

Рекомендации по разработке циклограмм автооператорных линий

С того момента, как впервые было подмечено, насколько сильно можно упростить и удешевить разработку и эксплуатацию оборудования за счет использования унифицированных приспособлений, основной задачей разработчика все чаще является создание инструмента, наследующего как можно более широкий спектр возможностей составных частей. Так, при создании электронной вычислительной системы естественным и логичным желанием является попытка сочетания компонентов, равных по вычислительной мощности, с целью исключения слишком ярко выраженного «бутылочного горлышка». Перед оборудованием, сочетающим электронику и сложные механические узлы, задача, как правило, заведомо сужена, и полнота возможностей отдельных элементов зачастую в любом случае не окажется востребована. Но и возможности такого, механизированного инструмента обычно оказываются нарочно урезаны, с подачи маркетологов либо по недоработке конструктора.

Дмитрий Сывороткин
Михаил Гусынин

skb@kz.ryazan.ru

Введение

Так или иначе, любой программно-аппаратный комплекс рано или поздно попадает в руки программиста, предоставляя ему по-настоящему интересную классическую задачу извлечения максимальных возможностей из системы, четко описанной рядом правил и жестких ограничений, заложенных при ее разработке. Одним из очень любопытных примеров подобного рода систем являются промышленные автооператорные линии, о программировании которых и пойдет речь.

Здесь следует сразу определиться, что по большому счету каждой автооператорной линией в каждый момент времени управляют две программы. Первая — программа, управляющая механизмами линии на низком уровне, отслеживающая перемещение операторов, работающая с реле и двигателями, датчиками и клиентским интерфейсом. Общий подход к данной программе в принципе един для всех линий и легко заимствуется с прежних разработок. Частности же слишком зависят от элементной базы. Поэтому в статье будет рассмотрена только вторая программа — циклограмма техпроцесса, от которой зависит как качество продукта, так и эффективность производства.

Основы

Для получения печатной платы заготовки проходят ряд операций, подвергаются различного рода электрохимическим обработкам, перечень и параметры которых зависят от конкретной задачи. Общепринятым способом проведения этих операций является применение специализированных конвейеров — автооператорных линий, состоящих из нескольких позиций и одного или более операторов — механизированных устройств, перемещающих заготовки в соответствии с заложенной циклограммой. В общем случае операторы рассчитаны на осуществление трех видов действий: подъем и опускание стрелы, перемещение на заданную позицию. Соответственно и циклограмма представляет собой перечисление подобных действий с предписанным временем начала их выполнения.

Итак, задача состоит в разработке графика перемещения операторов. Очень простое, очевидное и в принципе единственное решение этой задачи может быть легко получено при условии, что в любой момент времени через обработку автооператорной линией проходит одна заготовка. В таком случае длительность цикла будет равна сумме всех выдержек на всех позициях техпроцесса и сумме времен, необходимых

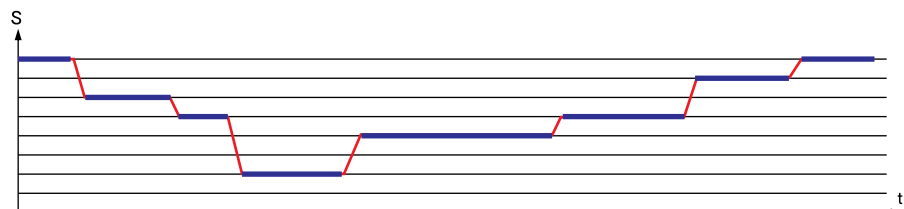


Рис. 1. Пример графика перемещения заготовки без конвейеризации

на перемещения этой заготовки. Именно такое время будет требоваться установке на производство одного изделия. График перемещения заготовки тогда представляет одну замкнутую линию от начала циклограммы к ее концу, как показано на рис. 1.

Суть конвейеризации, а значит, повышения эффективности работы линии, раскроется при одновременном выполнении двух или более равных по длительности частей диаграммы. Например, эффективность того же техпроцесса может быть повышена вдвое при одновременной обработке трех заготовок. В этом случае циклограмма примет вид, показанный на рис. 2.

