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 высокоэффективную 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 обеспечивают 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, 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-

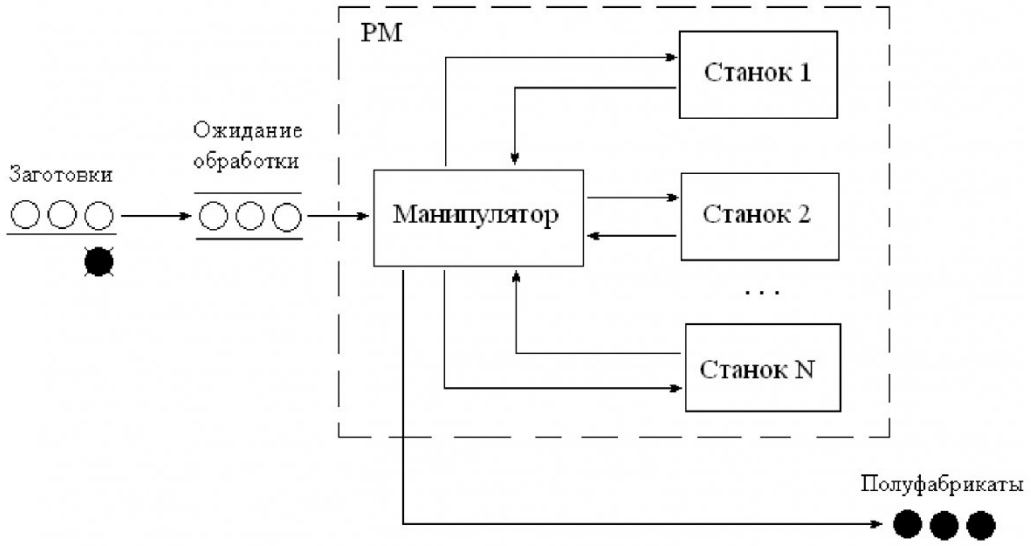

Рис. 1. Рабочее место в виде многофазной многоканальной СМО

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 внецикловые потери времени, которые также приводят к

