

Академия наук Украины
Ордена Ленина Институт кибернетики имени В.М.Глушкова

На правах рукописи

ЗАИЦЕВ Дмитрий Анатольевич

УДК 658.5.012

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ДИСКРЕТНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ
НА СЕТЕВЫХ МОДЕЛЯХ ПЕТРИ

05.13.06 – автоматизированные системы управления

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев 1991

Работа выполнена в Донецком ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
СЛЕПЦОВ А.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
ЗАЙЧЕНКО Ю.П.,
кандидат экономических наук
ТИМАШОВА Л.А.

Ведущее предприятие: НИО "Институт автоматики" (г. Киев).

Защита состоится «—» ————— 199 г. в —————
часов на заседании специализированного совета К 016.45.03
при Институте кибернетики имени В.М.Глушкова АН Украины
по адресу:
252207 Киев 207, проспект Академика Глушкова, 40.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-техническом
архиве института.

Автореферат разослан «—» ————— 199 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

ЕРШОВ В.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Качество оперативного управления непосредственно влияет на издержки производства и в конечном счете определяет эффективность работы предприятия. Расширение номенклатуры, увеличение сложности и сменяемости выпускаемых изделий требуют автоматизации функций оперативного управления, основу которых составляют календарное планирование и регулирование производственных процессов.

Теоретические основы решения задач оперативно-календарного планирования дискретных производственных процессов сформировались к концу 60-х годов нынешнего столетия. Однако поиск методов и средств построения реальных автоматизированных систем управления остается актуальным и в настоящее время. Это объясняется тем, что для большинства практически важных задач отсутствуют эффективные методы решения, а зачастую и четкая математическая формулировка задачи вызывает существенные трудности. Необходимость организации человеко-машинных процессов поиска и принятия решений, использования эвристик выдвигает специфические требования к средствам автоматизации. Традиционные модели, используемые в математических постановках задач оперативного управления, слабо приспособлены для непосредственного создания на их основе инструментальных компьютерных систем. Затруднения вызывает необходимость представления конвейерных процессов и сложных ресурсных отношений, наглядного отображения текущего состояния и динамики производства при получении прогнозов и ретроспектив, необходимых для обоснованного принятия решений. Кроме того, требуется автоматизация выполнения функций, связанных с построением и модификацией информационной модели, формированием эвристических алгоритмов на основе определенных схем имитации, множеств приоритетных правил, способов адаптации. Необходимы средства накопления и использования опыта решения практических задач. В литературе неоднократно отмечалась потребность в единой модели, позволяющей организовать эффективный человеко-машинный процесс оперативного управления деятельностью подразделений предприятия, находящихся на различных уровнях иерархии.

Внедрение в промышленность персональных профессиональных ЭВМ и сетей открывает новые возможности для создания автоматизированных систем, связанные с высокой доступностью средств вычислительной техники, наличием интерактивного графического интерфейса, мобильностью информационного обмена.

Перечисленные выше факторы обуславливают необходимость исследования и поиска новых моделей, методов и средств построения авто-

матизированных систем, обеспечивающих высокую эффективность человеко-машинных процессов решения задач оперативного управления дискретным производством.

Целью работы является исследование формальных моделей, разработка методов, алгоритмических и программных средств построения систем оперативного управления дискретным производством, удовлетворяющих современному уровню развития и использования вычислительной техники.

Основные задачи. В соответствии с поставленной целью в работе решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ комплекса задач оперативного управления дискретным производством и определен современный уровень требований к средствам автоматизации процесса их решения.

2. Разработана архитектура системы оперативного управления, основанной на интеграции методов теории сетей Петри, искусственного интеллекта, эвристических методов теории расписаний и средств интерактивной машинной графики.

3. Разработаны методы исследования дискретных производственных процессов, представленных временными нагруженными сетями Петри, и эквивалентных преобразований сетевых моделей Петри.

4. Разработан алгоритм решения комплекса задач оперативного управления на сетях Петри. Определена структура базы знаний средств интеллектуальной поддержки процесса решения.

5. Осуществлена реализация типового модуля системы оперативного управления на основе разработанных архитектурных принципов, алгоритмов и методов.