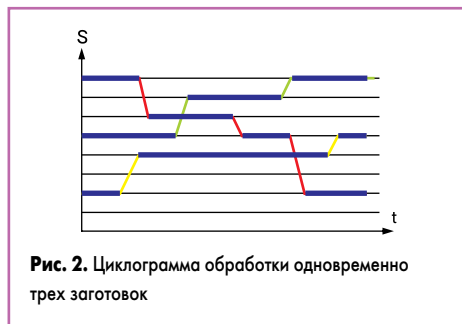


Рис. 2. Циклограмма обработки одновременно трех заготовок

Согласно принципам конвейеризации без ветвлений, каждая заготовка пробудет в обработке то же самое время T , что и без конвейеризации, но одновременно на конвейере в разных стадиях обработки находится K заготовок, что позволяет получать очередное готовое изделие с интервалом T/K .

Конечно, «сворачивать» циклограмму можно не до бесконечности. Помимо очевидного тому препятствия — невозможности нахождения на одной позиции одновременно двух заготовок из разных циклов — нельзя забывать о нескольких важных фактах:

- Единственным условием является необходимость перемещения заготовок с одной позиции на другую в строго определенном порядке, с определенным временем выдержки их на этих позициях.
- Единственная трудность здесь в том, что операторы зачастую перемещаются по одной прямой, что делает невозможным их перекрестное перемещение.
- Единственное допущение — возможность в некоторых пределах варьировать время выдержки заготовок на некоторых этапах обработки.

Исходными данными является, как сказано выше, список позиций, через которые необходимо провести заготовку в ходе обработки с соответствующими длительностями выдержек. Кроме того, для любой автооператорной линии можно выделить ряд величин, необходимых для расчета, не зависящих от заданного техпроцесса: это длительность подъема стрелы оператора, длительность опускания, скорость горизонтального перемещения оператора, количество операторов, минимальное расстояние между центрами операторов (для линий, содержащих более одного оператора), расстояния между позициями линии и время, необходимое на предварительное торможение оператора для точного позиционирования. Для раз-

ных линий может быть предусмотрено разное количество скоростей операторов, но в рамках этой статьи будем исходить из предположения об использовании двухскоростных операторов, то есть с одной тормозной скоростью. Как будет показано далее, учет любого количества скоростей не представляет трудности.

Теперь все происходящее с заготовкой следует разделить на два основных типа действий: пребывание заготовки на позиции и перемещение ее на другую позицию. Рассмотрим эти действия детальнее.

Перемещение заготовки

На рис. 3 показан пример нормальной последовательности действий при перемещении заготовки с пятой позиции на восьмую: подъем заготовки с позиции 5 (время T_u), выдержка после подъема на стекание капель (T_v), горизонтальное перемещение оператора на основной скорости (T_{m1}), перемещение на пониженной скорости перед прибытием на позицию (T_{m2}), опускание заготовки на позицию 8 (T_d).

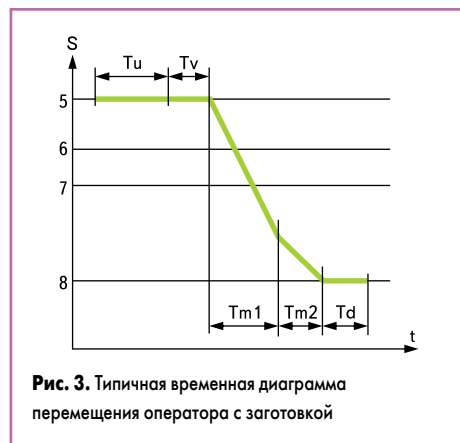


Рис. 3. Типичная временная диаграмма перемещения оператора с заготовкой

Для любой подобной операции характерны следующие особенности:

- График перемещения заготовки можно считать константой, зависящей только от номеров исходной и конечной позиции, следовательно, неизменной для техпроцесса.
- Никакой иной оператор (геометрический центр его) не может приближаться к данной траектории по оси S ближе, чем на величину продольного размера оператора.

