

УДК 519.876.5

**В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов**

# КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ВЫБОРУ ВАРИАНТА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Проблема модернизации или создания нового, более прогрессивного автоматизированного производства, выпускающего высокоеффективную продукцию, конкурентоспособного на мировой рынке, непосредственно связана с вопросами организации и совершенствования технической подготовки производства. Этот процесс многостадиен, продолжителен и трудоемок. Одним из его этапов является проектирование технологического процесса, куда входит выбор и расстановка оборудования на площади цеха. Автоматизированное производство как сложная система, включает в себя большое количество согласовано работающих элементов (технологического оборудования), что обеспечивает множественность технико-организационных решений для различных производственных систем. Возникают задачи многовариантного анализа технологий с целью выбора оптимального варианта автоматизированных производственных систем.

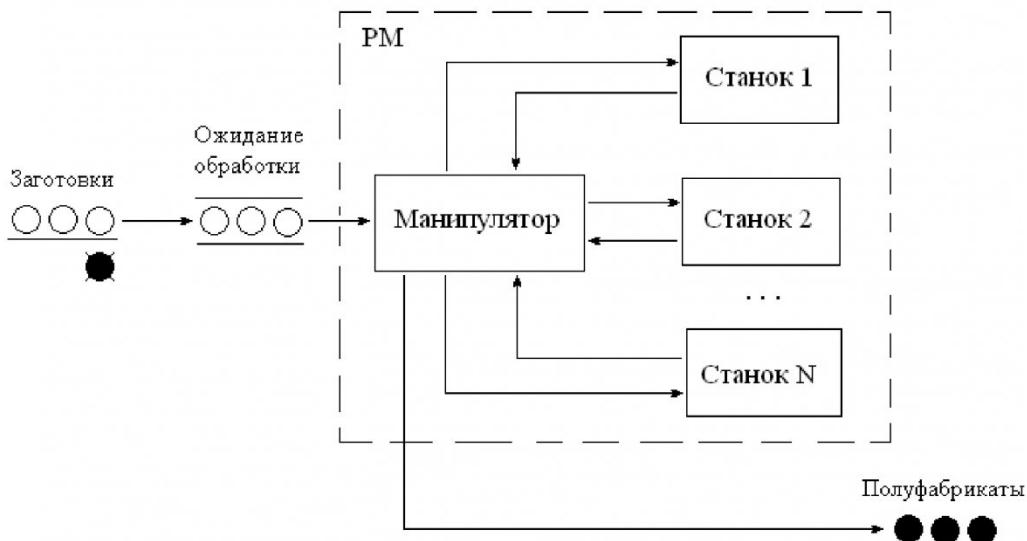
Многовариантность решения задачи не позволяет экспериментальным путём комплектовать оборудование производственной системы из-за высокой стоимости технологического риска. Применяемые для этого аналитические методы, а также методы, реализованные на универсальных языках программирования, требует описания технологии в виде последовательности формул. Составление математических моделей и программ на универсальных языках занимает много человеко-месяцев работы. Модели трудно поддаются переделке. Кроме того, в работе любого оборудования

ния, тем более, если речь идет о сложной системе, такой как АПС, всегда присутствуют случайные факторы с различными законами распределения, вносящие в работу системы значительные изменения. В таких случаях применение вышеуказанных методов теряет смысл, т.к. формулы и модели становятся слишком громоздкими, а чаще всего и не способными описать требуемый объект.

Поэтому целесообразным является переход к применению специализированных языков имитационного моделирования, в которых используются готовые блоки из набора команд универсального языка, отображающие поведение системы от одного события к другому. Событием является начало или окончание какой либо операции.

Имитационное моделирование при многовариантном анализе сложных динамических объектов и технологий позволяет отобразить взаимодействие элементов технологического комплекса во времени, проиграть на моделях альтернативные технико-организационные варианты и определить наиболее рациональные из них, оценить влияние отдельных параметров на поведение системы в целом, выявить узкие места и т.д.