6. Типовой модуль применен для создания распределенных систем управления на конкретных машино- и приборостроительных предприятиях. Исследованы вопросы эффективности предложенного подхода.

Методы исследований. Для решения указанных задач использованы методы теории управления организационными системами, теории сетей Петри и теории расписаний, математического программирования, а также методы линейной алгебры, теории множеств, теории иерархических систем и искусственного интеллекта.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. В качестве модели дискретных производственных процессов для решения задач оперативного управления использованы временные нагруженные сети Петри с многоканальными переходами. Динамика сети описана уравнением состояний.

2. Уравнение состояний временных нагруженных сетей Петри и его приближенная линейная форма записи применены для исследования

свойств сетевых моделей и решения задач планирования.

3. Для подкласса простых сетей получена система уравнений, явно описывающая передаточную функцию по отношению к заданным входным и выходным позициям. Разработаны методы эквивалентных формульных преобразований временных нагруженных сетей.

4. Предложена методика формирования эвристических схем решения задач календарного планирования путем дополнения уравнения состояний сети набором функций предпочтения. Построены глобальные функции предпочтения, необходимые для разрешения сложных ресурсных конфликтов.

5. Разработаны человеко-машинный алгоритм решения задач оперативного управления дискретным производством на сетях Петри и структура базы знаний средств интеллектуальной поддержки процесса управления.

Практическая ценность работы. На основе разработанных математических моделей, методов и алгоритмов создан типовой программный модуль системы оперативного управления дискретным производством.

Высокая изобразительная мощность информационной модели, наличие в составе типового модуля средств адаптации позволяют конструировать на его основе многоуровневые распределенные системы оперативного управления, настраиваемые на информационную среду функционирования и комплекс технических средств. Дружественный графический интерфейс обеспечивает эффективность человеко-машинных процессов решения производственных задач.

Реализация результатов работы. Разработанный типовой программный модуль "Опера" применен для автоматизации межцехового планирования на Стахановском машиностроительном заводе, для построения многоуровневых распределенных систем оперативного управления на Донецком заводе "Топаз" и в Запорожском производственном объединении "Моторостроитель". Основные положения диссертации внедрены в учебный процесс в Донецком политехническом институте.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы разработки автоматизированных систем управления" (Паланга, 1990), Одиннадцатом Всесоюзном симпозиуме "Системы программного обеспечения решения задач оптимального планирования" (Кострома, 1990), Всесоюзной конференции "Математическое и имитационное моделирование в системах проектирования и управления" (Чернигов, 1990), Всесоюзной научно-технической конференции "Интеграция АСУТП и тренажерных устройств" (Украинка, 1991), V Всесоюзной конференции "Машинная графика 89" (Ново-

сибирск, 1989), Научно-технической конференции "Программно-методические и программно-технические комплексы САПР и АСПИ" (Ижевск, 1988), VII научно-техническом семинаре "Математическое обеспечение систем с машинной графикой" (Ижевск-Тюмень, 1990).

Публикации. Основные положения и результаты диссертации отражены в восьми опубликованных работах, научно-техническом отчете и методическом пособии для студентов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 112 страницах машинописного текста, иллюстрированного 23 рисунками, а также содержит список литературы из 103 наименований и четыре приложения. Общий объем работы - 174 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность темы диссертации, поставлена цель исследований и дана общая характеристика работы.

В первой главе выполнен анализ традиционных методов решения задач оперативного управления дискретным производством и предложен подход к созданию средств автоматизации управления, базирующийся на интеграции эвристических методов календарного планирования, методов теории сетей Петри, искусственного интеллекта и комплексном применении интерактивной машинной графики. Разработана архитектура системы управления.

Процесс оперативного управления дискретным производством состоит в реализации трех основных функций: планирования, контроля и регулирования. В работах В.М.Глушкова, В.В.Шкурбы, Т.П.Подчасовой и других ученых обоснована необходимость применения методов эвристического типа для решения практических задач оперативно-календарного планирования и разработана концепция процесса поиска решений как управляемого эксперимента с моделью. В традиционных сетевых моделях представлены последовательные и параллельные процессы, потребляемые и восстанавливаемые ресурсы.

