

УДК 65.014.12
ББК 34.42-05

СИСТЕМА КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КОНСТРУКТОРСКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ МЕЛКОСЕРИЙНОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Денисов А. Р.¹, Белянкин М. В.²

(Костромской государственной университет имени Н.А.
Некрасова, Кострома)

Рассмотрены вопросы создания системы календарного планирования конструкторско-технологической подготовки мелкосерийного машиностроительного производства (КТТП), использующей технологию управления потоками работ (Workflow). Обосновывается, что в условиях мелкосерийного машиностроения необходим автоматизированный синтез Workflow-диаграмм, для чего предложена формальная модель процессов КТТП, базирующаяся на принципах управления конфигурацией, а также информационное и алгоритмическое обеспечение предлагаемой системы.

Ключевые слова: конструкторско-технологическая подготовка, календарное планирование, управление конфигурацией, мелкосерийное производство.

1. Введение

Одной из основных заявленных целей внешней политики РФ является вступление во Всемирную торговую организацию. Россия будет вынуждена открыть свои собственные рынки для иностранных компаний, что неизбежно приведет к усилению

¹ Артем Руфимович Денисов, кандидат технических наук, доцент (inf_service@ksu.edu.ru).

² Михаил Вячеславович Белянкин, аспирант (inf_service@ksu.edu.ru).

внутренней конкуренции [4]. При этом в ряде областей промышленности, например, в машиностроении, для отечественных предприятий внешние рынки останутся закрытыми. Одной из причин этого является низкая степень автоматизации систем управления предприятием и его производственными процессами, без чего невозможно решать задачи управления качеством продукции, повышения эффективности и прозрачности документооборота на всех этапах жизненного цикла выпускаемой продукции, внедрения интегрированной логистической поддержки потребителей.

Повысить конкурентоспособность отечественных предприятий можно через внедрение современных производственных и управленческих технологий, основанных на процессном подходе. Данный подход является необходимым условием с точки зрения большинства международных стандартов, в том числе, стандартов управления качеством ISO 9000, и должен быть внедрен на всех этапах жизненного цикла продукции, включая и конструкторско-технологическую подготовку производства (КТПП). Важной задачей при реализации процессного подхода является календарное планирование производственных процессов. В частности, необходимость планирования на этапе КТПП регламентируется ГОСТом [2 п. 5.2.5, 6.1.2, 7.2.2, 7.3.4, 7.4.4.].

Для решения задачи календарного планирования процессов КТПП принято использовать т.н. PDM-системы (Product Data Management). Для этого в данные системы включены специальные модули, которые позволяют представить процессы КТПП в виде совокупности Workflow-диаграмм [3, 7]. Подобная функция есть в большинстве представленных на рынке PDM-систем, включая SmarTeam, WindChill, T-Flex DOCs, Аскон Лоцман:PLM и др.

При этом следует заметить, что Workflow-моделирование является очень трудоемким процессом и, соответственно, его применение при планировании процессов КТПП целесообразно только в случае устоявшейся номенклатуры выпускаемых изделий, то есть на предприятиях с крупно- и среднесерийным производством. В мелкосерийном же машиностроении, которое характеризуется постоянными изменениями в номенклатуре изго-

тавливаемых изделий, использование данного механизма либо будет высокочрезвычайно затратным, либо будет носить общий характер (работы будут соответствовать этапам КТПП [1]). В любом случае, это сделает календарное планирование процессов КТПП неэффективным.

2. Формальная модель подсистемы календарного планирования процессов КТПП

Повысить эффективность календарного планирования можно через автоматизацию синтеза Workflow-диаграмм. Для этого целесообразно использовать принципы управления конфигурацией [5,6,8]. В проектируемом изделии выделяются объекты конфигурации, которые обычно являются типовыми для предприятия, что позволяет осуществлять планирование процессов КТПП с достаточной степенью точности. Тогда проектируемое изделие можно представить как:

$$(1) \quad Pu_i = \langle Ok_i, Sv_i, Doc_i, T_i, R_i, Tv_i \rangle, \quad i = 1, \dots, |Pu|,$$

где Pu – множество всех проектируемых на предприятии изделий; Ok_i – множество объектов конфигурации i -го изделия; Sv_i – множество всех связей между объектами конфигурации (ОК) в архитектуре i -го изделия; Doc_i – множество всех документов, создаваемых в процессе проектирования i -го изделия; T_i – трудоемкость проектирования i -го изделия; R_i – другие виды расходов на проектирование i -го изделия; Tv_i – время проектирования i -го изделия.