Большинство работ в машиностроении сводится к дискретным процессам с конечным числом состояний. Специализированные языки имитационного моделирования SLAM, SIMAN, MODSIM, GPSS и др., представляют собой программное обеспечение, написанное на универсальном языке и ориентированное на имитацию процессов. Наиболее распространен специализи-



*Рис. 1. Рабочее место в виде многофазной многоканальной СМО*

рованный язык GPSS (General Purpose Simulation System). В машиностроении язык GPSS возможно применить для моделирования транспортной системы, проектирования систем конвейеров и др. Наиболее удобно в системе GPSS описываются модели систем массового обслуживания, для которых характерны относительно простые правила функционирования составляющих их элементов.

Для разработки моделей автоматизированных производств и проведения имитационных экспериментов разработана классификация компоновок автоматизированных производственных систем и выявлены возможные варианты. В основе классификации лежит используемая автоматизированная транспортно-складская система: рольганг, автоматизированная тележка, кран-штабеллер, мостовой кран и кран-балка, промышленный робот, конвейер.

Первоначально автоматизированное производство представляется в виде системы массового обслуживания. Функционирование рабочего места можно отобразить многоканальной однофазной или многофазной СМО, где параллельно работающие приборы будут обслуживать заявки, и моделировать совместное выполнение операций

по обработке заготовок (рис.1).

Несколько рабочих мест при помощи транспортно-складской системы объединяются в АПС. Таким образом, любая автоматизированная производственная система отображается сетью многофазных одноканальных и/или многоканальных СМО без отказов с простейшей дисциплиной обслуживания FIFO и ограниченным входным потоком заявок, который соответствует производственному плану. Заявками являются заготовки. Обслуживание заявок заключается в задержке их на время выполнения операций фрезерования, сверления, точения и др. в приборах, имитирующих оборудование АПС. Выходной поток представляет готовые изделия (рис. 2).

Если определить производительность системы за длительный промежуток времени путём деления количества выпущенной продукции за какой-то календарный отрезок времени на его продолжительность, то эта фактическая производительность окажется ниже цикловой. Причиной этому является то обстоятельство, что помимо цикловых потерь времени, затраченных на холостые ходы  $t_x$  при работе машины имеют место и внециклические потери времени, которые также приводят к