Моделирование производства сетями Петри позволяет на основе минимального набора основных элементов (позиция, переход, дуга) отображать последовательные, параллельные, альтернативные и конвейерные процессы совместно с ресурсными отношениями. В дополнение к потребляемому и восстанавливаемому типам ресурсов представлено частичное потребление ресурса, характерное для оснастки, инструмента, а также закрепление ресурса для выполнения нескольких работ. Понятия состояния и динамики входят в определение сети. Функционирование сети формально описывается уравнением состояний.

Эвристические методы календарного планирования реализуются как рекуррентные вычисления по уравнению состояний сети, дополненному оператором приоритетного выбора запускаемых работ. Расширение изобразительной мощности модели оправдано, так как не приводит к увеличению вычислительной сложности процесса формирования решений.

Сеть Петри рассматривается как частный случай семантической сети, что позволяет применить методологию представления и обработки знаний теории искусственного интеллекта для автоматизации процессов конструирования и модификации моделей. Средства интеллектуальной поддержки необходимы также для реализации эвристических методов планирования и накопления опыта решения практических задач.

Комплексное применение средств машинной графики позволяет организовать эффективный человеко-машинный процесс решения задач управления. Сеть Петри графически представлена двудольным ориентированным графом. Динамику сетевой модели отображает временная диаграмма, позволяющая наглядно сопоставлять фактическое и запланированное состояния процессов и ресурсов.

Архитектура системы управления включает подсистему представления знаний и данных, исполнительную подсистему, подсистему общения и адаптации.

Во второй главе для адекватного модельного представления дискретного производства в задачах оперативного управления введен класс временных нагруженных сетей Петри с многоканальными переходами (ВНСП); построено рекуррентное уравнение состояний, формально описывающее динамику сети; разработаны методы исследования поведенческих свойств и эквивалентных преобразований сетей.

Временная нагруженная сеть Петри с многоканальными переходами – это шестерка $G=(P,T,F,W,D,C)$, где $P=\{p\}$ – конечное множество позиций; $T=\{t\}$ – конечное множество переходов; $F \subseteq P \times T \cup T \times P$ – отношение инцидентности; $W: F \rightarrow \mathbb{N}^0$ – нагружающее отображение; $D: T \rightarrow \mathbb{N}$ – временное отображение; $C: T \rightarrow \mathbb{N}$ – отображение, задающее количество каналов переходов; \mathbb{N} – множество натуральных чисел; \mathbb{N}^0 – множество целых неотрицательных чисел.

На множестве позиций P задана функция $M: P \rightarrow \mathbb{N}^0$, называемая маркировкой. Маркировка сети в такте τ – это множество чисел $M(\tau)=\{\mu(p,\tau) | p \in P\}$. Динамика ВНСП представляет собой процесс изменения маркировки в результате запусков и завершений переходов. Обозначим σ допустимую последовательность запусков переходов

$\sigma=U(0), U(1), \dots, U(\tau^*)$, $U(\tau)=\{u(t,\tau) | t \in T\}$, где $u(t,\tau)$ – количество запущенных в такте τ каналов перехода t . Состояние ВНСП – это пара $S(\tau)=(S^P(\tau), S^T(\tau))$, где $S^P(\tau)=M(\tau)$ – со-

стояние позиций, а $S^T(\tau)=U(\tau)$ – состояние переходов сети ($U(\tau)=\{u(t,\tau-\theta) | t \in T, \theta=\overline{0, D(t)-1}\}$). Маркированной ВНСП назовем пару $N=(G, S_{\sigma})$, где $S_{\sigma}=S(0)$. $\mathcal{R}(N)=\{S | \exists \sigma: S_{\sigma} \xrightarrow{\sigma} S\}$ – множество достижимых состояний маркированной ВНСП.

