



## АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ БЕСТРУБОПРОВОДНЫМИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Ю.Е. Генин, И.И. Дубровский,  
В.В. Макаров (РХТУ им. Д.И. Менделеева)

*Описаны процессы моделирования и оптимизации беструбопроводных химико-технологических систем (БТ ХТС), используемых в периодических многопродуктовых химических производствах. Эффективность БТ ХТС зависит от выбора оптимального расписания работы системы, учитывающего ее топологические характеристики. Предложен универсальный алгоритм моделирования и оптимизация расписания работы БТ ХТС произвольной топологии.*

В традиционных многопродуктовых химико-технологических системах (МП ХТС) существенно затруднена или невозможна полная промывка трубопроводов и трубопроводной арматуры, что накладывает существенные ограничения на ассортиментные возможности МП ХТС. Чтобы снять эти ограничения, необходимо найти приемлемое решение проблемы быстрой перенастройки аппаратуры МП ХТС на выпуск следующего продукта в ассортименте.

В настоящее время все большую популярность завоевывает концепция БТ ХТС, которая характеризуется тем, что транспортировка веществ по трубопроводам заменяется перемещением мобильных емкостей вместе с их содержимым от одной технологической станции к другой. Под технологической станцией подразумевается комплекс аппаратов, способных подключиться к мобильной емкости и осуществить некоторую стадию ТП. Этот подход снимает ограничения, налагаемые на ассортиментные возможности ХТС, и минимизирует затраты на промывку и очистку аппаратуры и трубопроводов. Последние носят в БТ ХТС исключительно вспомогательный характер и не оказывают существенного влияния на ТП. Часто они не требуют промывки вообще (исключая ремонт), т. к. используются для транспортировки одного и того же вещества, подаваемого на технологические станции/емкости или отводимого с них. Вследствие того, что управление движением мобильных емкостей можно алгоритмизировать и программно реализовать с помощью ЭВМ, этот подход также допускает автоматизацию производства, что особенно важно при производстве веществ высокой чистоты и фармацевтической продукции.

Поскольку принцип работы БТ ХТС основан на качественно новом подходе к организации транспортировки веществ, требуются высокие затраты на разработку и производство аппаратуры, в рамках которой есть аппараты, не имеющие аналогов в традиционных МП ХТС (ротационных кругов, штуцерной автоматики и др). Кроме того, БТ ХТС обладают сниженной (по сравнению с традиционными многопродуктовыми системами) отказоустойчивостью вследствие конст-

рукционных особенностей транспортных систем и технологических станций. Эти недостатки, тем не менее, являются вполне преодолимыми [1]. Известен ряд фирм, выпускающих технологическое оборудование полифункционального назначения для БТ ХТС широкого профиля. Например, японские компании производят беструбопроводные системы MILOX на самоходных тележках (фирма "Тое эндзи"), ротационные системы MULTIMEX (компания Санредзюкоге), оборудование AIBOS (фирма "Аса эндзи"), многорядные иерархические системы (фирмы Никки) и др.

При использовании БТ ХТС в промышленности необходимо разработать концепцию управления системой, учитывающую конструкционные особенности ее аппаратуры и топологию транспортной подсистемы. Вследствие сниженной (по сравнению с традиционными ХТС) отказоустойчивостью БТ ХТС эта концепция должна позволять системе управления оперативно реагировать на нештатные ситуации, возникающие в процессе работы системы, и соответственно изменять ее расписание работы таким образом, чтобы снизить негативный эффект нештатной ситуации или, как минимум, не допустить аварии. Кроме того, необходимо, чтобы этот подход не был поставлен в зависимость от топологии и структуры конкретной ХТС, т. е. обладал универсальностью в рамках всего спектра БТ ХТС (или хотя бы некоторого их подкласса). Однако описанные в зарубежной литературе принципы управления работой БТ ХТС ориентированы на системы определенной топологии и, следовательно, не обладают достаточной универсальностью.

Использование такой концепции также предоставляет возможность конструировать разнообразные БТ ХТС на базе стандартизированной системы управления, что позволяет снизить затраты на конструирование и производство БТ ХТС, если конструирование и производство осуществляет самостоятельная проектно-производственная организация, выполняющая заказы на производство оборудования, поступающие от химических предприятий.

