

Ю.В. Тимофеев, В.А. Фадеев, А.Н. Шелковой, В.Д. Хицан, А.А. Ключко

## ИНТЕГРАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ PLM-РЕШЕНИЕМ

Основные положения концепции интеграционной технологической подготовки промышленного предприятия PLM-решением включают полное детальное описание, защищенное хранение и управляемое использование всей информации о продукции на протяжении всего жизненного цикла продукции с поддержкой целостности и непротиворечивости информации о продукции и поддержкой и управлением всеми бизнес-процессами, связанными с ними данными для распространения информации по всему предприятию. В состав PLM-решений на машиностроительного предприятия включены средства по управлению проектами, средства календарного планирования и управления требованиями с использованием средств Workflow, реально позволяющие автоматизировать бизнес-процессы в рамках всего предприятия.

**Ключевые слова:** интеграция, технологическая подготовка, машиностроительное предприятие, PLM-решение, информация, бизнес-процессы, функциональность; гибкость; масштабируемость, PDM-системы, САПР.

### Глоссарий

**CAD** – *Computer Aided Design* — проектирование изделий;

**CAE** – *Computer Aided Engineering* — инженерные расчеты;

**CAM** – *Computer Aided Manufacturing* — разработка управляющих программ для станков с ЧПУ;

**CAPP** – *Computer Aided Production Planning* — разработка техпроцессов;

**ERP** – *Enterprise Resource Planning* — планирование ресурсов предприятия;

**MES** – *Manufacturing Execution Systems* — системы оперативного управления производством;

**MPM** – *Manufacturing Process Management* — моделирование и анализ производства изделия;

**PLM** – *Product Lifecycle Management* — управление жизненным циклом продукции;

**PDM** – *Product Data Management* — управление данными о продукции;

**PM** – *Project Management* — управление проектами;

**Workflow** — управление документооборотом и бизнес-процессами предприятия.

**Введение.** Стратегической целью инжиниринга машиностроительного предприятия является внедрения PLM-решений для обеспечения реального управления информацией о продукции на протяжении всего ее жизненного цикла и таким образом добиться снижения себестоимости продукции, сократить сроки выпуска новой продукции, повысить конкурентоспособность предприятия, сделать его более прозрачным и управляемым.

**Основные положения концепции PLM.** Основные положения концепции PLM включают: 1) полное детальное описание, защищенное хранение и

управляемое использование всей информации о продукции на протяжении всего жизненного цикла продукции; 2) поддержка целостности и непротиворечивости информации о продукции на протяжении всего ее жизненного цикла; 3) поддержка и управление всеми бизнес-процессами и связанными с ними данными для распространения информации по всему предприятию.

При реализации PLM - решения на машиностроительном предприятии на первый план выходят следующие требования: функциональность; быстродействие; гибкость; масштабируемость; безопасность. При этом основным рабочим инструментом для сотрудников конструкторских и технологических служб становятся средства поиска информации, средства визуализации и формирования отчетных документов.

В состав PLM-решений на машиностроительном предприятии включаются средства по управлению проектами, средства календарного планирования и управления требованиями. Для этого использованы средства Workflow, реально позволяющие автоматизировать бизнес-процессы в рамках всего предприятия (рис. 1).

Для реализации организационно-функциональной совместимости конструкторско-технологических подразделений машиностроительного предприятия разработана ERP-системы [1]. Для этого реализована интеграция PDM-систем с САПР; интеграция между ERP и PDM системами (рис. 2).

ERP-система реализована в виде многоуровневой системы управления производством на базе MES-системы «Zenith». Она координирует работу CAD, CAPP, CAM и CAE систем.

Для этого используются методы тактического и стратегического планирования. Тактическое планиро-

вание производственного процесса выполняется МРМ-системой «GPS», а стратегическое - МРМ-системой «OMEGA», рис. 1.

Система управления проектами (PM) обеспечивает взаимодействие МРМ-системы «GPS» с САД-системами (AutoCAD, T-Flex, SolidWorks, КОМПАС) и САРР-системами (T-Flex Технология, Techcard, TechnologiCS, ТехноПро)..