Показано, что динамика сети N формально описывается следующим уравнением состояний:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu'(p, \tau) = \mu(p, \tau-1) + \sum_{t \in T, (t, p) \in F} w(t, p) \cdot u(t, \tau-D(t)) + \alpha_p^{\tau}, \\ \mu(p, \tau) = \mu'(p, \tau) - \sum_{t \in T, (p, t) \in F} w(p, t) \cdot u(t, \tau), \\ \mu(p, \tau) \geq 0, \quad p \in P, \\ u'(t, \tau) = \& \mu'(p, \tau) \begin{matrix} w(p, t) \\ p \in P, (p, t) \in F \end{matrix} \& f'(t, \tau), \\ f'(t, \tau) = f(t, \tau-1) + u(t, \tau-D(t)), \\ f(t, \tau) = f'(t, \tau) - u(t, \tau), \\ u(t, \tau) \leq u'(t, \tau), \\ u(t, \tau) \geq 0, \\ f(t, 0) = c(t) - \sum_{\theta=\overline{-D(t)+1, 0}} u(t, \theta), \quad t \in T, \end{array} \right. \quad (I)$$

где f – количество свободных каналов перехода; μ' , f' – значения μ и f соответственно в момент смены тактов; u' – количество готовых к запуску каналов перехода; α – внешнее воздействие;

$$a \& b = \min(a, b); \quad a^b = \begin{cases} \lfloor a / b \rfloor, & b > 0, \\ \omega & , \quad b=0 \ \& \ a=0, \quad (\omega: \forall n \in \mathbb{N} \ \omega < n), \\ 0 & , \quad b=0 \ \& \ a \neq 0, \end{cases}$$

$$\tau=1, 2, 3, \dots$$

Рекуррентное уравнение состояний ВНСП (I) преобразовано в линейную матричную форму записи:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\mu} = \bar{\mu}_{\sigma} + A^+ \cdot \bar{\gamma}^+ - A^- \cdot \bar{\gamma}^- + \bar{\beta}, \\ |\bar{\gamma}^+ - \bar{\gamma}^-| \leq \bar{c}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где A^+, A^- – матрицы инцидентных нагрузок дуг сети; $\bar{\gamma}^+, \bar{\gamma}^-$ – характеристические векторы завершений и запусков переходов последовательности σ ; $\bar{\beta}$ – суммарное внешнее воздействие:

$$\gamma^+(t, \sigma) = \sum_{\theta=1, \tau^*} u(t, \theta-D(t)), \quad \gamma^-(t, \sigma) = \sum_{\theta=1, \tau^*} u(t, \theta), \quad \beta(p) = \sum_{\theta=1, \tau^*} \alpha_p^{\theta}.$$

На основании системы уравнений и неравенств (2) получены

необходимые условия достижимости заданного состояния, ограниченности и живости ВНСП, сформулированные в терминах инвариантов сети.

Исследованы передаточные функции, представленные ВНСП $\mathcal{N}=(N, I, O)$ по отношению к множествам входных ($I \subseteq P$) и выходных ($O \subseteq P$) позиций. Сеть \mathcal{N} преобразует входную последовательность маркеров α в выходную последовательность $\varphi = F_{\mathcal{N}}(\alpha)$. Функциональные зависимости можно также рассматривать относительно последовательностей частичных сумм β и ψ , построенных для α и φ соответственно. Следующая теорема позволяет получить явную аналитическую форму записи передаточной функции для характерного подкласса ВНСП.

Теорема I. Пусть \mathcal{N} – простая функциональная сеть ($\forall p \in P: |\{(p, t) | t \in T, (p, t) \in F\}| \leq 1$) & ($\forall (p, t) \in F: w(p, t) > 0$), тогда $\forall p \in (P \setminus I), \forall \tau > 0$

$$\varphi_p = \mu_p^o + \sum_{t \in T, (t, p) \in F} w(t, p) \cdot \&_{q \in P, (q, t) \in F} (\beta_{q \triangleright D(t)})^{w(q, t)}, \quad (3)$$

где \triangleright – операция временной задержки: $u \triangleright d = \begin{cases} 0, & \tau < d, \\ u(\tau - d), & \tau \geq d. \end{cases}$

Уравнения (3) применены для эквивалентных преобразований ВНСП. Эквивалентность рассматривается в функциональном смысле: $(\mathcal{N}_1 \simeq \mathcal{N}_2) \Leftrightarrow (\forall \beta: F_{\mathcal{N}_1}(\beta) = F_{\mathcal{N}_2}(\beta))$. Преобразования сетей выполняются путем алгебраических преобразований формул (3). При этом известный базис операций невременной сети, исследованный А.И.Слепцовым, дополнен операцией задержки \triangleright . Установлены следующие основные законы алгебры ВНСП:

1. $(u_1 \triangleright d) + (u_2 \triangleright d) = (u_1 + u_2) \triangleright d$.
2. $(u_1 \triangleright d) - (u_2 \triangleright d) = (u_1 - u_2) \triangleright d$.
3. $(u_1 \triangleright d) \& (u_2 \triangleright d) = (u_1 \& u_2) \triangleright d$.
4. $(c_1 \triangleright d_1) \& (c_2 \triangleright d_2) = (c_1 \& c_2) \triangleright \max(d_1, d_2)$.
5. $(u \triangleright d)^c = u^c \triangleright d + 0^c - 0^c \triangleright d$.
6. $(u \triangleright d_1) \triangleright d_2 = u \triangleright (d_1 + d_2)$,

где u, u_1, u_2 – функции времени; $c, c_1, c_2, d, d_1, d_2 = \text{const}$.

Полученные теоретические результаты иллюстрированы примерами исследования свойств и эквивалентных преобразований сетей.

В третьей главе разработанные формальные методы анализа и синтеза ВНСП применены для решения задач оперативного управления дискретным производством.

Показано, что ВНСП является адекватной моделью дискретного производства для решения задач оперативного управления. Переходы сети представляют работы, позиции – ресурсы. Маркировка позиции определяет количество доступных единиц ресурса. Работа может быть запущена, если имеются необходимые для ее выполнения ресурсы. Нагрузки входящих и исходящих дуг равны уровням затрат и выпуска

ресурсов при запуске и завершении работы соответственно. Многоканальность переходов сети позволяет моделировать параллельное выполнение работы для различных процессов в соответствии с имеющимся в наличии оборудованием. В отличие от традиционных сетевых моделей не требуется дублирование работ для представления конвейерных процессов. Изготовление планово-учетных единиц (ПУЕ) моделируется потоком маркеров, движущихся по сети и запускающих работы.

Построение и использование модели организованы как процессы порождения и интерпретации знаний. Конструктивами модели являются абстрактные знания – сети-прототипы. Формируются прототипы изготовления ПУЕ, включающие в себя агрегированную технологическую схему, дополненную ресурсными отношениями, и ресурсные прототипы подразделений, описывающие производственную систему.

Исходной информацией для построения модели является директивный план, регламентирующий порядок выпуска ПУЕ и выделения ресурсов. В процессе построения модели выполняется выбор альтернатив и назначение фактических ресурсов.

Состояние модели отражает фактическое состояние производства. Функции учета обеспечивают корректировку состояния в темпе реализации производственных процессов. Функции регулирования выполняются на основе сопоставления фактического и запланированного состояний, анализа прогнозов и ретроспектив, получаемых при моделировании динамики прямых и обратных сетей.

Предложено организовать эвристический алгоритм решения задачи оперативно-календарного планирования как процесс имитации динамики прямой либо обратной приоритетной ВНСП (N, \mathfrak{U}) , где \mathfrak{U} – оператор приоритетного выбора работ для запуска:

$$\mathfrak{U}: \begin{cases} - \sum_{t \in T, (p,t) \in F, u'(t,\tau) > 0} w(p,t) \cdot u(t,\tau) + \mu'(p,\tau) \geq 0, p \in P, \\ u'(t,\tau) - u(t,\tau) \geq 0, t \in T, \\ \mathfrak{p}(\bar{u}(\tau)) \rightarrow \max. \end{cases}$$

Неизвестными являются $u(t,\tau)$. Глобальная функция приоритета \mathfrak{p} во многих случаях может быть представлена в линейной форме, например:

$$\mathfrak{p}(\bar{u}(\tau)) = \sum_{t \in T, u'(t,\tau) > 0} (\rho_{\max} - \rho_t) \cdot u(t,\tau), \quad (4)$$

где ρ_t – резерв времени запуска работы. Результатом планирования является расписание запуска работ и обеспечения ресурсов $\{(t, \theta_t, u(t, \theta_t)) \mid t \in T, u(t, \theta_t) > 0\}$. Построены упрощенные схемы имитации с использованием локальных приоритетов, обеспечивающие полиномиальную сложность вычислений.