Для решения поставленной задачи наибольшее значение имеет классификация БП ХТС по тополо-

гическому типу: хордовый, кольцевой, звездообразный и линейный.

Реальная БТ ХТС может быть построена на основе одной из вышеперечисленных топологий или иерархически декомпозируется по этим топологиям. В последнем случае для каждой подсистемы в БТ ХТС используется наиболее подходящая топология; например, хранилище неиспользуемых мобильных емкостей часто бывает построено на основе линейной топологии, а подсистема загрузки/выгрузки продукции имеет звездообразную топологию. Для перемещения мобильных емкостей между технологическими станциями используются рельсовые или крановые транспортные системы.

С начала 90-х гг. появились публикации по различным проблемам создания БТ ХТС и управления ими [1-4]. В частности, рассмотрены концепции работы и интеллектуальные системы управления БТ ХТС [1], специальные конструкции технологических аппаратов для БТ ХТС [2], подходы к моделированию БТ ХТС [3], описаны алгоритмы управления БТ ХТС, а также принципы составления расписания их работы [3, 4].

ЭВМ, выполняющая функции управляющего центра при автоматизации БТ ХТС, решает три задачи:

- *организация интерфейсов* с оператором производственной установки и с автоматической аппаратурой БТ ХТС. Решение этой задачи зависит от топологии БТ ХТС, ее конструктивных особенностей и программного и аппаратного обеспечения управляющей ЭВМ, и не поддается сколько-нибудь значительной универсализации;

- *составление расписания работы* БТ ХТС. Подход к решению этой задачи зависит, в первую очередь, от типа модели, выбранной для представления управляющей системы БТ ХТС; следовательно, если составить модель БТ ХТС, универсальную в рамках максимально широкого спектра топологий БТ ХТС, то составление расписания работы с использованием этой модели также будет обладать универсальностью. В данной работе предлагается использовать для составления расписания работы БТ ХТС модель на основе сетей Петри.

- *оперативная диагностика состояния* БТ ХТС. Решение этой задачи зависит от типа модели, выбранной для представления структуры БТ ХТС, поэтому так же, как и вторая задача поддается универсализации. Эта задача решается непрерывно в течение всего периода функционирования БТ ХТС. Решением является ответ на вопрос: "Следует ли в настоящий момент изменить режим работы БТ ХТС для предотвращения возможной аварийной ситуации?" В случае положительного ответа на данный вопрос должно измениться расписание работы системы.

Для составления репрезентативной модели БТ ХТС важно отметить, что БТ ХТС является дискретно-непрерывной системой, процесс функционирования которой можно представить в виде циклической последовательности смены ее состояний путем пере-

мещения емкостей и осуществления стадий ТП на технологических станциях. Поскольку в контексте поставленной задачи оптимального управления БТ ХТС представляет интерес со стороны ее структурных характеристик, модель БТ ХТС, используемая для решения этой задачи, должна быть структурно подобна самой системе. Можно выделить следующие основные структурные единицы БТ ХТС: технологические станции; перекрестки маршрутов перемещения мобильных емкостей; отрезки маршрутов перемещения мобильных емкостей; мобильные емкости.

Назовем совокупность технологических станций и перекрестков *узлами* БТ ХТС. Узлы соединены между собой отрезками перемещения мобильных емкостей. Эти отрезки характеризуются фиксированными направлениями перемещения емкостей для каждого отрезка и могут быть как однонаправленными, так и двунаправленными.

Модель БТ ХТС может быть реализована либо прямым отображением структуры системы в структуру модели, либо отображением структуры событий системы в структуру модели. Поскольку БТ ХТС рассматривается как дискретная система, то предпочтительнее отображать в модели именно ее событийную структуру. Все события, которые могут произойти в БТ ХТС, можно разделить на три группы [4]:

- начало и завершение процесса обработки содержимого емкости на технологической станции. К этой группе также можно отнести события начала и завершения периода задержки емкости на перекрестке маршрутов;

- начало и завершение процесса перемещения мобильной емкости по отрезку маршрута от одного узла к другому;

- смена состояний "свободно/занято" для узлов и отрезков маршрутов перемещения емкостей. В работе предполагается, что события смены состояний "свободно/занято" совпадают с событиями начала и окончания процессов на узлах и отрезках маршрутов.