МРМ «GPS» обеспечивает: прогнозирование состояния производственного процесса; формирование оптимальной структуры технологического процесса; моделирование отказов и задержек в системе обработки; нормирование вспомогательных операций.

При этом на производственном уровне ERP-система решает следующих задачи (рис. 3):

- формирование оперативного внутрицехового плана с учетом имеющихся заделов и станочного парка;
- диспетчерский контроль исполнения операций;
- контроль выполнения плана;
- расчет производственного плана загрузки производственных мощностей по различным критериям (максимальному коэффициенту загрузки оборудования, минимальному времени пролеживания деталей и т. д.);
- перерасчет в реальном времени производственного плана при возникновении внештатных ситуаций, например поломки станка;
- планирование материалов, необходимых для выполнения производственной программы;
- управление движением товарных потоков: снабжением, сбытом, организацией работы складов и транспортных служб, планированием схем доставки товара и сырья;
- расчет и документирование процессов закупки и продажи, создание сопроводительных документов для каждой партии деталей;
- расчет фактической себестоимости изготовленных изделий и основных средств;
- средства анализа бизнеса, позволяющие определить прибыльные и убыточные направления, динамику положения дел в бизнес-процессах, эффективность работы различных подразделений;
- управление персоналом.

Эффективность любого производства определяется временными, энергетическими и стоимостными характеристиками. Их воздействие на ход организационно-технологического проектирования производственной системы, как правило, носит комплексный характер, что в современных условиях приводит к необходимости повышения уровня мобильности и гибкости производственных систем при сохранении высокой производительности и надежности. Этим требованиям в полной мере отвечают гибкие производственные системы (ГПС), построенные на принципах агрегатирования обрабатывающих модулей (ГПМ).

Известно, что методы проектирования систем обработки массового и крупносерийного производства базируются на аналитических моделях, имеющих

развитый аппарат оптимизации. В то же время, методы проектирования ГПС в основном построены на имитационном моделировании, что само по себе еще не приводит к получению оптимальных организационно-технологических решений, а требует дополнительного статистического анализа модели.

Задача определения рациональных структур маршрутов обработки изделий решена как задача управления ресурсами в условиях ограничений на выбор основного и вспомогательного оборудования [2, 3]:

$$\left. \begin{aligned} TN &= \{T, P, I, O, M_0, \tau, PR\}; \\ P &= \{p_i\}, i = \overline{1, n}; \\ T &= \{t_j\}, j = \overline{1, m}; \\ I: T \times P &\rightarrow \{0, 1\}; \\ O: P \times T &\rightarrow \{0, 1\}; \\ M_0: P &\rightarrow Z_0; \\ \tau: T &\rightarrow R_0; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где P – конечное множество позиций (состояний ГПС); T – конечное множество переходов (методов преобразования объектов обработки в ГПС); I – функция следования (результаты применения функции T к объектам ГПС в состоянии P); O – функция предшествования (перечень условий – наличие состояний P необходимых для применения функции T); M<sub>0</sub> – начальное маркирование, задающее начальное распределение меток по позициям сети (состояние ГПС до начала моделирования); Z<sub>0</sub> – множество неотрицательных чисел (значений характеристик элементов и структур ГПС до начала моделирования); τ – функция времен срабатывания, сопоставляющая каждому переходу постоянное время срабатывания; R<sub>0</sub> – множество рациональных неотрицательных чисел (множество значений характеристик элементов и структур ГПС получаемых в ходе имитационного моделирования); PR – отношение приоритетности (порядка), задаваемое на множестве переходов T и определяющее порядок потребления меток возбужденными переходами в условиях конфликта меток (критерии выбора оптимальных параметров и структур ГПС, для сформировавшихся организационно-технологических и технологических условий на момент принятия решения).