Сеть содержит технологические и ресурсные ограничения, исход-

ное состояние производства; входная последовательность моделирует график поставки ресурсов. Влияние дополнительных факторов, используемых при формировании критериев и систем ограничений оптимизационной задачи планирования, должно быть учтено в функциях приоритета. В диссертации приведены функции приоритета, учитывающие влияние потерь от нарушения директивных сроков (4), неиспользования имеющихся и привлечения дополнительных ресурсов.

Отсутствие формальных средств выбора функций приоритета требует интеллектуальной поддержки процессов постановки задачи планирования и построения эвристических алгоритмов ее решения. В работе определена структура базы знаний средств интеллектуальной поддержки. База знаний устанавливает соответствия между конкретными постановками задачи планирования, включающими определенные наборы критериев и ограничений, и схемами имитации, адаптации и приоритетов, составляющими основу построения эвристического алгоритма.

Агрегированная технологическая схема составляет остов сети-прототипа изготовления ПУЕ. Рекуррентные вычисления по уравнению состояний либо эквивалентные преобразования прямой (обратной) сети остова позволяют найти ранние (поздние) сроки запуска работ и определить резервы времени.

Подстановка в уравнение (2) известных $\bar{\gamma}^+$ и $\bar{\gamma}^-$ (в соответствии с планом выпуска ПУЕ) позволяет получить начальную маркировку обратной сети ($\tilde{\mu}_o = \bar{\mu}$) и проверить достаточность выделяемых ресурсов для выполнения плана ($\bar{\mu} \geq 0$). Необходимыми условиями реализуемости плана являются достижимость заданного конечного состояния сетевой модели, баланс затрат и выпуска ресурсов (по объему и уровню). Соотношения для грубой оценки баланса получены из уравнения состояний ВНСП (I) на основе фиксации времен затрат и выпуска ресурсов в пределах ранних и поздних сроков выполнения работ.

В четвертой главе описаны особенности программной реализации типового модуля системы оперативного управления "Опера". По результатам промышленной эксплуатации распределенных многоуровневых систем управления, построенных на основе типового модуля, выполнен анализ эффективности предложенного подхода.

Типовой модуль "Опера" реализован на IBM - совместимом персональном компьютере в системе программирования Turbo C. В модуле практически воплощены разработанные в диссертации архитектура системы управления, математические модели, методы и алгоритмы. Наличие в составе модуля средств адаптации позволяет конструировать на его основе многоуровневые распределенные системы управления.

Модуль "Опера" применен для построения систем управления с использованием отдельных ПЭВМ (Стахановский машиностроительный завод), в локальной сети ПЭВМ (ПО "Моторостроитель" г. Запорожье), в неоднородной сети – ЕС, СМ, ПЭВМ (завод "Топаз г. Донецк). Описаны способы формирования и модификации информационной модели при взаимодействии с эксплуатируемыми на предприятиях подсистемами АСУ.

Анализ эффективности практических реализаций показал, что применение типового программного модуля "Опера" снижает трудоемкость процессов оперативного управления в 1.7–9 раз, а также сокращает издержки производства за счет повышения качества планов, оперативности принятия и обоснованности диспетчерских решений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе анализа комплекса задач оперативного управления дискретным производством, традиционных методов их решения и существующих средств автоматизации, возможностей, предоставляемых широким распространением персональных компьютеров, обоснована необходимость поиска новых подходов к построению автоматизированных систем оперативного управления.

2. Предложен подход к построению средств автоматизации оперативного управления дискретными производственными процессами на основе интеграции методов теории сетей Петри, искусственного интеллекта, эвристических методов теории расписаний и средств интерактивной машинной графики.

3. Впервые введен класс временных нагруженных сетей Петри с многоканальными переходами и разработаны формальные методы исследования их свойств. Динамика сети описана уравнением состояний и приближенной системой линейных уравнений и неравенств. Получены необходимые условия достижимости, ограниченности, живости, определены инварианты сети. Установлена связь между свойствами прямых и обратных сетей.

4. Разработаны методы исследования функциональных зависимостей (передаточных функций), представленных временными нагруженными сетями Петри. Введен подкласс простых сетей, для которого получена явная форма записи вычисляемой сетью функции. Рассмотрен базис алгебраических операций, реализуемых временной сетью. Разработаны алгебраические методы эквивалентных формульных преобразований временных нагруженных сетей.