Соответственно можно выделить следующие группы состояний БТ ХТС: простоя-обработки емкости на узле БТ ХТС; перемещения емкости по отрезку маршрута.

События могут происходить параллельно друг с другом, если они при этом не создают конфликтной ситуации. Поэтому модель должна допускать возможность одновременной реализации нескольких событий. Наконец, для решения этой задачи очень важно, чтобы модель была легко реализуема алгоритмически и программно.

Исходя из этих требований, для отображения БТ ХТС разработана модель на основе сетей Петри [6, 7]. При построении этой модели были приняты следующие допущения:

- на каждой технологической станции, перекрестке, отрезке маршрутов перемещения мобильных емкостей одновременно может находиться только одна мобильная емкость;

- время, затрачиваемое емкостью на смену отрезка маршрута на перекрестке, стремится к нулю;
- время, затрачиваемое технологической станцией на собственную перенастройку для осуществления соответствующей стадии ТП с содержимым следующей мобильной емкости, строго меньше времени, затрачиваемого на транспортировку предыдущей емкости со станции и следующей емкости на станцию;
- время перенастройки отрезка маршрута перемещения емкости на принятие к перемещению следующей емкости, пренебрежимо мало;
- перемещение емкостей по отрезкам маршрутов перемещения осуществляется независимо друг от друга;
- если емкость находится на перекрестке, она не считается перемещаемой ни по одному из отрезков маршрутов перемещения (т. е. перекресток может рассматриваться как технологическая станция, на которой не осуществляются никакие ТП над содержимым емкости).

Классы и расширения сетей Петри для различных задач моделирования рассмотрены в [8]. Поскольку формирование модели БТ ХТС на основе классической сети Петри может вызвать значительные затруднения, то необходимо использовать ее расширения (классы).

Во-первых, следует отметить, что введение в сеть отдельных вершин для отображения состояний наличия определенных мобильных емкостей на определенных технологических узлах и отрезках неоправданно усложнит структуру сети в зависимости от числа технологических станций, перекрестков, отрезков и емкостей, увеличивая числа вершин и переходов в сети в геометрической прогрессии. Поэтому предлагается использовать раскрашенные сети Петри, чтобы каждая вершина могла отображать несколько состояний, тем самым уменьшая общее число вершин сети [6, 7].

Во-вторых, в классической сети Петри не учитывается фактор времени. Поскольку в БТ ХТС операции перемещения емкостей по маршрутам сопровождаются их задержками (на ожидание своей очереди или на осуществление стадии ТП), то в целях адекватности моделирования необходимо использовать временные сети Петри [7].

В-третьих, в классической сети Петри имеется неопределенность [8, 9], так как из нескольких возможных переходов (т. е. событий перемещения емкостей) срабатывает любой. Чтобы избежать возможных аварийных ситуаций, а также для создания самой возможности оптимизации, как это было показано выше, необходимо определить приоритеты срабатывания переходов, для чего используются временные сети Петри с приоритетами.

Таким образом, модель, сформированная для решения задачи оптимизации расписания работы БТ ХТС, должна быть построена на основе раскрашенной временной сети Петри с приоритетами. Формализованное описание этой сети имеет вид:

$$СП = (P, T_Z, F_{2Z}, \mu_E, C_E, [PP]_T, \tau, \tau_{ВШ}),$$

где  $P = P_N \cup P_M \cup P_I$  – множество позиций сети, отображающих состояния наличия мобильных емкостей: на соответствующих технологических станциях –  $P_N$ , на перекрестках маршрутов перемещения мобильных емкостей –  $P_M$ , по отрезкам маршрутов –  $P_I$  ( $N$  – число технологических станций,  $M$  – число перекрестков,  $I$  – число отрезков маршрутов);  $T_Z$  – множество переходов сети, отображающих события смены состояний сети ( $Z$  – число переходов);  $F_{2Z}$  – множество дуг сети,  $F_{2Z} \subseteq P \times T_Z \cup T_Z \times P$ , причем  $\forall i, j$   $F_N(p_i, p_j) = 0$  и  $F_N(t_i, t_j) = 0$ ;  $\mu_E$  – начальная разметка сети, отображающая начальное размещение мобильных емкостей в БТ ХТС. Каждый маркер сети, находясь в некоторой позиции, отображает состояние наличия отдельной мобильной емкости на соответствующей станции/перекрестке и помечается уникальным идентификатором ("цветом" в терминологии [8]) в соответствии с множеством раскраски сети  $C_E$ , каждый элемент которого установлен в однозначное соответствие с начальной разметкой сети  $\mu_E$ . Вектор приоритетов  $[PP]_T = f(t)$  является параметром, изменяемым в процессе функционирования моделируемой системы.  $[PP]_T$  – это векторная функция, имеющая  $T$  элементов ( $T$  – число переходов в модели БТ ХТС, т. е. число событий, которые могут возникнуть в системе), определяющая на каждом шаге дискретного времени приоритетность возникновения событий, связанных с перемещением мобильных емкостей. Если  $PP_i = 0$ , то срабатывание  $i$ -го перехода невозможно при любых условиях. В зависимости от значения вектора приоритетов на каждом шаге дискретного времени определяются продолжительность простоя мобильных емкостей на перекрестках и технологических станциях в виде векторной функции  $[T_{прост}]_E = T([PP])$ .

Существует несколько подходов к реализации временного механизма. Для решения рассматриваемой задачи наиболее адекватен подход, приведенный (но не реализованный) в [7]. В этом подходе используется глобальная временная база (часы)  $\tau$  и множество временных штампов маркеров  $\tau_{ВШ}$ . Временной штамп маркера устанавливается создающим его переходом и определяет время задержки ( $T_z$ ), по истечении которого маркер становится доступным для дальнейшего перемещения [7].

Для облегчения реализации модели на ЭВМ глобальная временная база модели принимает значения из дискретного набора временных тактов. В начале каждого такта определяется, какие переходы могут сработать, и, с учетом значений  $[PP]$ , определяется, какие именно переходы действительно сработают в текущем такте.

Число маркеров  $E$  является постоянным.  $E < N$ , где  $N$  – число технологических станций. В качестве идентификатора ("цвета") маркера выбирается номер емкости, состояние наличия которой на станциях/перекрестках этот маркер отображает.

Модель на основе СП, используемая для отображения событийной структуры БТ ХТС, обладает следующими особенностями:

• в сети отсутствуют вершины-источники и вершины-стоки, так как концепция БТ ХТС предполагает, что каждая технологическая станция используется, как минимум, один раз в технологический цикл;

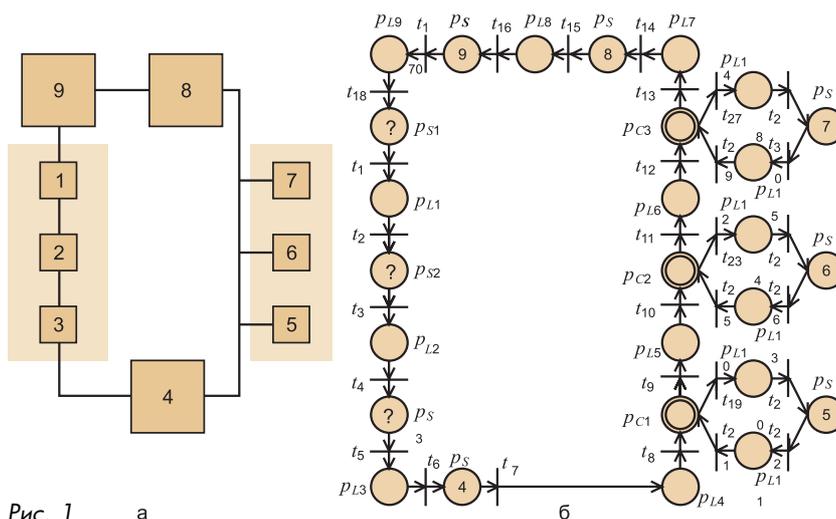
•  $\forall \mu_1, \mu_2 \in \mu_E \sum_{p \in P} \mu_1(p) = \sum_{p \in P} \mu_2(p)$ , т. е. число маркеров в сети неизменно на всем протяжении ее работы. Следовательно, данная СП является консервативной [6]. Это обусловлено тем, что количество емкостей в системе является неизменным. Поэтому модель должна подразумевать невозможность увеличения или уменьшения этого числа;

•  $\forall t \in T_Z F(t) = F'(t) = 1$ , т. е. каждое событие может иметь только одно состояние-причину и только одно состояние-следствие. Следовательно, данная СП является автоматной, из чего следует, что любое возможное состояние этой сети является принципиально достижимым [6], если число контуров в данной сети больше одного.