Задача оптимального размещения технологического оборудования на планировке участка с заданной транспортной системой и местами загрузки (разгрузки) оборудования решена как задача максимизации загрузки основного технологического оборудования на основе минимизации суммарных транспортных перемещений между модулями L(X, Y, Θ, Λ).

$$\left\{ \begin{aligned} \min[L(X, Y, \Theta, \Lambda)] &= \sum_{i=1}^M \lambda_i s_i(x_i, y_i, \vartheta_i), \\ f_1(x_i, y_i, \vartheta_i, x_j, y_j, \vartheta_j) &\geq 0, \quad i \neq j, \quad j = 1, \dots, M, \\ f_2(x_i, y_i, \vartheta_i) &\geq 0, \quad i = 1, \dots, M, \\ f_3(x_j, y_j, \vartheta_j) &\geq 0, \quad j = 1, \dots, M, \end{aligned} \right. \quad (2)$$

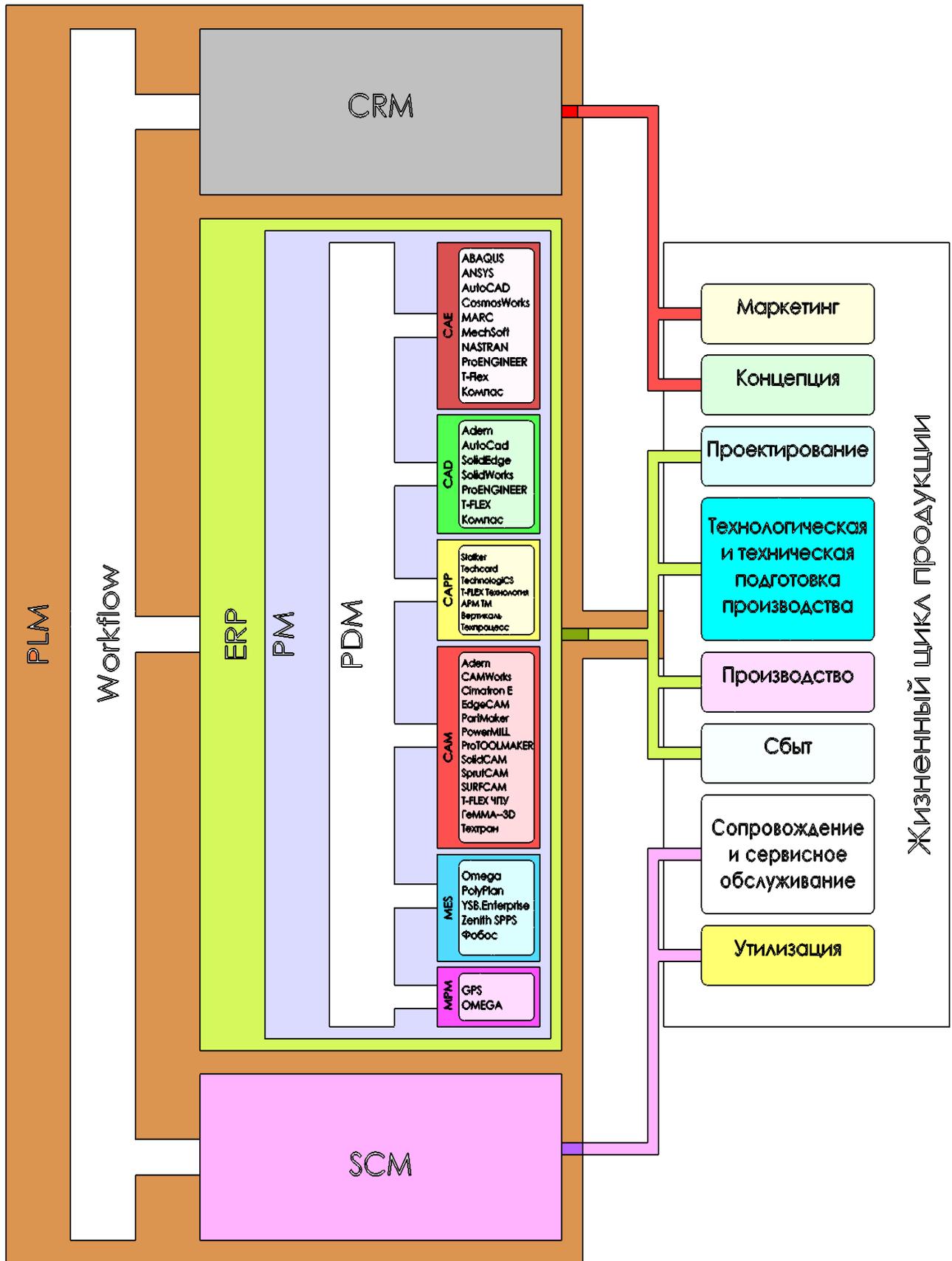


Рис. 1 – Схема формирования жизненного цикла продукции с использованием PLM – систем