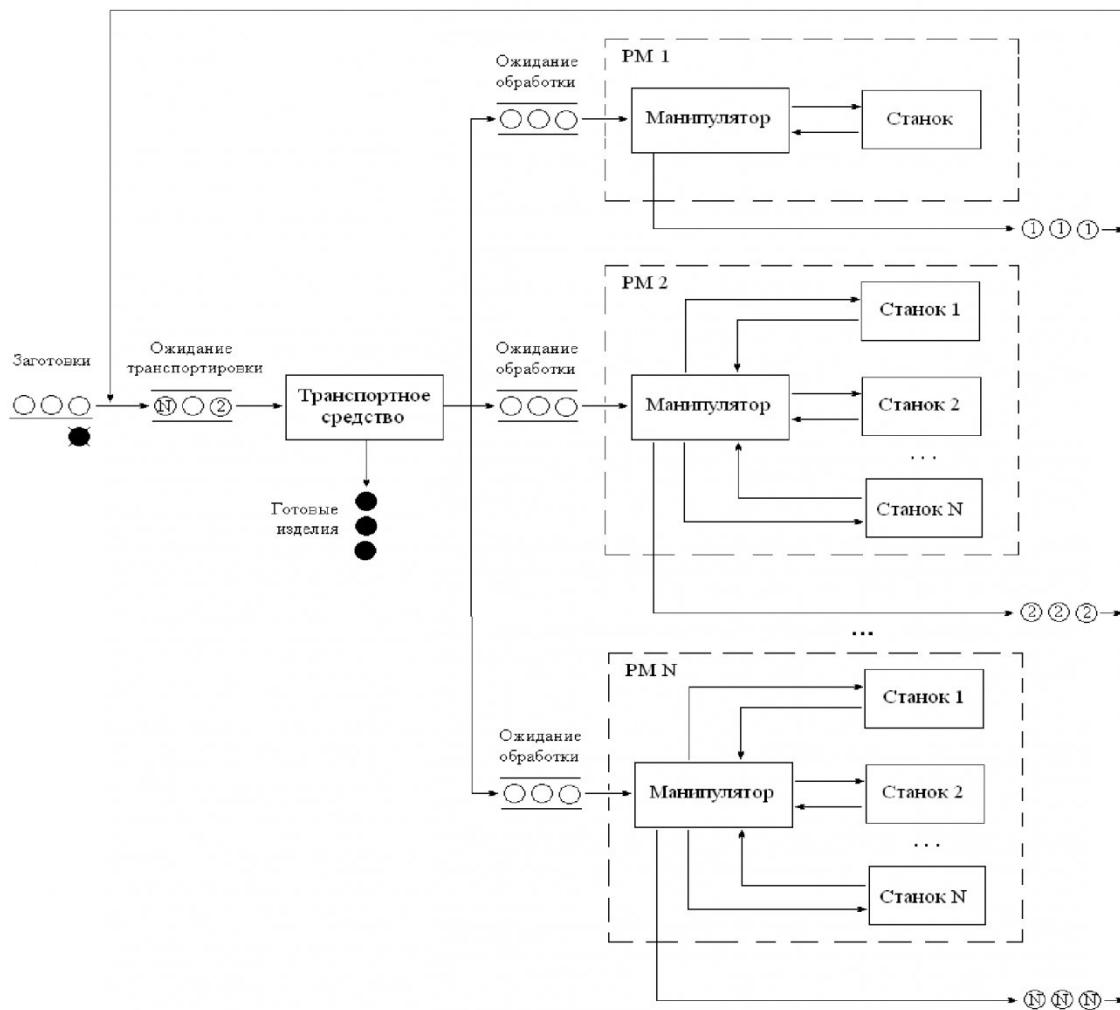


Рис. 2. АПС в виде сети многофазных многоканальных СМО без отказов

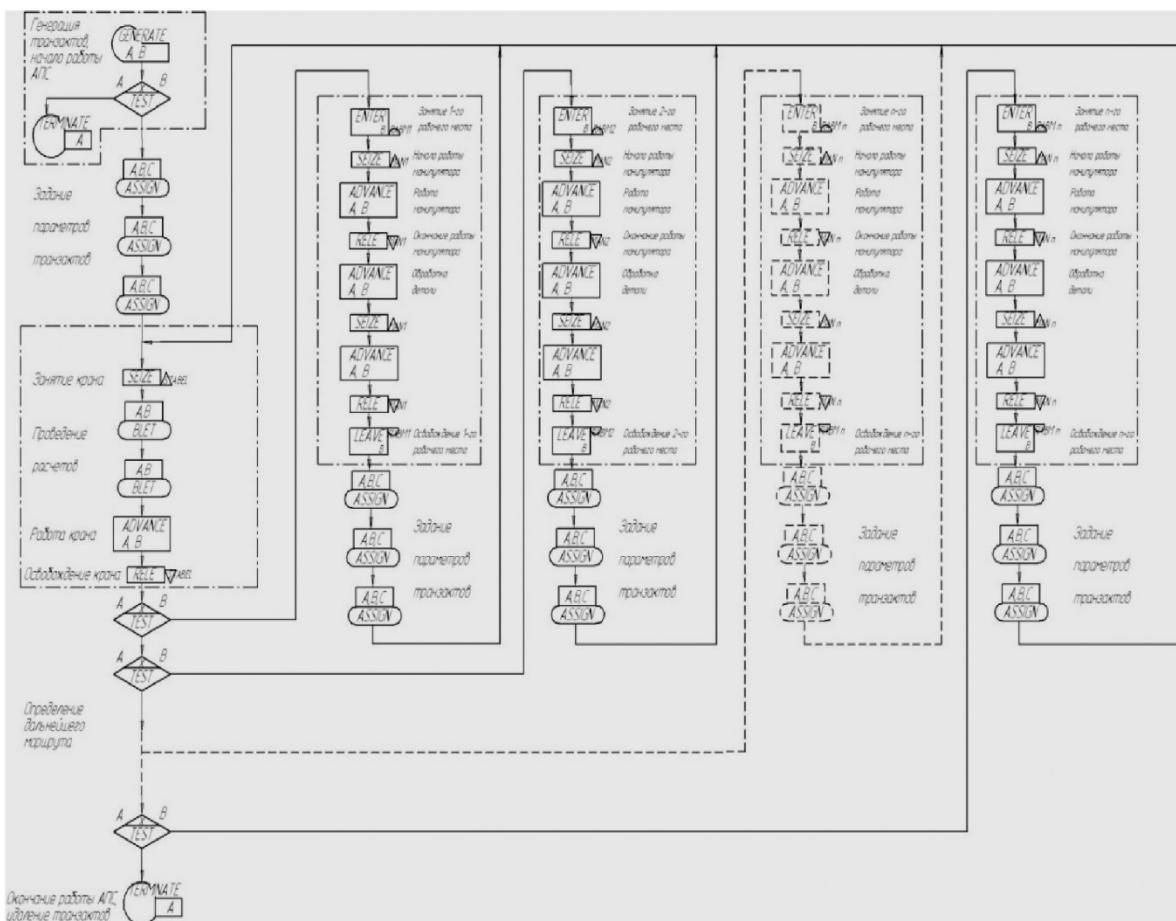


Рис. 3. Блок-схема GPSS/H-модели АПС с краном-штабелером.

снижению производительности машины.

Производительность системы в общем случае с учётом внециклических потерь определяют как

$$Q = \frac{1 \cdot \gamma \cdot \eta_3}{\frac{t_{po}}{q} + t_x + \frac{\sum C_i + t_e \cdot q}{n_y} \cdot W}$$

где  $n_y$  – число участков с отдельным накопителем,  $W$  – коэффициент возрастания внециклических потерь из-за неполной компенсации простоеев накопителями,  $W = 1,15 \dots 1,2$ ,  $t_{po}$  – суммарное время технологического воздействия согласно принятому технологическому процессу,  $q$  - количество последовательно работающих однопозиционных машин,  $t_x$  – суммарное время несовмещенных холостых ходов (загрузка и съем изделий, зажим и разжим, подвод и отвод инструментов и т.д.);  $\Sigma C$  – потери по инструменту одного комплекта инструмента;  $t_e$  – потери по оборудованию одного комплекта механизмов и устройств;  $\gamma$  – коэффициент выхода годной продукции,  $\eta_3$  – коэффициент загрузки.

Имеющиеся методики расчета учитывают внециклические потери статическим коэффициентом, который приблизительно определяется только для типовых существующих производств. Зачастую этот коэффициент берется интуитивно на основе опыта проектировщиков. Случайная природа воз-

никновения внециклических потерь и динамика производства не позволяют в существующих методиках точно рассчитывать производительность АПС, поэтому необходима разработка новых подходов и методов определения основных характеристик АПС с учетом внециклических потерь.

На основе полученной системы массового обслуживания АПС с различным типом применяемого транспортного средства представляются в виде блок-схемы и с использованием языка GPSS/H создаются имитационные модели. Например, на рис. 3. представлена блок-схема имитационной модели АПС с использованием крана-штабелера.