На рис. 1 представлена принципиальная схема БТ ХТС производства группы малотоннажных химических продуктов и сеть Петри, отображающая ее событийную структуру. Для упрощения принимается, что число технологических станций, на которых осуществляются стадии получения продуктов, равно трем, и хранилище пустых мобильных емкостей также может содержать не более трех емкостей. Начальная маркировка сети обозначена точками различного вида в вершинах отображающих станции хранения мобильных емкостей. Жирными кружками изображены вершины, отображающие состояния присутствия мобильных емкостей на соответствующих технологических станциях; тонкими — вершины, отображающие состояния перемещения емкостей по соответствующим маршрутам; двойными — вершины, отображающие состояния присутствия мобильных емкостей на соответствующих перекрестках маршрутов.

Важной особенностью задачи составления расписания работы БТ ХТС, отличающей эту задачу от аналогичных, возникающих при управлении традиционными многоассортиментными производствами, является то, что в процессе работы БТ ХТС вероятно возникновение ситуации, когда в один и тот же момент времени несколько мобильных емкостей будут готовы к перемещению на следующий узел (при этом маршруты их перемещения будут частично совпадать либо пересекаться), либо одна или более мобильных емкостей будут готовы к перемещению на уже занятый другой емкостью узел. Назовем такую ситуацию *конфликтной ситуацией* (КС). Во избежание аварии (столкновения емкостей) необходимо определять приоритеты перемещения емкостей по отрезкам маршрутов.

Следует заметить, что не все ситуации, кажущиеся конфликтными, являются таковыми в действительности. Например, некоторая мобильная емкость мо-



жет быть готова к перемещению на следующий узел, при том, что этот узел уже занят другой емкостью. Но если за то время, пока первая емкость перемещается по отрезку маршрута на следующий узел, емкость, находящаяся на нем, успеет его покинуть, аварии не произойдет. Поэтому при составлении расписания работы БТ ХТС необходимо уметь предсказывать поведение системы в РВ.

В рамках модели БТ ХТС конфликтная ситуация отображается в виде присутствия на одной и той же позиции двух или более маркеров в один и тот же момент времени.

Введем понятие оптимального маршрута перемещения емкости с одной технологической станции на другую. Оптимальный маршрут перемещения емкости представляет собой последовательность перекрестков и технологических станций, которые должна пройти емкость в процессе перемещения. Этот маршрут рассчитывается для каждой емкости, готовой к перемещению, в зависимости от текущего размещения мобильных емкостей. Оптимальный маршрут может отличаться от наикратчайшего маршрута, если в процессе движения емкости по нему может произойти ее столкновение с другой емкостью, — тогда, чтобы избежать аварии, емкость может быть временно отведена на какую-либо технологическую станцию или перекресток.

Задача оптимизации расписания работы для БТ ХТС при указанных допущениях содержательно формулируется следующим образом.

Имея информацию о топологии БТ ХТС, об ассортименте выпускаемой продукции, о технологических маршрутах получения каждого продукта, о времени обработки емкостей на технологических станциях и о времени, затрачиваемом на перемещение емкостей по отрезкам маршрутов, необходимо определить оптимальные маршруты перемещения мобильных емкостей между технологическими станциями и оптимальную продолжительность их простоя на технологических станциях и перекрестках маршрутов перемещения, варьируя вектор приоритетов.