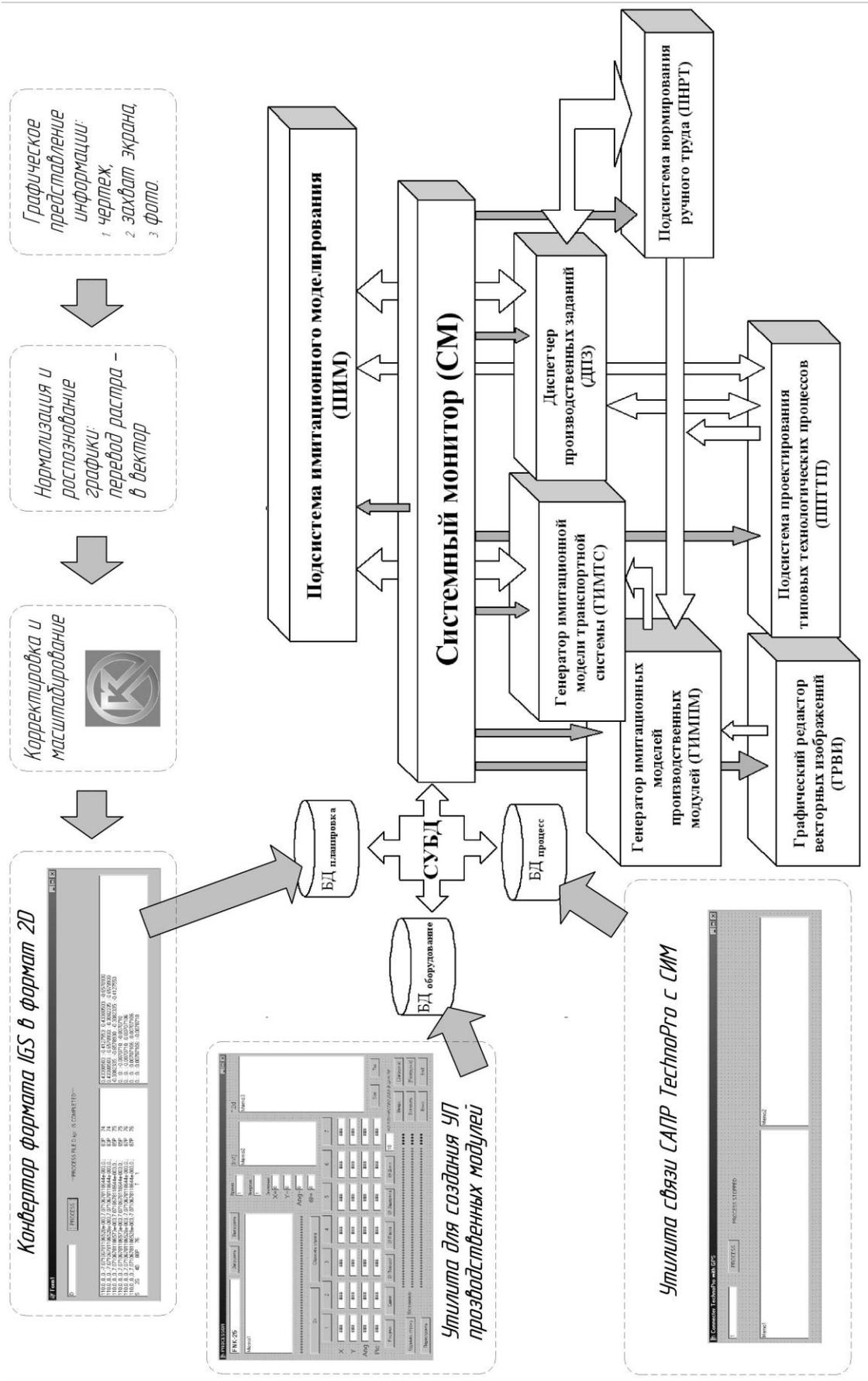


Рис. 2 – Функциональная схема ERP-системы машиностроительного предприятия

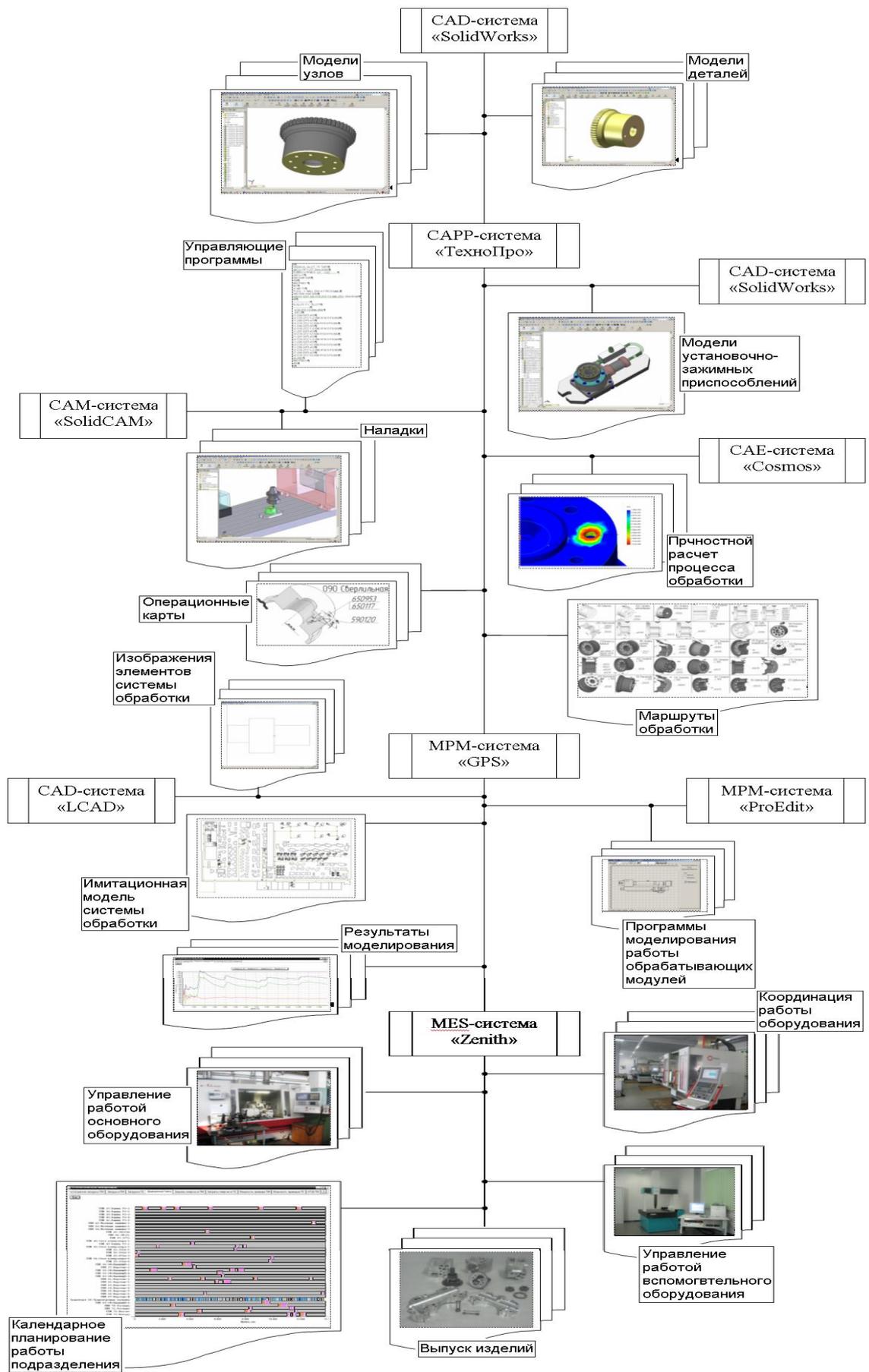


Рис. 3 – Фрагмент структуры PLM - системы промышленных агрегатов

где  $M$  - количество размещаемых объектов (модулей);  $\Lambda=(\lambda_1, \dots, \lambda_M)$  - вектор интенсивностей обращения модулей к транспорту;  $X=(x_1, \dots, x_M)$ ;  $Y=(y_1, \dots, y_M)$  - векторы координат точек привязки модулей;  $\Theta=(\upsilon_1, \dots, \upsilon_M)$  - вектор ориентации модулей относительно транспортных линий;  $S=(s_1, \dots, s_M)$  - вектор расстояний между модулями и складом.

Решение задач минимизации конфигурации ГПС и оптимизации последовательности запуска изделий на обработку реализовано путем анализа диаграммы работы ее оборудования и гистограммы средней загрузки модулей. В его основу положен алгоритм произвольной выборки партий обработки по критерию максимальной текущей загрузки основного оборудования. Получаемый при этом протокол состояния системы обработки является исходным материалом для текущего планирования.