Если модель неправильно отображает динамику системы, то, очевидно, что и полученные с ее помощью результаты будут неправильными. Поэтому одной из главных проблем при моделировании АПС является проверка соответствия разработанной модели реальной системе. В России подобную проверку называют адекватностью, а за рубежом - делают на верификацию и валидацию.

С использованием основных методов валидации и верификации проводится проверка правильности разработанных моделей и устанавливается, что отклонение результатов имитационных экспериментов от расчетных значений не превышает 5-7%.

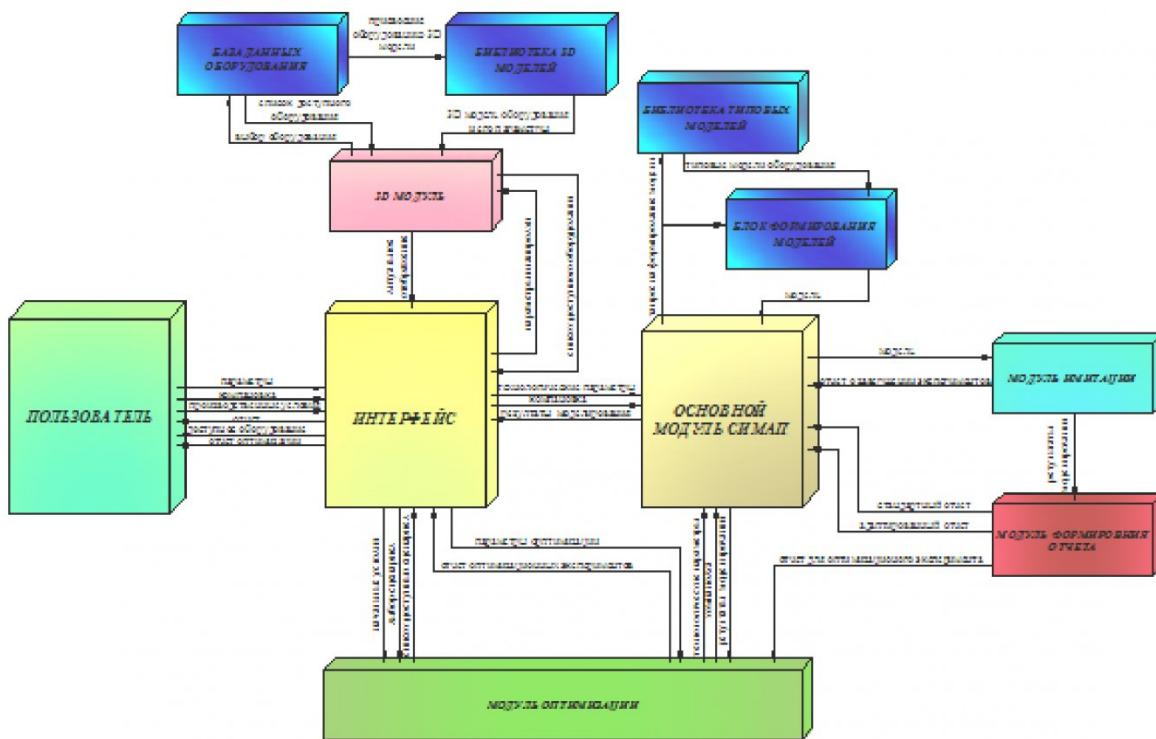


Рис.4. Структурная схема комплекса проблемно-ориентированных программ

Следующим шагом согласно разработанной концепции создания комплекса проблемно-ориентированных программ является разработка интерфейса.

Интерфейс отвечает за взаимодействие программного комплекса и пользователя, предоставляет визуальное отображение по средствам 3D-мерной графики планировки. Интерфейс напрямую взаимодействует с 3D-модулем, передавая параметры планировки, для визуального отображения, и получает список доступного оборудования. Интерфейс так же взаимодействует с модулем оптимизации, по средствам выбора сценария оптимизации из доступных сценариев, и установки начальных условий, так же передаются в модуль оптимизации параметры оптимизации. В свою очередь модуль оптимизации передает данные файла отчета оптимизации.