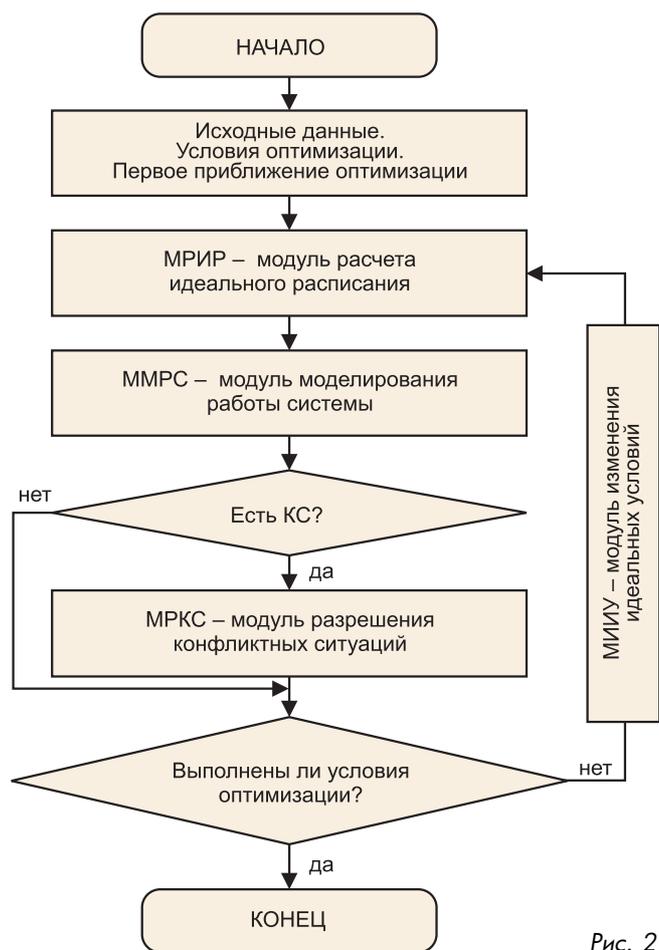


Рис. 2

Критерий оптимальности имеет следующий вид:  
 $\min \{T_0 - T_p\}$ ,  
 где  $T_0$  – заданное время окончания производственного цикла;  $T_p$  – реальное время окончания производственного цикла, полученное в результате работы БТ ХТС по составленному расписанию.

Решение поставленной задачи оптимизации должно быть представлено в виде, удобном для передачи его интерфейсной системе "ЭВМ – аппаратура БТ ХТС". На каждом шаге дискретного времени эта система должна получать от системы составления расписания информацию, указывающую, какие события должны произойти в текущий момент времени. При этом интерфейсная система имеет возможность инициировать только события начала перемещения емкостей по отрезкам маршрутов; моменты возникновения остальных событий строго зависят от моментов начала перемещения емкостей по отрезкам.

Таким образом, расписание работы БТ ХТС должно быть представлено в виде матрицы  $C_{I \times E}$ , где  $I$  – число отрезков маршрутов перемещения емкостей,  $E$  – число мобильных емкостей в системе. Значения элементов этой матрицы указывают на моменты дискретного времени, в которые должны начаться процессы перемещения  $e$ -й мобильной емкости по  $i$ -му отрезку маршрутов перемещения. В зависимости от текущего состояния процесса эта матрица должна

оперативно изменяться, соотносясь с информацией, поступающей от системы мониторинга БТ ХТС.

На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма составления расписания работы БТ ХТС. Алгоритм построен по модульному принципу, допускающему различные методы алгоритмизации отдельных модулей. Вкратце рассмотрим назначение и общие принципы работы основных модулей алгоритма.

**МРИП (модуль расчета идеального расписания)** предназначен для составления расписания работы заданной БТ ХТС при идеальных условиях – т. е., принимая, что перемещаясь, мобильные емкости в принципе не могут столкнуться. Таким образом, МРИП производит расчет расписания для обыкновенной (трубопроводной) гибкой ХТС, аналогичной по аппаратному и ассортиментному составу моделируемой БТ ХТС. Как в нашей стране, так и за рубежом разработаны разнообразные методы составления расписаний для гибких ХТС; модуль МРИП может использовать любой из этих методов. Результатом работы МРИП будет расписание, оптимальное для БТ ХТС при вышеуказанном допущении.

**ММРС (модуль моделирования работы системы)** предназначен для определения, возникнут ли КС в ходе работы БТ ХТС по расписанию, составленному в результате работы МРИП либо в процессе работы МПКС (ММРС является также и частью МПКС).