К задачам энергосбережения относится задача формирования структуры производственной системы по энергетическим критериям (рис. 4). Она, в свою очередь, разбита на задачи минимизации затрат энергии на выполнение производственного задания и формирования парка оборудования с минимальной избыточностью энергетических параметров силовых установок.

В качестве критериев оптимизации использованы:

- эффективная мощность приводов технологического оборудования ( $N(t)$ ), (3);

$$N(t) = N_{гд}(t) + N_{под}(t), \quad (3)$$

где  $N_{гд}(t)$  - мощность привода главного движения,

$N_{под}(t)$  мощность привода подачи;

- работа исполнительных механизмов станка ( $A_j$ ), (4);

$$A_j = \sum N_j(t) \cdot t, \quad (4)$$

где:  $j$  - номер узла, входящего в производственный модуль и выполняющего технологическую операцию;  $N_j(t)$  - мощность привода  $j$ -го узла, используемая для выполнения элементарного движения;  $t$  - время работы  $j$ -го узла;

- коэффициент полезного действия производственной системы (отдельных станков (КПД<sub>ст</sub>), модулей (КПД<sub>мод</sub>), участка (КПД<sub>уч</sub>), цеха (КПД<sub>ц</sub>), транспортной системы (КПД<sub>ТС</sub>) (5)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{КПД}_{ст} = \frac{\sum A_{рез}}{\sum A_{ст}} \\ \text{КПД}_{мод} = \frac{\sum A_{рез}}{\sum A_{мод}} \\ \text{КПД}_{уч} = \frac{\sum A_{рез}}{\sum A_{уч}} \\ \text{КПД}_{ц} = \frac{\sum A_{рез}}{\sum A_{ц}} \\ \text{КПД}_{ТС} = \frac{\sum A_{ц} - \sum A_{ТМ}}{\sum A_{ц}} \end{array} \right. , \quad (5)$$

где  $A_{рез}$  - полезная работа сил резания, затраченная приводами главного движения и подачи станка;  $A_{ст}$  - общая работа, затраченная станком;  $A_{мод}$  - работа, затраченная всеми механизмами обрабатываемого модуля, имеющими электрические приводы (станками, манипуляторами, приспособлениями и др.);  $A_{мод}$  - работа, затраченная всеми подразделениями, входящими в участок и имеющими в качестве энергетических установок электрические двигатели (модули, транспортные устройства, накопители);  $A_{ц}$  - работа, затраченная всеми подразделениями, входящими в цех;  $A_{ТС}$  - работа, затраченная транспортным модулем на перемещение объекта обработки.