При этом каждый объект конфигурации имеет вид:

$$(2) \quad Ok_{ij} = \langle B_{ij}, ПГ_{ij}, ДОК_{ij}, Ток_{ij}, Рок_{ij}, Тн_{ij}, Тк_{ij} \rangle, \quad i = 1, \dots, |Pu|, \\ j = 1, \dots, |Ok_i|,$$

где B_{ij} – важность Ok_{ij} в изделии; $ПГ_{ij}$ – проектная группа, ответственная за проектирование Ok_{ij} ; $ДОК_{ij}$ – множество всех документов, создаваемых в процессе проектирования Ok_{ij} :

$$(3) \quad \forall i : Doc_i = \left(\bigcup_{j=1}^{|Ok_i|} ДОК_{ij} \right) \cup Du_i ;$$

$Ток_{ij}$ – трудоемкость изготовления объекта конфигурации Ok_{ij} :

$$(4) \quad \forall i: T_i = Tu_i + \sum_{j=1}^{|Ok_i|} Tok_{ij};$$

Rok_{ij} – множество других расходов на проектирование Ok_{ij} ;

$$(5) \quad \forall i: R_i = Ru_i + \sum_{j=1}^{|Ok_i|} Rok_{ij};$$

Tn_{ij} , Tk_{ij} – время начала и окончания проектирования Ok_{ij} ; Du_i – множество всех документов, непосредственно связанных с проектированием i -го изделия; Tu_i и Ru_i – трудоемкость и другие виды расходов, непосредственно связанные с проектированием i -го изделия.

Пример конфигурации станка класса ШЛПС, выпускаемого на одном из предприятий Костромской области, приведен на рис. 1.

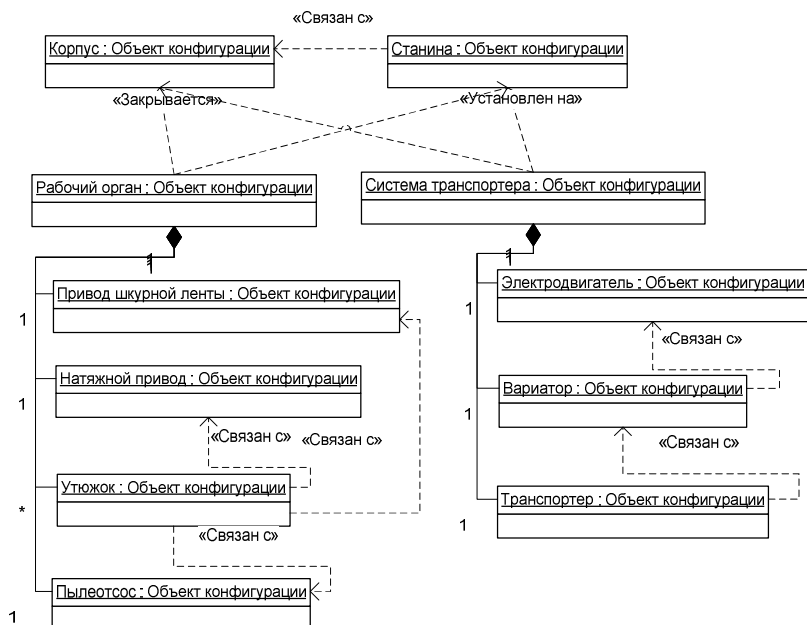


Рис. 1. Конфигурация станка класса ШЛПС

Таким образом, становится возможным определение времени проектирования i -го изделия:

$$(6) \quad \forall i: T_{\mathcal{V}_i} = \sup_{\substack{x=1, \dots, |O_{K_i}| \\ y=1, \dots, |O_{K_i}|}} (T_{K_{ix}} - T_{H_{iy}}).$$

Для этого необходимо определить количество специалистов различного профиля, входящих в проектные группы:

$$(7) \quad ПГ_{ij} = \langle PГ_{ij}, M_{C_{ij}} \rangle, \quad i = 1, \dots, |Pu|, \quad j = 1, \dots, |O_{K_i}|,$$