Первая особенность позволяет произвести сопутствующие расчеты уже в самом начале работы, а вторая служит отправной точкой для этих расчетов.

Метод теней

На рис. 4 представлена траектория перемещения оператора с заготовкой, дополненная несколькими вспомогательными элементами.

Здесь ломаная линия a представляет саму траекторию оператора. Сведения о возможной скорости горизонтального перемещения операторов позволяют дополнить график линиями b и c — предельными потенциальными траекториями, по которым оператор мог прибыть на заданную позицию для осуществления перемещения. Аналогично линии d

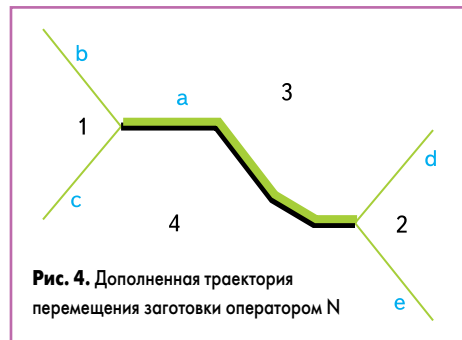


Рис. 4. Дополненная траектория перемещения заготовки оператором N

и e показывают предельные потенциальные траектории дальнейшего передвижения оператора по окончании перемещения заготовки.

Теперь для любого N -ого оператора, которому предстоит выполнить данное перемещение заготовки, можно утверждать следующее:

- Область 1 описывает геометрическое место точек, в которых оператор мог находиться до осуществления рассматриваемого перемещения заготовки.
- Область 2 описывает геометрическое место точек, к которым оператор теоретически может быть перемещен по окончании перемещения заготовки.
- Области 3 и 4 описывают геометрические места точек, в которых оператор N не может находиться, ведь иначе он просто не успеет оказаться в точке соединения линий a , b и c и выполнить рассматриваемое перемещение.
- Любое перемещение, выполняемое оператором N до рассматриваемого перемещения, должно начинаться и оканчиваться в области 1.
- Любое перемещение, выполняемое оператором N после рассматриваемого перемещения, должно начинаться и оканчиваться в области 2.
- Любое присутствующее на графике перемещение, хотя бы одна точка которого принадлежит области 3, может быть выполнено только операторами с меньшим номером ($N-1$, $N-2$...).
- Любое присутствующее на графике перемещение, хотя бы одна точка которого принадлежит области 4, может быть выполнено только операторами с большим номером ($N+1$, $N+2$...).

На рис. 5 показано, как любое перемещение заготовки «отбрасывает тень» на все последующие (и аналогично — предыдущие) позиции автооператорной линии, накладывая



Рис. 5. Иллюстрация происхождения названия метода «теней»

жесткие ограничения на номера операторов, способных выполнить перестановки, хотя бы частично попавшие в «тень».

Дополнения, изложенные выше, получены из исходной информации о скорости операторов. Данные о продольных размерах механизмов операторов позволяют сделать выводы о минимальном допустимом расстоянии между ними. Дополним траекторию оператора расчетными траекториями остальных операторов, опираясь на эти минимально допустимые расстояния.

На рис. 6 показана траектория перестановки оператором N , дополненная на этот раз линией, очерчивающей область возможных положений оператора $N-1$. Если продольный размер оператора принять за L , то становится понятно, что ни оператор $N-1$, ни оператор $N+1$ не могут приблизиться к оператору N на расстояние меньше L . Забегая вперед можно продолжить аналогию: операторы $N-2$ и $N+2$ не могут приблизиться к оператору N ближе, чем на расстояние $2L$, и т. д.