5. Разработаны методы конструирования сетей на основе абстрактных знаний – прототипов, позволяющие автоматизировать про-

цессы построения и модификации сетевых моделей. Сети-прототипы представляют собой интеллектуальный аналог системы календарно-плановых нормативов. Уравнения состояний временных нагруженных сетей Петри применены для исследования совместимости систем ограничений оптимизационной задачи календарного планирования в целях определения выполнимости плановых заданий аналитическими методами (без использования имитации динамики процессов).

6. Исследованы различные постановки задачи календарного планирования на сетях Петри. Предложен способ получения эвристических схем их решения путем дополнения уравнения состояний прямой либо обратной сети набором функций предпочтения. Обоснована необходимость применения глобальных функций предпочтения для разрешения сложных ресурсных конфликтов в сетях Петри. Задача выбора множества запускаемых работ с помощью глобальной функции предпочтения представлена как задача целочисленного линейного программирования. Предложены упрощенные эвристические схемы, обеспечивающие полиномиальную сложность вычислений.

7. Разработан человеко-машинный алгоритм решения комплекса задач оперативного управления на сетевых моделях Петри. Выбраны формы интерактивного взаимодействия специалиста в области управления с инструментальной компьютерной системой. Определена структура базы знаний средств интеллектуальной поддержки процесса решения задач планирования и регулирования производства.

8. Разработан типовой модуль ("Опера"), который применен для построения иерархических систем управления на машино- и приборостроительных предприятиях. Экономический эффект обуславливается сокращением издержек производства за счет повышения качества планирования, оперативности и обоснованности диспетчерских решений, активного характера взаимодействия ЛПР с компьютерной системой.

В заключение необходимо отметить, что результаты диссертации можно использовать для автоматизации управления в строительстве, при ремонте сложных объектов, — там, где необходимо организовать выполнение взаимосвязанного множества работ на ограниченных ресурсах. Теоретические результаты, полученные при исследовании временных нагруженных сетей, могут быть применены в других разделах науки.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Слепцов А.И., Зайцев Д.А. Р-технология моделирования параллельных структур и процессов // Программно-методические и программно-технические комплексы САПР и АСТП: Тез. докл. науч. —

техн. конф. –Ижевск, 1988. –С.62–63.

2. Слепцов А.И., Зайцев Д.А. Машинная графика в системе оперативного планирования и диспетчирования приборостроительного предприятия // Машинная графика 89: Тез. докл. V Всесоюз. конф. –Новосибирск, 1989. –С.157.

3. Слепцов А.И., Зайцев Д.А., Тельной В.А. Автоматизированное рабочее место диспетчера машиностроительного предприятия // Системы программного обеспечения решения задач оптимального планирования: Тез. докл. Одиннадцатого всесоюз. симп. –М., 1990. –С.170–171.

4. Слепцов А.И., Зайцев Д.А., Миланин А.А. Графическая система моделирования в интегрированной системе управления дискретным производством // Математическое и имитационное моделирование в системах планирования и управления: Тез. докл. Всесоюз. конф. –Чернигов, 1990. –С.154–155.

5. Слепцов А.И., Зайцев Д.А., Миланин А.А. Графическая система моделирования дискретных процессов // Математическое обеспечение систем с машинной графикой: Тез. докл. VII науч.–техн. семинара. –Тюмень, 1990. –С.32.

6. Слепцов А.И., Зайцев Д.А. Машинная графика в системе оперативного управления приборостроительным предприятием // Там же. –С.33.

7. Зайцев Д.А., Слепцов А.И. Визуализация производственных процессов в инструментальной системе диспетчера машиностроительного предприятия // Автометрия. –1990. –№4. –С.90–93.

8. Слепцов А.И., Зайцев Д.А. Система оперативного сетевого планирования и управления "Опера" // Интеграция АСУТП и тренажерных устройств: Тез. докл. Всесоюз. науч.–техн. конф. –М., 1991. –С.53–54.

9. Методические материалы к программному обеспечению системы оперативного сетевого планирования и управления "Опера": (Для студентов всех специальностей) / Сост.: А.И.Слепцов, Д.А.Зайцев. –Донецк: ДПИ, 1991. –68с.