**МПКС (модуль разрешения конфликтных ситуаций)** предназначен для оптимизации составленного идеального расписания в целях недопущения КС в процессе работы системы. Изменяя вектор приоритетов, МПКС пересчитывает расписание работы БТ ХТС, оптимизируя его по указанному выше критерию оптимальности. Результатом работы МПКС является измененное расписание, составленное с учетом возникающих КС и оптимизированное по указанному условию.

**МИИУ (модуль изменения идеальных условий)** предназначен для задания МРИП новых условий в случае, если максимально оптимизированное МПКС расписание, тем не менее, не удовлетворяет условиям оптимизации. Фактически, МИИУ указывает модулю МРИП, что рассчитанное им на предыдущем шаге идеальное расписание является неоптимальным для БТ ХТС, и этот вариант следует исключить из дальнейшего рассмотрения.

Цикл повторяется до тех пор, пока не будет найдено расписание, удовлетворяющее условиям оптимизации, или, если ни одно из рассмотренных расписаний не удовлетворяет этим условиям до определения расписания, наиболее близкого к оптимальному.

В качестве примера рассмотрим БТ ХТС, схема которой изображена на рис. 1а. Допустим, что выпускаются три продукта. Ниже приведен список операций, необходимых для производства каждого из этих продуктов:

- для продукта 1: хранилище → станция загрузки сырья → станция осуществления операции 1 → стан-

ция выгрузки готового продукта → станция промывки → хранилище;

- для продукта 2: хранилище → станция загрузки сырья → станция осуществления операции 2 → станция выгрузки готового продукта → станция промывки → хранилище;

- для продукта 3: хранилище → станция загрузки сырья → станция осуществления операции 1 → станция осуществления операции 2 → станция осуществления операции 3 → станция выгрузки готового продукта → станция промывки → хранилище.

Примем, что время осуществления ТП на каждой из станций хранилища мобильных емкостей равно нулю условных тактов времени; на остальных станциях – трем условным тактам времени; время перемещения емкостей по каждому отрезку маршрутов перемещения мобильных емкостей равно одному условному такту времени.

Модель событийной структуры этой ХТС изображена на рис. 16. В рамках этой модели маршруты перемещения мобильных емкостей могут быть представлены в виде следующих циклических последовательностей состояний:

- для продукта 1:  $p_{S1} \rightarrow p_{L1} \rightarrow p_{S2} \rightarrow p_{L2} \rightarrow p_{S3} > p_{L3} \rightarrow p_{S4} \rightarrow p_{L4} \rightarrow p_{C1} \rightarrow p_{L10} \rightarrow p_{S5} \rightarrow p_{L11} \rightarrow p_{C1} \rightarrow p_{L5} \rightarrow p_{C2} \rightarrow p_{L6} \rightarrow p_{C3} \rightarrow p_{L7} \rightarrow p_{S8} \rightarrow p_{L8} \rightarrow p_{S9} \rightarrow p_{L9} \rightarrow p_{S1}$ ;

- для продукта 2:  $p_{S1} \rightarrow p_{L1} \rightarrow p_{S2} \rightarrow p_{L2} \rightarrow p_{S3} \rightarrow p_{L3} \rightarrow p_{S4} \rightarrow p_{L4} \rightarrow p_{C1} \rightarrow p_{L5} \rightarrow p_{C2} \rightarrow p_{L12} \rightarrow p_{S6} \rightarrow p_{L13} \rightarrow p_{C2} \rightarrow p_{L6} \rightarrow p_{C3} \rightarrow p_{L7} \rightarrow p_{S8} \rightarrow p_{L8} \rightarrow p_{S9} \rightarrow p_{L9} \rightarrow p_{S1}$ ;

- для продукта 3:  $p_{S1} \rightarrow p_{L1} \rightarrow p_{S2} \rightarrow p_{L2} \rightarrow p_{S3} \rightarrow p_{L3} \rightarrow p_{S4} \rightarrow p_{L4} \rightarrow p_{C1} \rightarrow p_{L10} \rightarrow p_{S5} \rightarrow p_{L11} \rightarrow p_{C1} \rightarrow p_{L5} \rightarrow p_{C2} \rightarrow p_{L12} \rightarrow p_{S6} \rightarrow p_{L13} \rightarrow p_{C2} \rightarrow p_{L6} \rightarrow p_{C3} \rightarrow p_{L14} \rightarrow p_{S7} \rightarrow p_{L15} \rightarrow p_{C3} \rightarrow p_{L7} \rightarrow p_{S8} > p_{L8} \rightarrow p_{S9} \rightarrow p_{L9} \rightarrow p_{S1}$ .