где $PГ_{ij}$ – руководитель проектной группы $ПГ_{ij}$; $M_{C_{ij}}$ – множество специалистов различного профиля, входящих в проектную группу $ПГ_{ij}$:

$$(8) \quad M_{C_{ij}} = \{ \langle П_{C_{ijk}}, K_{C_{ijk}}, T_{C_{ijk}} \rangle, \quad k = 1, \dots, |M_{C_{ij}}| \}, \quad i = 1, \dots, |Pu|, \\ j = 1, \dots, |O_{K_i}|,$$

где $П_{C_{ijk}}$ – профиль соответствующих специалистов; $K_{C_{ijk}}$ – количество специалистов соответствующего профиля, входящих в проектную группу; $T_{C_{ijk}}$ – время выполнения k -го вида проектных работ для $O_{K_{ij}}$:

$$(9) \quad \forall i, \forall j: T_{O_{K_{ij}}} \approx \sum_{k=1, \dots, |M_{C_{ij}}|} (T_{C_{ijk}} \cdot K_{C_{ijk}}); \\ \forall i, \forall j: T_{K_{ij}} \approx T_{H_{ij}} + \sum_{k=1, \dots, |M_{C_{ij}}|} T_{C_{ijk}}.$$

Таким образом, целью календарного планирования является определение для каждого ОК числа проектировщиков, необходимого для достижения максимального сокращения сроков проектирования всего i -го изделия, а именно:

$$(10) \quad \forall i=1, \dots, |Pu|: T_{\mathcal{V}_i} \rightarrow \min.$$

При решении данной задачи необходимо учитывать:

– для проектирования любого ОК может быть задействовано только ограниченное число проектировщиков:

$$(11) \quad \forall i, \forall j, \forall k: M_n(O_{K_{ij}}, П_{C_{ijk}}) \leq K_{C_{ijk}} \leq M_x(O_{K_{ij}}, П_{C_{ijk}}),$$

где $M_n(O_{K_{ij}}, П_{C_{ijk}})$, $M_x(O_{K_{ij}}, П_{C_{ijk}})$ – минимальное и максимальное количество специалистов профиля $П_{C_{ijk}}$, необходимое для проектирования $O_{K_{ij}}$;

– штатное расписание предприятия также ограничивает число одновременно задействованных специалистов:

$$(12) \quad \forall i, \forall j, \forall k : \sum_{\substack{x=1, \dots, |OK_i|, \\ y=1, \dots, |MC_{ij}|, \\ T_{ij} = T_{ix} \vee T_{ij} = T_{ix}, \\ Pc_{ijk} = Pc_{ixy}}} Kc_{ixy} \leq Кол(Pc_{ijk}),$$

где $Кол(Pc_{ijk})$ – количество специалистов профиля Pc_{ijk} на предприятии.

– при планировании процессов проектирования необходимо учитывать связи, ранее определенные при построении архитектуры изделия:

$$Cv_{ij} = \langle OK\delta_{ij}, OKo_{ij}, Tcv_{ij} \rangle, \quad i = \overline{|Pu|}, \quad j = \overline{|Cv_i|}$$

$$(13) \quad \forall i, \forall j, \exists x, y = 1, \dots, |OK_i| : \left(\begin{array}{l} OK\delta_{ij} = OK_{ix} \wedge \\ \wedge OKo_{ij} \subseteq OK_{iy} \wedge T_{ix} \leq T_{iy} \end{array} \right),$$

где $OK\delta_{ij}$ – образующий элемент связи Cv_{ij} ; OKo_{ij} – второй элемент связи Cv_{ij} ; Tcv_{ij} – тип образуемой связи Cv_{ij} .

3. Информационное и алгоритмическое обеспечение подсистемы календарного планирования процессов КТПП

В соответствии с представленной формальной моделью были разработаны информационное (рис. 2) и алгоритмическое обеспечение процессов КТПП.

Алгоритм планирования процессов КТПП имеет вид:

1. Оценка важности B_{ij} каждого OK_{ij} в изделии, выбор формы контроля качества проектных работ при его разработке, определение максимального количества итераций цикла его проектирования ИТ(B_{ij}).