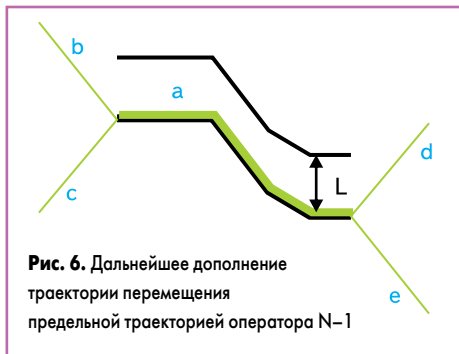


Рис. 6. Дальнейшее дополнение траектории перемещения предельной траекторией оператора $N-1$

Аналогичная предельная грань существует и для оператора $N+1$. Информация о размерах и скоростях остальных операторов также известна из исходных данных об автооператорной линии, что позволяет выполнить полное построение «теней» для двухоператорной линии. Исходным предположением является неопределенность номера оператора, которому предстоит выполнять каждое перемещение, следовательно, для двухоператорной линии нужно рассчитывать, что перемещение будет выполнено оператором N , который может быть как первым, так и вторым, а значит, может отбрасывать тень как для предыдущего оператора $N-1$, так и для последующего $N+1$.

На рис. 7 рассматриваемая перестановка показана зеленой линией. Область возможных положений потенциального предыдущего оператора (с номером $N-1$) очерчена красной линией. Аналогичная область следующего оператора ($N+1$) выделена синей линией.

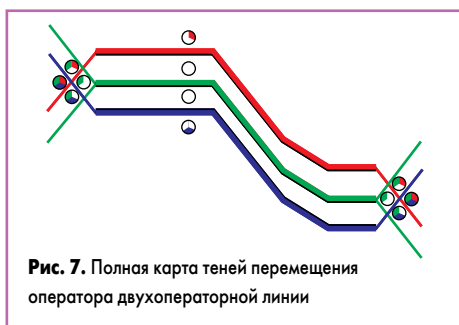


Рис. 7. Полная карта теней перемещения оператора двухоператорной линии

Цветовые пиктограммы показывают, какой автооператор теоретически может находиться в очерченной области.

Для трехоператорной линии необходимо исходить из предположения, что оператор N может быть как первым, так и вторым и третьим. Следовательно, перестановка, выполняемая оператором N , создает тень как для двух последующих операторов ($N-1$ и $N-2$), так и для двух предыдущих ($N+1$ и $N+2$). Соответственно, карта теней для перестановки, выполняемой на трехоператорной линии, будет выглядеть несколько сложнее, как показано на рис. 8.



Рис. 8. Карта теней перестановки трехоператорной линии

Очевидно, аналогичные карты могут быть получены для всех перестановок линий с любым количеством операторов. В этих картах могут быть учтены все индивидуальные нюансы автооператорных линий, такие как иное количество скоростей предварительного торможения, наличие дополнительных выдержек и прочее.

Как было сказано выше, все карты всех перемещений могут быть получены в процессе предварительного расчета циклограммы, не только при ручном, в виде калек, но и при компьютеризированном расчете. На практике, используя метод теней, не составит труда в течение кратчайшего времени изготовить калки с размеченными картами теней для каждой необходимой перестановки.

И, наконец, следует помнить о присутствии еще нескольких границ зон возможного местоположения операторов, существующих независимо от каких-либо их перемещений. Типичная конструкция автооператорной линии позволяет первому оператору перемещаться только от первой позиции к последующим, а последнему — от последней позиции к предыдущим. Таким образом, последний оператор никогда не окажется от первой позиции на расстоянии большем, нежели само расстояние от первой позиции до последней. Следовательно, предпоследний оператор никогда не приблизится к последней позиции ближе, чем на продольный размер оператора, поскольку тот попросту не сможет уступить ему место. Аналогичные выводы справедливы для всех операторов и описывают каждому некоторую ограниченную область по продольной оси автооператорной линии, как показано на рис. 9.

На рис. 9 приведен пример распределения областей, доступных для операторов трехоператорной линии, при минимальном расстоянии L между центрами операторов:

- В зоне 1 может находиться только первый оператор из трех. Ни второй, ни тем

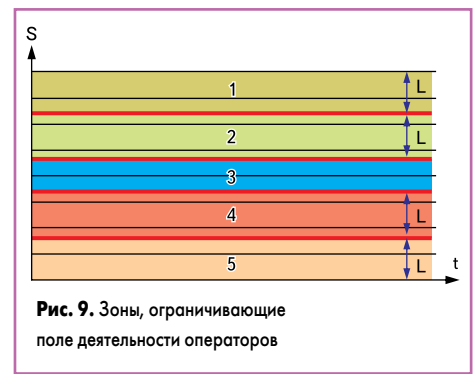


Рис. 9. Зоны, ограничивающие поле деятельности операторов

более третий никогда не смогут войти в эту зону, поскольку первому для этого пришлось бы выехать в зону до первой позиции, что невозможно. Любое перемещение, которое потребуется выполнить согласно техпроцессу, начинающееся, оканчивающееся или пересекающее зону 1, может быть выполнено только первым оператором.