Для решения этой задачи была использована система моделирования БП ХТС XBatch версии 1.01b, разработанная в рамках настоящего исследования. Система реализована на базе платформы .NET (язык C#.NET) и может, вследствие универсальности этой платформы, быть в сжатые сроки портирована на любые системы управления реальными установками.

Результатом решения этой задачи (при заданном времени окончания производственного цикла, равном 30 у. е. времени) является расписание работы БТ ХТС, диаграмма Ганта для которого представлена на рис. 3.

**Выводы**

Разработанный алгоритм позволяет составить и оптимизировать расписание работы для БТ ХТС любой

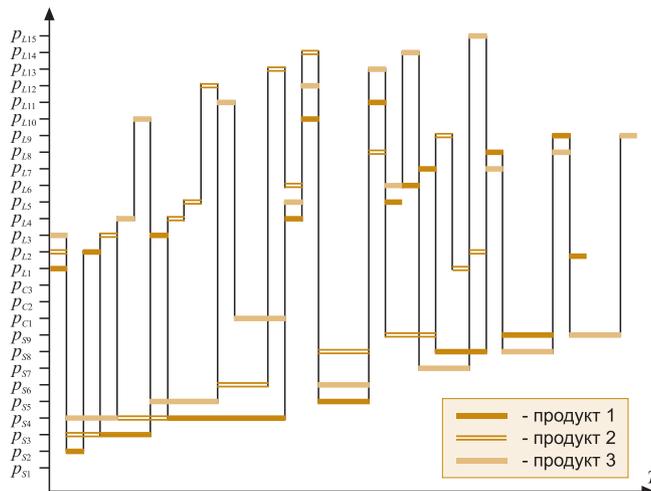


Рис. 3

топологии. Этот алгоритм, в отличие от некоторых зарубежных аналогов, обладает большей универсальностью, а также способен учитывать и разрешать конфликтные ситуации, возникающие в ходе работы ХТС. С незначительными изменениями этот алгоритм может быть также использован для разработки систем автоматизированного составления расписаний в РВ, учитывающих неизбежные в ходе ТП отклонения продолжительности процессов от расчетного времени.

**Список литературы**

1. Realf M.J., Shah N., Pantelides C.C. Simultaneous design, layout and scheduling of pipeless batch plants. // Comp. & Chem. Eng. 1996, №20.
2. Otto E., Peeters H., Rasolondraibe F. Pipeless Batch Plants for Emulsion Copolymerisation. Slides // TUE-ST, 2002.
3. Dong Joon Yoo, Ho-Kyung Lee, Jae Hak Jung, and In-Beum Lee. Optimal Design of Pipeless Processes with Scheduling // Journal of the Korean Institute of Chem. Eng. 1996. №34(6).
4. Ko D., Na S. Moon I., Oh M. Development of a Rescheduling System for Optimal Operation of Pipeless Plants. // Comp. & Chem. Eng. Suppl. 1999.
5. Otto E., Peeters H., Rasolondraibe F. Pipeless Batch Plants for Emulsion Copolymerisation. Slides // TUE-ST, 2002.
6. Котов В.В. Сети Петри. М.: Наука, 1984.
7. Чурина Т.Г. Способ построения раскрашенных сетей Петри, моделирующих SDL-системы. // Препринт. Новосибирск: 1998.
8. Мешалкин В.П. Экспертные системы в химической технологии. Основы теории, опыт разработки и применения. М.: Химия, 1995.

*Генин Юрий Евгеньевич – аспирант, Дубровский Илья Иванович – канд. техн. наук, доцент, Макаров Владимир Валентинович – д-р техн. наук, доцент кафедры "Кибернетика химико-технологических процессов" Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева.*

*Контактный телефон (095)978-65-89.*



*Симпатичная девушка говорит по сотовому телефону:  
"Ну ты сама-то эти платформы видела? Какой размер? А цена?  
Здорово, как раз такие нужны..." И конец разговора:  
"... да, а вот на датчики мне нужна полная спецификация!"*