2. Определение «внешних» (по отношению к ОК) контрольных точек и формирование «внешних» итерационных циклов проектирования через:

– Формирование квазиоптимального плана выполнения проектных работ при заданном количестве специалистов, для чего был

использован «жадный» (GRASP) алгоритм с применением FFD¹ (первоначально располагают в убывающем порядке) эвристики:

$$(14) \forall i, \forall x, y=1, \dots, |O_{k_i}|: ((T_{ok_{ix}} > T_{ok_{iy}}) \rightarrow (T_{h_{ix}} \leq T_{h_{iy}})).$$

Тогда с учетом выявленных правил и ограничений (12)–(14) время начала проектирования любого ОК можно определить как:

$$(15) \forall i, \forall j: \left(T_{h_{ij}} = \min_{t \in [0; T_{\theta_i}]} (t) \right).$$

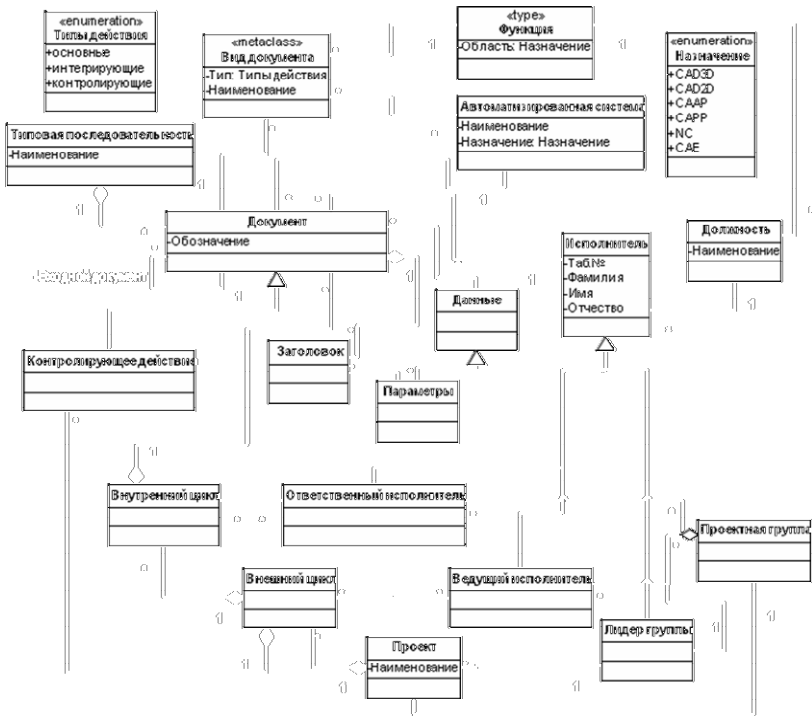


Рис. 2. Информационное обеспечение подсистемы календарного планирования процессов КТПП

– формирование квазиоптимального по критерию (10) распределения проектировщиков для разработки ОК изделия, где

¹ Выполняется только в случае соблюдения ограничений (12) и (13).

время проектирования ОК определяется по формуле (9), в которой время выполнения каждого вида работ оценивается через:

$$(16) \forall i, \forall j, \forall k : Tc_{ijk} \approx \frac{Tum_{ijk} \cdot ИТ(B_{ij})}{Kc_{ijk}},$$

где Tum_{ijk} – время выполнения k -го вида проектных работ для Ok_{ij} за одну итерацию, определяемое опытным путем.

Данная задача оптимизации решается методом пошагового улучшения (рис. 3) первоначального плана, в котором во всех ОК каждый вид работ выполняется минимально-возможным числом один проектировщиков Mn (Ok_{ij} , Pc_{ijk}).

3. Определение количества задействованных проектировщиков KCu_i в каждом виде работ ПС:

$$(17) \forall i, \forall PC : KCu_i(PC) = \max_{t \in [0; T\theta_i]} \left(\sum_{\substack{x=1, \dots, |Ok_i|, \\ k=1, \dots, |Mc_{ij}|, \\ Tn_{ix} \leq t, Tk_{ix} \geq t, \\ PC_{ixk} = PC}} Kc_{ixk} \right).$$

4. Назначение непосредственных исполнителей проектирования ОК изделия, формирование проектных групп.

4. Апробация подсистемы календарного планирования процессов КТПП

Для оценки эффективности предлагаемой подсистемы были проведены вычислительный эксперимент и апробация в реальных производственных условиях.