В общем виде структурная схема комплекса проблемно-ориентированных программ представлена на рис. 4.

Основной модуль выполняет роль связующего звена между всеми модулями СИМАП, и координирует их взаимодействие. Библиотека типовых моделей в соответствии с параметрами эксперимента передает необходимые модели технологического оборудования в блок формирования для построения модели для имитационного эксперимента.

Модель поступает в основной модуль, где устанавливаются технологические параметры, и затем передается в имитатор.

Модуль имитации выполняет необходимые

расчеты, после чего формирует выходные данные. Выходные данные передаются в модуль формирования отчета, где обрабатываются, и формируется отчет по экспериментам в удобочитаемой форме. В зависимости от выбранного режима отчеты передаются в основной модуль или модуль оптимизации.

Модуль оптимизации, на основе выбранного сценария, начальных условий и технологических параметрах формирует данные для проведения серий имитационных экспериментов.

Задачей оптимизации является нахождение экстремума (минимума времени производства партии деталей или максимума производительности).

Целевая функция (время) имеет вид:

$$T = f(i, SK1x, SK1y, SK0x, SK0y,$$

$$Vx, Vy, ttzg, n_i, x_1, y_1, to_1, tz_1, \dots, n_i,$$

$$x_i, y_i, to_i, tz_i) \rightarrow \min$$

где  $i$  — число РТК в АПС  $i(1; l)$ ;

$SK1x, SK1y$  — координаты склада готовой продукции  $SK1x \square (X_{min}; X_{max}), SK1y \square (Y_{min}; Y_{max})$

$SK0x, SK0y$  — координаты склада заготовок  $SK0x \square (X_{min}; X_{max}), SK0y \square (Y_{min}; Y_{max})$ ;

$Vx, Vy$  — скорость транспортной системы по координатам  $x$  и  $y$  соответственно  $Vx \square (Vx_{min}; Vx_{max}), Vy \square (Vy_{min}; Vy_{max})$ ;

$ttzg$  — время загрузки/разгрузки транспорта  $ttzg \square (0; Ttzg)$ ;

$n_i$  — количество станков в составе  $i$ -той РТК  $n_i \square (1; N)$ ;

$xi, yi$  – координаты точки загрузки  $i$ -той РТК  $xi \in [X_{min}; X_{max}], yi \in [Y_{min}; Y_{max}]$ ;  
 $toi$  – время обработки изделия на  $i$ -том РТК  $toi \in (0; To)$ ;  
 $tzi$  – время загрузки  $i$ -той РТК  $tzi \in (0; Tz)$ .

Функцию подобного вида невозможно составить или рассчитать аналитически.

**Эвристический подход**, а именно имитационное моделирование позволяет получать адекватные результаты функционирования моделируемой системы.

Простым перебором получить оптимальное сочетание параметров невозможно, так как число вариантов очень велико.

$$N = X_1 \cdot X_2 \cdots \cdot X_n$$

где  $X_n$  – число уровней фактора  $n$ ,  $N$  – число вариантов.

Было выделено три фактора: «планировка», «скорость» и «оборудование», в результате получено, что

$$N = 1679 \cdot 29 \cdot 81 = 3943971.$$

Для определения степени влияния факторов использовался двухфакторный дисперсионный анализ, комбинируя попарно факторы «скорость»–«планировка», «скорость»–«оборудование», «планировка»–«оборудование». Для проведения дисперсионного анализа использовался пакет Statistica. В результате определено, что «планировка» оказывает влияние на время производства на 98,5% по сравнению с фактором «оборудование» влияние которого незначительно; фактор «скорость» оказывает влияние на время производства партии деталей на 91% по сравнению с фактором «планировка», влияние которого не превышает 3%; фактор «скорость» оказывает влияние на время производства партии деталей на 99% по сравнению с фактором «планировка», влияние которого не значительно.