- В зоне 2 могут находиться первый и второй операторы.
- В зоне 3 могут находиться все три оператора.
- Зона 4 доступна для второго и третьего операторов.
- В зоне 5 может оказаться только третий оператор.

Описанные ограничения также не зависят от заданного техпроцесса и являются постоянными величинами для каждой конкретной автооператорной линии.

Рассмотрим на конкретном примере, показанном на рис. 10, возможность применения карт зон покрытия операторов.



Рис. 10. Пример циклограммы

Попробуем по шагам провести анализ этой циклограммы с пронумерованными перемещениями:

- Перемещение 1 начинается с первой позиции, следовательно, выполнить его может только первый автооператор, так же как и перемещение 5.
- Перемещение 1 «отбрасывает тень вверх» на позиции 1, 2 и 3, в которую частично попадает перемещение 3, следовательно, перемещение 3 может быть выполнено только оператором с номером ниже, нежели перемещение 1, что невозможно.
- Перемещение 1 «отбрасывает тень вниз», в которую попадает перемещение 2, следовательно, перемещение 2 может быть выполнено только вторым либо третьим оператором. Полная карта теней точно покажет, может ли данная перестановка быть выполнена третьим оператором.

- Перемещение 4 также находится в тени перемещения 1, но и без того оно касается седьмой, последней позиции, следовательно, может быть выполнено только третьим оператором, так же как и перемещение 6. Но полная карта теней (например) показывает, что перемещение 4 расположено слишком близко к перемещению 1 и его может выполнить только второй оператор: если его попытается выполнить третий, то второму будет некуда деться.
- Перемещение 7 находится (к примеру) на достаточном расстоянии от перемещения 6, и третий оператор, выполняющий перемещение 6, может успеть уступить место на 5-й позиции для второго оператора, чтоб тот выполнил перемещение 7.

Итак, в рассматриваемой циклограмме имеют место два конфликта. Во-первых, перестановка 3 не может быть выполнена никаким оператором, поскольку на нее «отбрасывает тень вверх» перестановка 1, выполняемая первым оператором. Во-вторых, та же перестановка 1 «мешает» второму оператору поместиться между первым оператором и третьим, когда третий выполняет перестановку 4.

Пребывание на позиции

Нельзя не упомянуть об очень важных элементах циклограммы — этапах пребывания заготовок на позициях. В отличие от теней, накладывающих ограничения на перемещение операторов, что является основной проблемой при разработке циклограммы, этапы пребывания на позициях, напротив, представляют собой по большому счету единственный фактор, поддающийся варьированию. Именно это и придает гибкость предопределенной последовательности действий перемещений и выдержек.

Конечно, существуют и иные способы снизить жесткость системы. Например, есть возможность устранения конфликта пересекающихся перемещений, а также продлить время, требуемое на две последовательные технологические операции.

Как показано на рис. 11, перемещение может быть осуществлено не напрямую на требуемую позицию, а через некоторую другую позицию. Показанный на рис. 11 пример позволяет таким образом устранить пересечение перемещений, не изменяя длительности пребывания заготовок ни на одной из позиций. Перемещение 1, будучи выполненным составным

через дополнительную позицию, занимает больше времени, операции 2, 3, 4 и 5 сдвигаются по временной оси вправо, перемещение 5 выходит из конфликта с перемещением 1. Этот способ представляет большие трудности для автоматического компьютеризованного расчета, но о нем нельзя забывать при разработке циклограммы вручную.