Вычислительный эксперимент¹ проводился с целью оценки временных затрат на календарное планирование процессов КТПП, в результате которого было выявлено, что эти затраты напрямую зависят от количества выполненных «жадных» процедур формирования календарных планов.

¹ Эксперимент проводился на ЭВМ Intel Pentium D 3000.

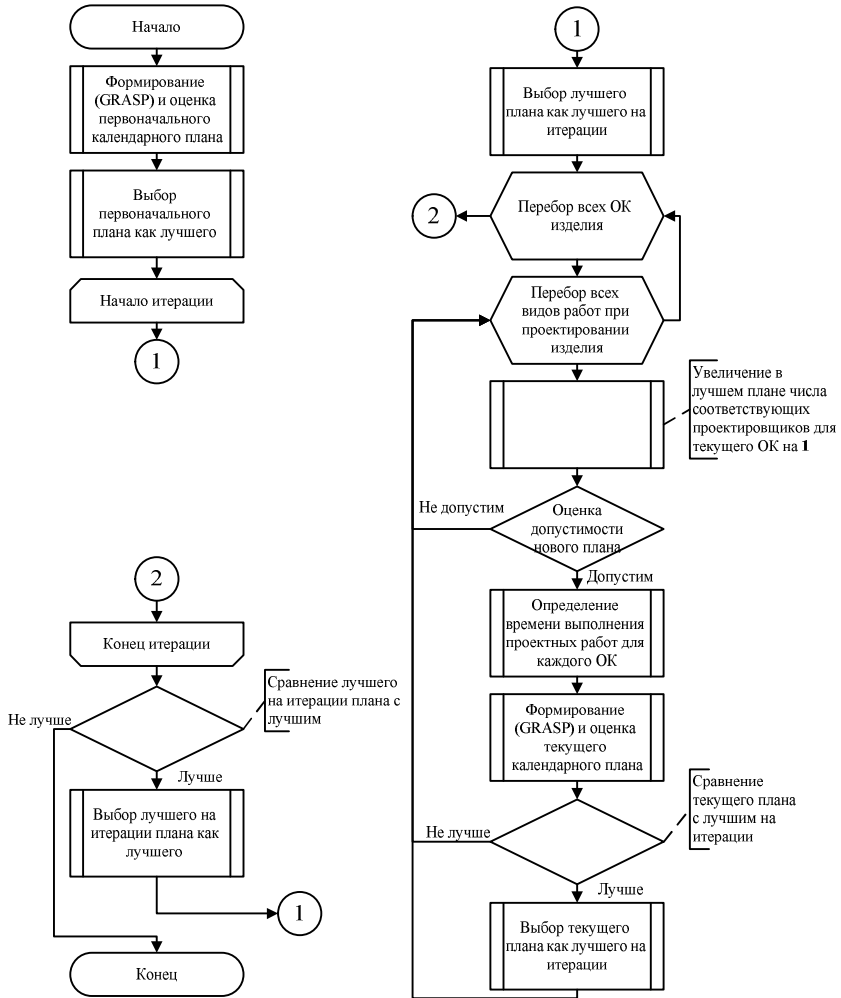


Рис. 3. Схема алгоритма формирования сетевого плана проектных работ

Из приведенного алгоритма видно, что максимально возможное количество таких процедур КП_i для *i*-го изделия составит:

$$(18) \quad КП_i = 1 + N_i \cdot M \cdot \prod_{j=1, \dots, |M|} (KC_j - 1), \quad \forall i = 1, \dots, |Pu|,$$

где N_i – количество ОК в i -м изделии; M – количество видов проектных работ, выполняемых в процессе КТПП на предприятии; KC_j – количество специалистов, выполняющих соответствующих вид проектных работ.

В результате эксперимента было выявлено, что на формирование (крайний случай) календарного плана для 1000 ОК на 300 специалистов (4 отдела по 75 человек) потребовалось примерно 324000 «жадных» процедур, что заняло около 4,5 часа. При этом критический путь в полученном календарном плане (время разработки ОК каждой службой выбиралось от 100 до 300 часов) составил – 10886 часов или 6 лет.

Время же формирования календарного плана для 100 объектов конфигурации на 300 специалистов (4 отдела по 75 человек) составило 63201 цикл или примерно 4 минуты.

