

УДК 681.3

**А.Т. Гурьев**

Гурьев Александр Тимофеевич родился в 1949 г., окончил в 1971 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, проректор по информационным технологиям и директор Института информационных технологий АГТУ. Имеет более 80 работ в области исследования процессов лесного комплекса.



### ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РЕМОНТА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Построены математические модели процессов эксплуатации изделий лесного машиностроения. Предложен метод интеграции функциональных и математических моделей ремонта техники.

*Ключевые слова:* ИПИ-технологии, жизненный цикл изделия, негативное воздействие внешней среды, полихроматические множества и графы, технология IDEF0.

Жизненный цикл (ЖЦ) любого изделия машиностроения состоит из следующих основных этапов: проектирование – производство – эксплуатация – утилизация (рис. 1). Каждый из этапов нуждается в анализе и информационной поддержке. В настоящее время существует множество работ (и даже программных комплексов), посвященных поддержке первых двух этапов. Этап эксплуатации ЖЦ изделий машиностроения изучен недостаточно глубоко.

В процессе эксплуатации каждое изделие претерпевает изменения своего состояния, которое обусловлено воздействием внешней среды. Все воздействия можно разделить на три типа: позитивные, негативные и нейтральные. Выводу системы из работоспособного состояния обычно предшествуют негативные воздействия.

Перед изучением вариантов возможных негативных воздействий и способов выхода из нерабочего состояния необходимо разработать специальную математическую модель.



Рис. 1. Этапы ЖЦ изделия

Рассмотрим структуру модели для погрузчика леса манипуляторного типа СФ-65С.

Анализ возможных отказов манипулятора позволил выделить основные элементы, выход из строя которых выводит или частично выводит из рабочего состояния всю систему (табл. 1). Категории и уровни критичности, согласно стандарту на проведение АВО, представлены в табл. 2.

Таблица 1

**Возможные отказы элементов манипулятора**

| Вершина в модели | Узел (деталь)   | Уровень критичности |
|------------------|---|---------------------|
| $A_1^1$          | Основание   | 1                   |
| $A_2^1$          | Стойка  | 1                   |
| $a_4^3$          | Гидроцилиндр нижней части стойки                          |                     |
| $A_3^1$          | Стрела  | 2                   |
| $A_9^2$          | Гидроцилиндры стрелы                                      |                     |
| $A_4^1$          | Рукоять   | 2                   |
| $a_{11}^2$       | Гидроцилиндры рукояти                                     |                     |
| $A_5^1$          | Аутригер  | 3                   |
| $A_6^1$          | Гидросистема  | 1                   |
| $a_{21}^2$       | Гидрораспределитель гидросистемы                          |                     |
| $a_{22}^2$       | Гидромотор гидросистемы                                   |                     |
| $a_{13}^3$       | Главный клапан предохранительного клапана гидросистемы    |                     |
| $a_{14}^3$       | Секционный клапан предохранительного клапана гидросистемы |                     |
| $A_7^1$          | Пульт управления  | 2                   |
| $a_8^1$          | Маслобак  | 2                   |
| $a_9^1$          | Ротатор   | 2                   |

Таблица 2

**Категории и уровни критичности**

| Индекс категории критичности | Уровень критичности                              |
|------------------------------|--|
| 1                            | Дальнейшая эксплуатация невозможна               |
| 2                            | Возможна непродолжительная эксплуатация          |
| 3                            | Возможна эксплуатация с некоторыми ограничениями |

Таблица 3

## Свойства элементов системы

|            | $F_{19}$ | $F_{20}$ | $F_{21}$ | $F_{22}$ | $F_{23}$ | $F_{24}$ | $F_{25}$ | $F_{26}$ | $F_{27}$ | $F_{28}$ | $F_{29}$ | $F_{30}$ | $F_{31}$ | $F_{32}$ | $F_{33}$ | $F_{34}$ | $F_{35}$ | $F_{36}$ |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $A_1^1$    | •        |          |          |          |          | •        |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| $A_2^1$    | •        |          |          |          |          | •        |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| $a_4^3$    |          |          |          |          |          |          | •        |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| $A_3^1$    |          | •        |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| $A_9^2$    |          |          |          |          |          |          |          | •        | •        |          | •        | •        | •        |          |          |          |          |          |
| $A_4^1$    |          | •        |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| $a_{11}^2$ |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| $A_5^1$    |          |          | •        |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          | •        |          |          |          |
| $A_6^1$    | •        |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| $a_{21}^2$ |          |          |          |          |          | •        |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| $a_{22}^2$ |          |          |          | •        |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| $a_{13}^3$ |          |          |          | •        |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| $a_{14}^3$ |          |          |          | •        | •        |          |          |          |          | •        |          |          |          |          |          |          |          | •        |
| $A_7^1$    |          | •        |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          | •        |          |          |
| $a_8^1$    |          | •        |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          | •        |          |
| $a_9^1$    |          | •        |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          | •        |          |          |          |          |

Булева матрица свойств элементов системы приведена в табл. 3, где отражены только те свойства, которые понадобятся для концептуального анализа работоспособности.