Разработка

Хорошие результаты на практике показал алгоритм, в общих чертах описываемый рядом рекомендаций, перечисленных ниже:

- Длительность цикла никогда не будет меньше длительности самой долгой выдержки в сумме со временем подъема стрелы оператора, временем ее опускания и временем перемещение оператора на путь, равный его продольной длине (в случае чередующихся операций, очевидно, следует делить длительность выдержки на количество чередующихся позиций). Именно такую длительность следует брать за отправную точку при дальнейших расчетах.
- Построение циклограммы следует выполнять в соответствии с техпроцессом, начиная хронологически с первой позиции и далее со всеми требуемыми перемещениями. Так, циклограмму, показанную на рис. 10, нужно начинать строить с выдержки на позиции 1, затем дополнить циклограмму перемещением 1, потом выдержку на позиции 4, перемещение 2 и т. д.
- Каждую новую выдержку на позиции следует изначально брать в минимальной допустимой длительности. Впоследствии разрешение конфликтов будет выполняться путем увеличения этих длительностей в рамках допустимого.
- Каждый раз, добавив очередное перемещение, нужно вновь рассмотреть поочередно все выставленные перемещения и отметить, какие именно операторы могут их выполнить. Иначе даже бесконфликтная циклограмма порой может потребовать, например, одновременно пару первых операторов.
- При возникновении любого рода конфликта двух перемещений разрешение его возможно только путем варьирования длительностей выдержек между этими перемещениями. Перемещения и длительности выдержек вне этого «кольца» напрямую не способ-

ны оказать влияние на рассматриваемый конфликт. Так, конфликт перестановок 1 и 4 на рис. 10 может быть решен только изменением длительностей выдержек на позициях 4 и 5. В этом случае следует попытаться устранить проблему увеличением длительности пребывания заготовки на позиции 4. Если этого окажется недостаточно, то увеличению надо подвергнуть выдержку на позиции 5. Если и тогда конфликт перестановок 1 и 4 будет иметь место, можно утверждать, что для выбранной длительности цикла построение циклограммы невозможно. Тогда необходимо увеличить длительность цикла на время, недостающее перестановке 4 для выхода из тени перестановки 1, и начать построение циклограммы заново.

- При определении возможного приращения длительности той или иной операции следует помнить, что многие операции, такие как загрузка, выгрузка, сушка, промывка и многие другие, могут быть увеличены на очень большую величину.
- Иногда может возникнуть желание попытаться рассчитать циклограмму двух техпроцессов, выполняемых одновременно на одной автооператорной линии. ЭВМ сможет оказать в этом неоценимую помощь. Использование предрасчитанных карт теней делает эту задачу с точки зрения компьютера довольно простой. Даже типичная ЭВМ невыдающейся мощности способна построить (либо сделать выводы о невозможности построения) подобную циклограмму за считанные секунды. Порой удается таким образом получить даже более двух параллельно выполняемых техпроцессов.
- При составлении циклограмм, новых для конкретной, уже используемой ранее автооператорной линии, встречаются проблемы, связанные с присутствием лишних штанг для переноса заготовок. Часто все решается снятием с линии таких штанг. Это не лучший способ, штанги бывают довольно массивными. Если присмотреться, можно увидеть, что почти в любую циклограмму можно добавить «холодную» параллельный техпроцесс, в соответствии с которым каждая лишняя штанга будет перемещаться по циклу между двумя-тремя периодически используемыми позициями.

На рис. 12а показана циклограмма, в соответствии с которой на линии могут находиться две штанги с заготовками. Если на линии штанг три, то не составит труда дополнить циклограмму процессом, занятым лишь перемещением лишней штанги с одной позиции на другую. На рис. 12б данный процесс показан желтым цветом.

