0 - \Delta t_k(\sigma_k), f_{k+1}(S_k)) \right].$$

На последнем шаге оптимальное управление определяется функцией Беллмана, в соответствии с которой

$$f_5(S_5) = \min_{0 \leq \sigma_5 \leq \sigma} (t_5^0 - \Delta t_5(\sigma_5)), \Delta t_5 \geq 0, \sigma_5 \in Y.$$

Дальнейшие вычисления производятся согласно рекуррентному соотношению, связывающему функцию Беллмана на каждом шаге с этой же функцией, но вычисленной на предыдущем:

$$f_4(S_4) = \min_{0 \leq \sigma_4 \leq \sigma} \left[ \max (t_4^0 - \Delta t_4(\sigma_4), f_5(S_4)) \right],$$

$$\Delta t_4 \geq 0, \sigma_4 \in Y;$$

$$f_3(S_3) = \min_{0 \leq \sigma_3 \leq \sigma} \left[ \max (t_3^0 - \Delta t_3(\sigma_3), f_4(S_3)) \right],$$

$$\Delta t_3 \geq 0, \sigma_3 \in Y;$$

$$f_2(S_2) = \min_{0 \leq \sigma_2 \leq \sigma} \left[ \max (t_2^0 - \Delta t_2(\sigma_2), f_3(S_2)) \right],$$

$$\Delta t_2 \geq 0, \sigma_2 \in Y;$$

$$f_1(S_1) = \min_{0 \leq \sigma_1 \leq \sigma} \left[ \max (t_1^0 - \Delta t_1(\sigma_1), f_2(S_1)) \right],$$

$$\Delta t_1 \geq 0, \sigma_1 \in Y.$$

После того как функция Беллмана и соответствующие оптимальные управления найдены для всех шагов с пятого по первый, осуществляется второй этап решения задачи, называемый безусловной оптимизацией и проводимый в обратном порядке, т. е. от  $f_1$  к  $f_N$ . Пользуясь тем, что на первом шаге состояние системы известно — это ее начальное состояние  $S_0$ , можно найти оптимальный результат за все 5 шагов и оптимальное управление на первом шаге, которое этот результат доставляет. После применения этого управления система перейдет в другое состояние, зная которое, можно, пользуясь результатами безусловной оптимизации, найти оптимальное управление на втором шаге, и так далее до последнего пятого шага.

Таким образом определяется оптимальное управление для обеспечения максимального значения критерия минимизации времени ограничивающей операции. В данном случае это приведет к сокращению длительности всего технологического цикла.

### Заключение

Использование ТОС Э. М. Голдратта [8] на базе парадигмы «Throughput (T), Inventory (I), Operating Expenses (OE)», а также известной методики управления ограничениями DBR при анализе производительности процесса монтажа печатных плат дало возможность выявить «узкое место» и определить предел результативности системы и направления последующей оптимизации производственных процессов.

Формализация производственных процессов для повышения эффективности деятельности предприятия на примере контрактного производства электроники позволила найти оптимальный вариант распределения ресурсов и внедрения технологических инноваций. Оптимизация производственных операций, имеющих наибольшее время выполнения операции ( $t_{i \max}$ ), стало возможным благодаря применению процессного подхода и теории ограничений. Так, для операции установки чип-компонентов оказалось целесообразным включение в линию дополнительных автоматических установщиков.

Созданная новая конфигурация технологической линии и выполненная оптимизация распре-

деления функций между установщиками позволили сократить время установки компонентов на печатную плату и существенно увеличить производительность всего процесса.

### Литература

1. Коршунов Г. И. Процессы устойчивого развития контрактного производства электроники в условиях закрытых и открытых инноваций // Научно-технические ведомости. 2011. № 3(121). С. 167–174.
2. Фатхутдинов Р. А. Производственный менеджмент. 4-е изд. — СПб.: Питер, 2003. — 491 с.
3. Элияху М. Голдратт, Джефф Кокс. Цель. Процесс непрерывного совершенствования. — Минск: Попурри, 2009. — 496 с.
4. Детмер У. Теория ограничений Голдратта. Системный подход к непрерывному совершенствованию. — М.: Альпина Паблишер, 2010. — 448 с.
5. IPC-A-610C Стандарт по монтажу РЭА. Допустимые (и не допустимые) дефекты и отклонения. — Нортбрук: IPC, 2000. — 372 с.
6. IPC 9850 Оценка характеристик оборудования для установки компонентов поверхностного монтажа. — Баннокберн: IPC, 2002. — 45 с.
7. Беллман Р. Динамическое программирование. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. — 400 с.
8. Технологии ООО «ПАНТЕС груп». <http://www.pantes.ru> (дата обращения: 01.04.2013).