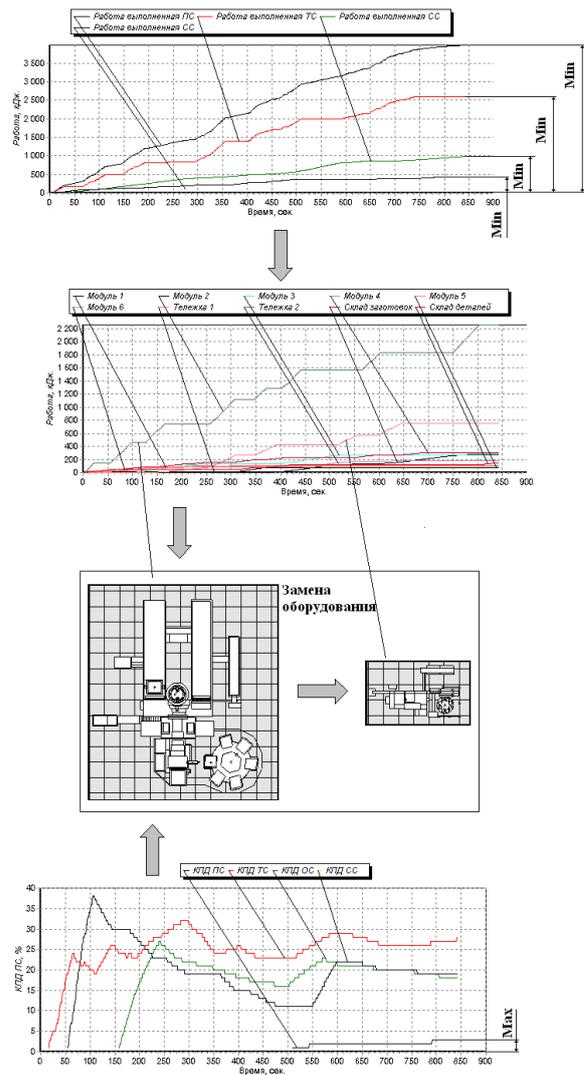


Рис. 4 – Последовательность замены оборудования ГПС в зависимости от уровня ее энергетических показателей

Подбор технологического оборудования по критерию минимальной энергоемкости системы обработки начинается с анализа объема работ, выполненных различными системами ГПС (рис. 4). Эта информация позволяет определить стратегию понижения затрат энергии в технологической системе (в приведенном примере наиболее энергоемким является транспортирование заготовок между модулями).

На следующем этапе определяется наиболее энергоемкий модуль, входящий в систему выбранную для оптимизации. При этом возможны следующие варианты стратегии выбора:

- выбор модуля по значению выполненной работы ( $\max(A_i)$ );
- выбор модуля по наиболее энергоемкой силовой установке ( $\max(N(t))$ );
- выбор модуля по критерию минимальной эффективности использования энергии ( $\min(KPD_{\text{мод}})$ ). 5.

В рассматриваемом примере (рис. 4) наименьшей энергетической эффективностью обладает обрабатывающая система ( $KPD_{\text{ос}}=18\%$ ). В ее состав входит наиболее энергоемкий модуль (Модуль 2 – ИР800ПМ2Ф4,  $A_2=2200$  кДж). Его замена на менее энергоемкое оборудование (на пример, Модуль 1 – 1В340Ф30) может существенно понизить энергетические затраты в системе обработки. Для принятия окончательного решения о его замене необходимо дополнительно провести сравнительный функциональный анализ основного и вспомогательного оборудования взаимозаменяемых модулей.

#### Выводы

1. Предложена и теоретически обоснована система объективных критериев оценки технологических решений, характеризующие объект обработки, технологический процесс формообразования и формообразующее оборудование и позволяющие осуществлять синтез и анализ технологических систем механической обработки в точном машиностроении и технологическое прогнозирование в металлообработке.