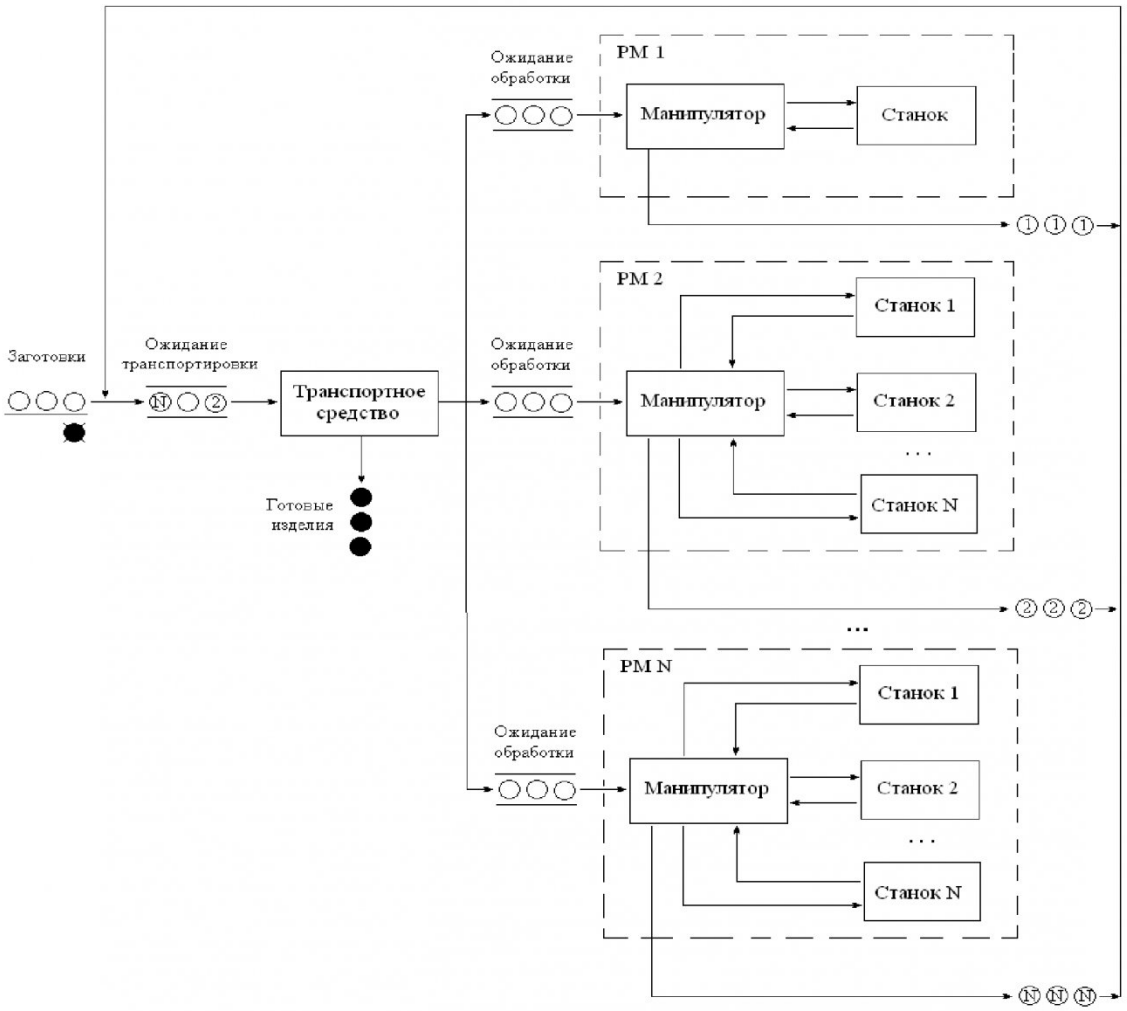

Рис. 2. АПС в виде сети многофазных многоканальных СМО без отказов

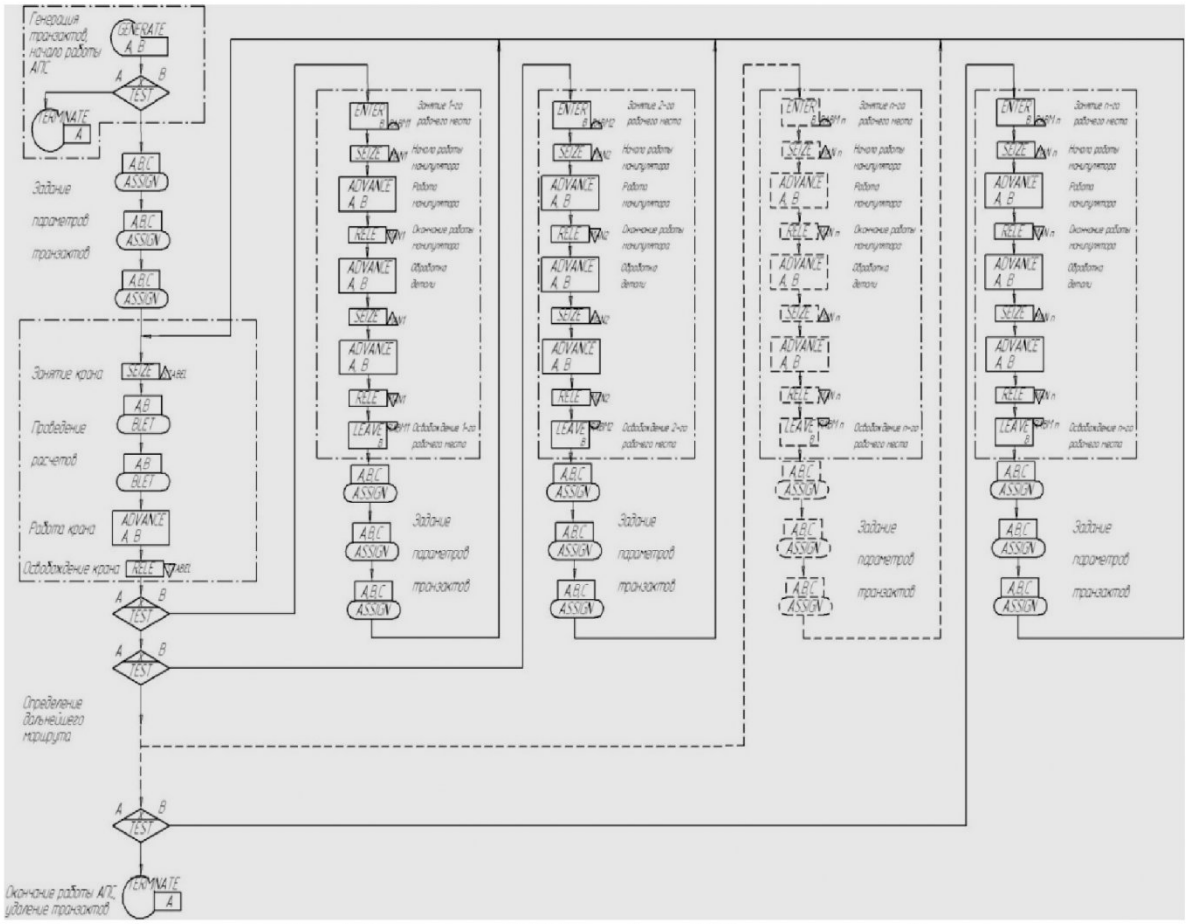

Рис. 3. Блок-схема GPSS/H-модели АПС с краном-штабелером.

снижению производительности машины.

Производительность системы в общем случае с учётом внецикловых потерь определяют как

$$Q = \frac{1 \cdot \gamma \cdot \eta_з}{\frac{t_{po}}{q} + t_x + \frac{\Sigma C_i + t_e \cdot q}{n_y} \cdot W}.$$

где n_y – число участков с отдельным накопителем, W – коэффициент возрастания внецикловых потерь из-за неполной компенсации простоев