Наиболее простой метод оптимизации - метод полного перебора требует значительных затрат

аппаратных ресурсов и времени для получения оптимального результата, вследствие чего использование данного метода не эффективно. Метод покоординатного спуска позволяет найти оптимум для целевой функции с одним ярко выраженным экстремумом с наименьшей погрешностью. Однако целевая функция любой АПС имеет не один, а несколько сотен экстремумов, но метод покоординатного спуска позволяет находить значения параметров близких к оптимальному значению целевой функции с заданной точностью. Поэтому в модуле оптимизации был реализован именно этот метод. Он позволяет за 2-3 итерации находить минимальное время изготовления деталей, а значит определить оптимальный вариант структуры автоматизированного производства.

В результате проведения экспериментов на дискретно-стохастических динамических моделях получают определенное число массивов значений параметров АПС: производительности АПС, загрузки транспортного средства и рабочих мест при изменении планировки участка, временных характеристик оборудования для основных вариантов АПС, количество деталей, находящихся в очередях перед приборами (что соответствует необходимой емкости накопителей). Анализ полученных данных позволяет выявить эффективные пути повышения производительности и загрузки оборудования для вариантов автоматизированных производств.

Пример подобного анализа полученных массивов данных представлены на рис.5.

В результате проведения экспериментов на дискретно-стохастических динамических моделях получено 18 массивов значений производительности АПС, загрузки транспортного средства и рабочих мест при изменении планировки участка и временных характеристик оборудования для основных вариантов АПС. Анализ полученных данных позволяет выявить эффективные пути повышения производительности и загрузки оборудова-

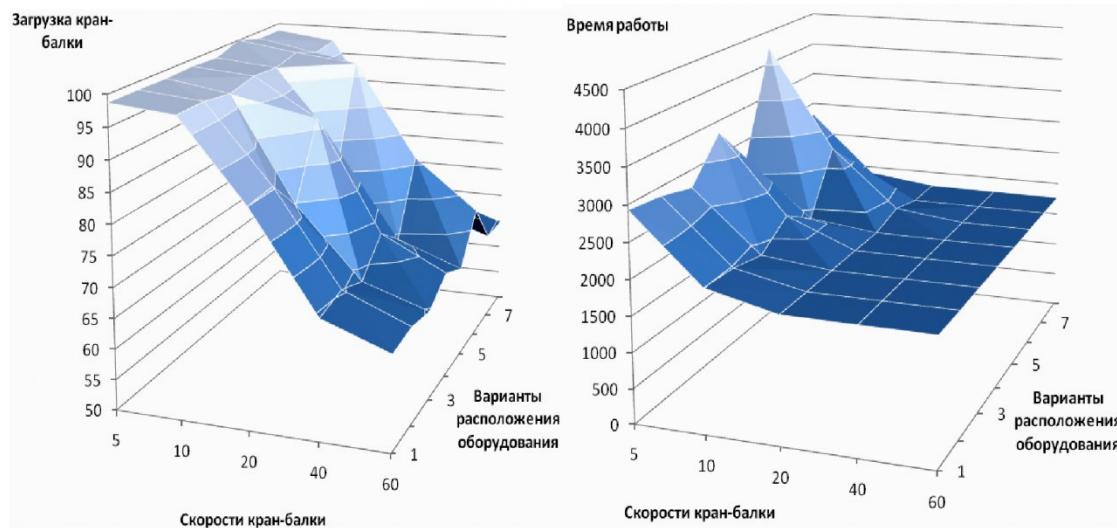


Рис. 5. Пример обработки результатов экспериментов.

ния для вариантов автоматизированных производств.