2. Разработаны прикладные основы автоматизированных систем синтеза и анализа структурно-параметрических характеристик технологических систем механической обработки, базирующихся на алгоритмах комплексных и локальных САПР.

3. Создание принципов гарантированной технологии механической обработки, характерной при изготовлении высокоточных деталей, базируется на технологическом прогнозировании, целью которого является определение на перспективу изменений структурно-параметрических характеристик технологических процессов и реализующих их оборудования и средств оснащения, которые формируются на основе анализа структуры и параметров объекта обработ-

ки, а также адекватных изменений затрат на производство.

4. Разработанная методика технологического прогнозирования развития позволяет промышленному предприятию эффективно подойти к выработке перспективного плана развития, к составлению ежегодных бизнес-планов модернизации производства и комплектации современным металлорежущим оборудованием, инструментом и измерительной техникой.

**Список литературы:** 1. Тимофеев, Ю.В. Сетевое многоуровневое представление организационно-технологических структур производственных систем / Ю.В. Тимофеев, А.Н. Шелковой, Ю.Г. Гуцаленко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Збірка наукових праць. Тематичний випуск Технологія в машинобудуванні. - Харків: НТУ "ХПІ", 2005. - No23. - С.194-213. 2. Тимофеев, Ю.В. Модернизация организационно-технологической структуры участка обработки детали «Стакан верхній» / Ю.В.Тимофеев, А.Н.Шелковой, А.А. Пермяков // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: Збірка наукових праць. - Краматорськ: ДДМА. – Вип.19. – 2004. – С.75-81. 3. Фадеев, В.А. Синтез технологических систем механической обработки / В.А.Фадеев // Харьков: НТУ «ХПИ». – 2007.- 187 с. 4. Шелковой, О.М. Досвід застосування імітаційного моделювання при вирішенні задачі модернізації виробничих підрозділів авіаційної промисловості / О.М.Шелковой, В.А. Фадеев, Ю.Г. Гуцаленко, Є.А. Костигів // Авіаційно-космічна техніка і технологія: Научно-технічний журнал. – Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського, „ХАІ”. – Харьков, 2008. – Вип. 7/54. – С.181 –188.

**Bibliography (transliterated):** 1. Timofeev, Y. V., Shelkowsky, A. N., Gucalenco Y.G., *Multilevel Network view of organizational and technological structures of production systems*. Of the National technical University "Haruki poltechnic": Zbirka scientific essays. Tematiczny release Technology in mashinobuduvannia. - Kharkiv: NTU "KhPI", 2005. No. 23. - P. 194-213. 2. Timofeev Y. C., Shelkowsky A. N., Permyakov A. A. *Modernization of organizational and technological structure of the site machining "Glass top" // Natinst instrumentu the optimization of technological systems: Zbirka scientific essays*. - Kramatorsk: DDMA. - Vol.19. - P. 75-81. 3. Fadeev V.A. *Synthesis of technological systems mechanical processing*. - Kharkov: NTU "KhPI". - 2007.- 187 P. 4. Shelkowsky O. M., Fadeev V. A., Gucalenco Y. G., Kostygov E.A. *Dosvid prospective meeting, and when wirsen zadach moderncat of virobnychih pdrogw avecina promislovist* Aerospace technics and technology: Scientific and technical journal. The national aerospace University. N. E. Zhukovsky "Khai". The Kharkiv, 2008. The vol. 7/54. The P. 181 - 188.

Поступила (received) 14.03.2015

**Тимофеев Юрий Викторович** – док. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Технология машиностроения и металлорежущие станки» НТУ «ХПИ», тел.: (057)-720-66-25;

**Фадеев Валерий Андреевич** – док. техн. наук, проф. Государственное предприятие харьковский машиностроительный завод „ФЭД”, Харьков;

**Шелковой Александр Николаевич** – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: shan-56@mail.ru;

**Хицан Валерий Дмитриевич** – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»; тел.: (057)-720-66-25;

**Ключко Александр Александрович** – док. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»; тел.: (057)-720-66-25.