накопителями, $W = 1{,}15...1{,}2$, 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.,); ΣC – потери по инструменту одного комплекта инструмента; t_e – потери по оборудованию одного комплекта механизмов и устройств; γ – коэффициент выхода годной продукции, $\eta_з$ – коэффициент загрузки.

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

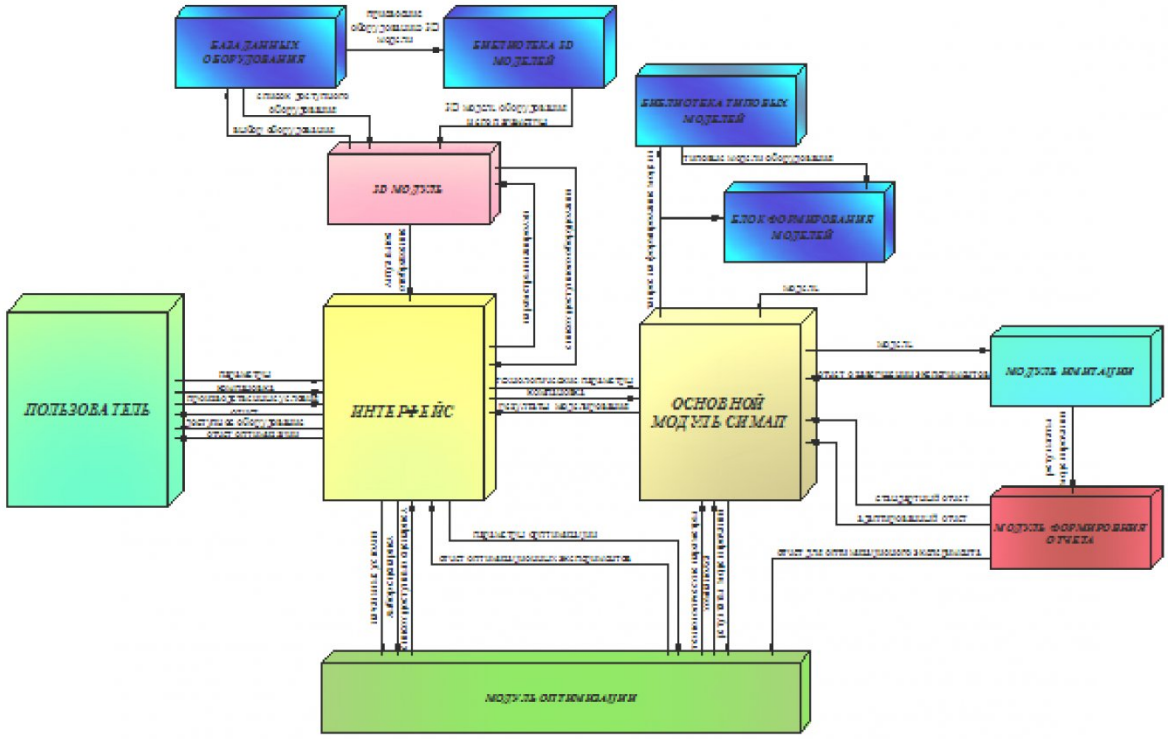

Рис.4. Структурная схема комплекса проблемно-ориентированных программ

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 3х 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:

$$T = f(i, SK1x, SK1y, SK0x, SK0y, Vx, Vy.ttzag, n_1, x_1, y_1, to_1, tz_1, ..., n_i, x_i, y_i, to_i, tz_i) \rightarrow min$$

где i – число РТК в АПС $i \in (1;I)$;

$SK1x$, $SK1y$, - координаты склада готовой продукции $SK1x \in (Xmin; Xmax)$, $SK1y \in (Ymin; Ymax)$

$SK0x$, $SK0y$, - координаты склада заготовок $SK0x \in (Xmin; Xmax)$, $SK0y \in (Ymin; Ymax)$;

Vx, Vy - скорость транспортной системы по координатам x и y соответственно $Vx \in (Vxmin; Xmax)$, $Vy \in (Vymin; Vymax)$;

$ttzag$ - время загрузки/разгрузки транспорта $ttzag \in (0;Ttzag)$;

ni – количество станков в составе i-той РТК $ni \in (1;N)$;

xi, *yi* – координаты точки загрузки *i*-той РТК *xi*□(*Xmin*; *Xmax*), *yi*□ (*Ymin*; *Ymax*);

toi – время обработки изделия на *i*-том РТК *toi*□(0;*To*);

tzi-время загрузки *i*-той РТК *tzi*□(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.

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

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

Было выделено три фактора: «планировка», «скорость» и «оборудование», в результате плучено, 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 Statistika. 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, временны́х 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 временны́х характеристик оборудования для основных вариантов АПС. Анализ полученных данных позволяет выявить эффективные пути повышения производительности и загрузки оборудова-

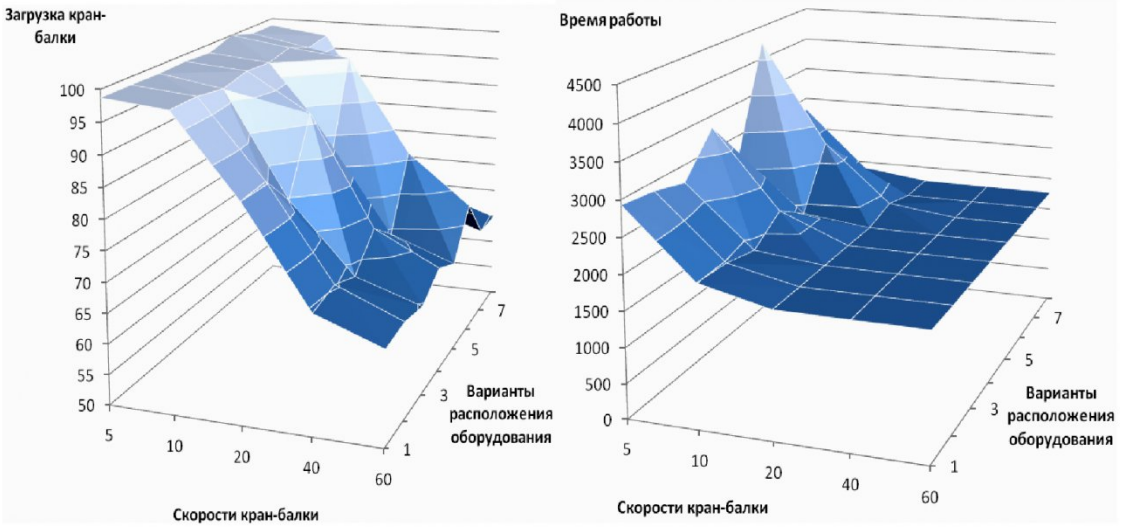

Рис. 5. Пример обработки результатов экспериментов.

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. *Шеннон, Р.* Имитационное моделирование систем – искусство и наука : книга / Шеннон, 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 втузов / Г.А. Шаумян, Л.И. Волчкевич, 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