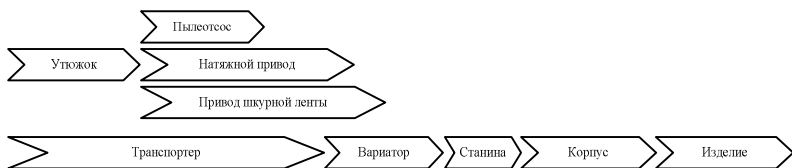


Рис. 4. Схема расчета критического пути проектирования станка ШЛПС-9

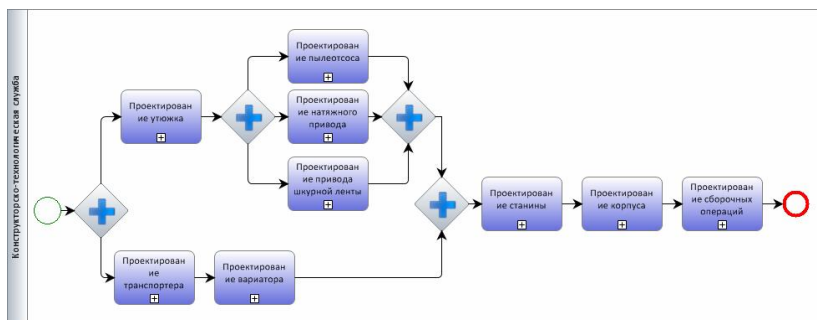


Рис. 5. Workflow диаграмма проектирования станка ШЛПС-9

Предлагаемый алгоритм был также опробован при планировании проектных работ для станка ШЛПС-9 (рис. 1), в результате чего был сформирован сетевой план, представленный на рисунке 4. Workflow-диаграмма проектирования данного станка приведена на рисунке 5.

Проведенные вычислительный эксперимент и экспертный анализ полученных результатов апробации показали высокую эффективность предлагаемой системы, что позволяет рекомендовать ее для внедрения в условия мелкосерийных машиностроительных предприятий.

Литература

1. ГОСТ 2.103–68. ЕСКД. *Стадии разработки*. – М., 1971.
2. ГОСТ Р ИСО 10006–2005. *Системы менеджмента качества. Руководство по менеджменту качества при проектировании*. М.: 2005.
3. КОСТРОВ А.В. *Основы информационного менеджмента*: учеб. для вузов.– 2-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 2008.
4. *Народнохозяйственные последствия присоединения России к ВТО*: доклад национального инвестиционного совета и Российской академии наук. 2002. URL: <http://www.wto.ru/ru/content/documents/docs/NIC1.doc> (дата обращения: 08.05.11).
5. СТАРОДУБОВ В. *Управление конфигурацией: задачи, стандарты и реализация* // CAD/CAM/CAE Observer. 2006. №4 (28). С. 30 – 33.
6. *Теория и методы управления конфигурацией*. – URL: <http://www.cals.ru/material/mater/UK.pdf> (дата обращения: 08.05.11).
7. ЯБЛОЧНИКОВ Е.И., МОЛОЧНИК В.И., ФОМИНА Ю.Н. *Реинжиниринг бизнес-процессов проектирования и производства*: учеб. пособие. СПб.: СПбГУИТМО, 2008.
8. *MIL-HDBK-61. Military handbook. Configuration management guidance*. Department of Defense, USA, 1997.

SYSTEM OF DESIGN PROCESSES SCHEDULING FOR SMALL-SCALE MACHINE-BUILDING MANUFACTURE

Artem Denisov, Kostroma State University named after N.A. Nekrasov, Cand.Sc., assistant professor (inf_service@ksu.edu.ru).

Mikhail Belyankin, Kostroma State University named after N.A. Nekrasov, post graduate student (inf_service@ksu.edu.ru).

Abstract: Problems are considered of workflow-based scheduling system development for design processes of small-scale machine-building manufacture. Automated construction of design process workflow diagrams is proved to be required for small-scale machine-manufacturing. Algorithms for workflow diagrams automated construction are implemented in an information system. The algorithms use a formal model of design processes based on configuration management principles.

Keywords: production design process, scheduling, configuration management, small-scale engineering manufacture.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Г.Н. Каляновым*