- Важно, чтобы в момент, символизирующий конец цикла и начало следующего, ни один оператор не находился в движении, поскольку именно с этой точки оси t автооператорная линия начинает работу в момент включения. Но при разработке циклограммы это не должно мешать начать перемещение так, что оно выйдет за пределы расчетного цикла. Это не вызовет проблем: по окончании разработки циклограммы достаточно на оси

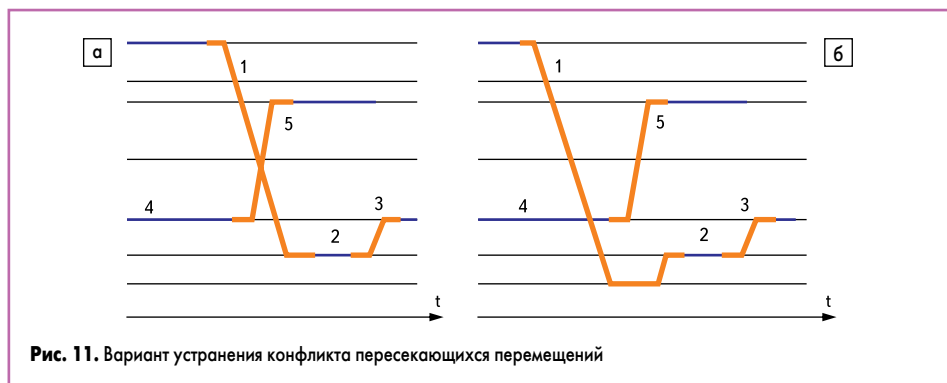


Рис. 11. Вариант устранения конфликта пересекающихся перемещений

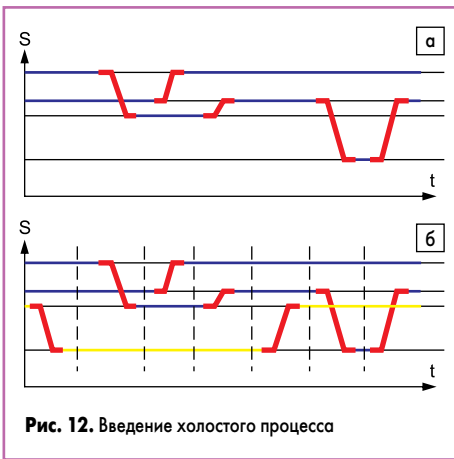


Рис. 12. Введение холостого процесса

времени t найти момент, в котором все три оператора остановлены на какой-либо позиции, и объявить эту точку моментом начала (и конца) цикла. На рис. 12б штрихами показаны некоторые временные срезы, которые можно объявить моментом начала цикла без внесения тем самым каких-либо ошибок.

- Прочие перемещения операторов, не связанные с передвижением заготовки на следующую позицию, конечно, тоже подчиняются правилам и ограничениям карт теней. Но не стоит тратить на них время при разработке циклограммы: корректно и бесконфликтно распределенные перемещения заготовок

гарантируют существование зон свободного перемещения незанятых операторов.

Заключение

Конечно, всегда сложнее реализовать метод программно, тем более если какие-то части его алгоритмов не до конца формализованы, но работать над этим надо обязательно, так же, как и над самими методами. На предприятии ОАО «Завод «Красное знамя» метод расчета циклограмм, рассмотренный в статье, реализован в виде приложения ЭВМ и показывает замечательные результаты. Благодаря ему ряд техпроцессов, проводимых как на покупных, так и на линиях собственной разработки, получил прирост эффективности на 20–80%. Столь же эффективно разрабатываются и новые циклограммы.

Что касается больших масштабов, общая картина, которую можно наблюдать на данный момент, позволяет предположить, что ни отечественная, ни зарубежная промышленность еще длительное время не сможет отказаться от автооператорных линий электрохимической обработки изделий, возможно, за неимением альтернативы. Повсеместно продолжается разработка и внедрение новых линий и модернизация имеющихся под текущие нужды. Даже высококачественные линии,

прекрасно справляющиеся со своими основными обязанностями, все чаще приходится нагружать работой, не оговоренной при их покупке. Поэтому нельзя забывать, что стабильная работа созданного или купленного инструмента — лишь полдела. Чрезвычайная актуальность повышения эффективности производства подталкивает конечного производителя к пониманию важности оптимизации сложных составных процессов, включенных в работу. Идет ли речь о циклограммах автооператорных линий или о любого рода другой логистике, от внимания к этому вопросу будет зависеть будущее всего предприятия.