Установлено, что:

- из-за недостаточного учёта внецикловых потерь выпуск продукции в реальной АПС может быть ниже запланированного (рассчитанного) объема продукции на 10%, при этом загрузка оборудования в реальной АПС может превышать расчётные значения в среднем на 11%. Процент расхождения увеличивается при увеличении временного интервала работы АПС;

- расположение оборудования в один ряд способствует увеличению загрузки транспортной системы на 33%, но при этом производительность АПС может понизиться на 2,3%. При снижении загрузки транспортного средства повышается загрузка рабочих мест, следовательно повышается производительность и всей АПС;

- загрузка крана-штабелера при увеличении его скорости горизонтального перемещения от 1 до 6 м/мин уменьшается на 57%, а производительность АПС – возрастает на 33%. Этот рост ограничен пределом скорости транспортного средства. Рост производительности сначала пропорционален росту скорости крана-штабелера, так при ее увеличении от 1 до 2 м/мин производительность АПС возрастает на 29%. При изменении скорости крана-штабелера от 2 до 6 м/мин рост производительности несущественно не изменяется и составляет всего 4%. Это объясняется тем, что время на загрузочно-разгрузочные операции крана-штабелера начинает существенно превышать время перемещения между рабочими местами АПС.

- при проведении экспериментов с моделью, имитирующей АПС с использованием в качестве транспортного средства промышленного робота, было установлено, что при обработке деталей попытка сконцентрировать несколько операций на одном станке приводит к нерациональному использованию транспортной системы (загрузка робота очень мала, вплоть до 10%), кроме того время изготовления партии деталей существенно возрастает, в среднем на 20%,

- в автоматизированных производственных системах, где в качестве транспортных средств используется подвесной транспорт (например, кран-балка или мостовой кран) не рекомендуется располагать технологическое оборудование в линию, т.к. при таком варианте наблюдается существенное увеличение загрузки транспортной системы (до 99%) и времени обработки партии деталей, т.е. существенно падает производительность (на 32%). При этом дополнительное наращивание скорости перемещения транспортного средства дает очень незначительное увеличение производительности – на 5%. Рекомендуется расположение оборудования в виде квадратов или прямоугольников, причем первый вариант предпочтительнее. Кроме того наилучшее расположение станков – по часовой стрелке (или против нее) согласно маршрута обработки. При таком варианте наблюдается наиболее рациональная загрузка технологического оборудования при наименьшем времени обработки требуемой партии деталей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кельтон, В. Имитационное моделирование. Классика CS. : книга / Кельтон, В., Лоу, А. – 3-е изд. – СПб. : Питер; Киев : Издательская группа BHV, 2004. – 847 с.
2. Шенон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука : книга / Шенон, Р. - М.: Мир, 1978, – 420 с.
3. Зиновьев, В.В. Моделирование автоматизированных производственных систем с помощью имитационного подхода / В.В. Зиновьев, А.Н. Стародубов // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-20 // сб. трудов XX Междунар. науч. конф. В 10 т. Т.4. / под общ. ред. В.С. Балакириева. - Ярославль: Яросл. гос. техн. ун-та, 2007. - С. 145-148.
4. Шаумян, Г.А. Комплексная автоматизация производственных процессов : учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / Г.А. Шаумян, Л.И. Волчекевич, М. М. Кузнецов – М. : «Машиностроение», 1973. – 472 с.
5. Советов, Б.Я. Моделирование систем: учебное пособие для вузов – 3-е изд., перераб. и доп. / Советов, Б.Я., Яковлев С.А. – М. : «Высшая школа», 2001. – 319 с.

### Авторы статьи

Зиновьев

Василий Валентинович

- канд. техн. наук, доцент каф. «Информационные и автоматизированные производственные системы»

КузГТУ.

Тел.3842-58-08-11

Стародубов

Алексей Николаевич

-аспирант каф. «Информационные и автоматизированные производственные системы» КузГТУ.

Тел. 384236-47-21,

e-mail: [staraleksei@rambler.ru](mailto:staraleksei@rambler.ru)