Все свойства элементов модели можно разделить на следующие группы.

1. Свойства, описывающие значения параметров, характеризующих узлы изделия и условия их функционирования:

$F_1$  – длина изделия;

$F_2$  – материал;

$F_3$  – рабочее давление;

$F_4$  – рабочая температура;

$F_5$  – гладкая оболочка;

$F_6$  – оболочка с оттиском на текстильном бандаже;

$F_7$  – наружный диаметр;

- $F_8$  – внутренний диаметр;  
 $F_9$  – диаметр входного отверстия;  
 $F_{10}$  – диаметр выходного отверстия;  
 $F_{11}$  – количество оборотов;  
 $F_{12}$  – пропускная способность;  
 $F_{14}$  – материал сетки;  
 $F_{15}$  – фирма-производитель;  
 $F_{16}$  – максимальное допустимое давление;  
 $F_{17}$  – место установки;  
 $F_{18}$  – скорость ограничения.

2. Свойства, определяющие степень критичности отказа:

- $F_{19}$  – 1-й уровень критичности;  
 $F_{20}$  – 2-й уровень критичности;  
 $F_{21}$  – 3-й уровень критичности.

3. Свойства, задающие функциональную неисправность:

- $F_{22}$  – манипулятор не развивает заданной грузоподъемности;  
 $F_{23}$  – манипулятор не удерживает поднятый груз;  
 $F_{24}$  – не поворачивается стойка;  
 $F_{25}$  – не поднимается (не опускается) стрела;  
 $F_{26}$  – не сгибается стрела;  
 $F_{27}$  – стрела не слушается управления;  
 $F_{28}$  – удлинитель самопроизвольно выдвигается;  
 $F_{29}$  – не сгибается;  
 $F_{30}$  – не удлиняется;  
 $F_{31}$  – рукоять не слушается управления;  
 $F_{32}$  – неэффективное отклонение;  
 $F_{33}$  – отсутствует устойчивость системы;  
 $F_{34}$  – отсутствует управление манипулятором, неверное выполнение команд;  
 $F_{35}$  – масло не поступает в систему;  
 $F_{36}$  – гидроцилиндры работают медленно или не работают.

Проведем анализ выделенных свойств. Рассмотрим свойства вершин, перечисленных в табл. 2.

$A_1^1$  – основание манипулятора:

$$F(A_1^1) = (F_{19}, F_{24}).$$

$A_2^1$  – стойка манипулятора:

$$\text{так как } a_4^3 \subset A_2^1, \text{ а } F(a_4^3) = (F_{25}), \text{ то } F(A_2^1) = (F_{19}, F_{24}, F_{25}).$$

$A_3^1$  – стрела манипулятора:

$$\text{так как } A_9^2 \subset A_3^1, \text{ а } F(A_9^2) = (F_{26}, F_{27}, F_{29}, F_{30}, F_{31}),$$

то  $F(A_3^1) = (F_{20}, F_{26}, F_{27}, F_{29}, F_{30}, F_{31})$ .

$A_5^1$  – аутригер манипулятора:

$$F(A_5^1) = (F_{21}, F_{33}).$$

$A_6^1$  – гидросистема манипулятора:

так как  $a_{21}^2 \subset A_6^1$  и  $a_{22}^2 \subset A_6^1$  и  $a_{13}^3 \subset A_6^1$  и  $a_{14}^3 \subset A_6^1$ ,

а  $F(a_{21}^2) = (F_{23})$ ,  $F(a_{22}^2) = (F_{22})$ ,  $F(a_{13}^3) = (F_{22})$ ,  $F(a_{14}^3) = (F_{22}, F_{23}, F_{28}, F_{36})$ ,

то  $F(A_6^1) = (F_{19}, F_{22}, F_{23}, F_{28}, F_{36})$ .

$A_7^1$  – пульт управления манипулятора:

$$F(A_7^1) = (F_{20}, F_{34}).$$

$a_8^1$  – маслобак манипулятора:

$$F(a_8^1) = (F_{20}, F_{35}).$$

$a_9^1$  – ротатор манипулятора:

$$F(a_9^1) = (F_{20}, F_{32}).$$

Введем в модель еще четыре свойства, которые характерны выделенным элементам и описывают текущее состояние системы (группа 4):

$F_{37}$  – возможна эксплуатация без ограничений;

$F_{38}$  – возможна эксплуатация с некоторыми ограничениями (3-й уровень критичности);

$F_{39}$  – возможна непродолжительная эксплуатация (2-й уровень критичности);

$F_{40}$  – эксплуатация невозможна (1-й уровень критичности).

Истинность свойств возможна только при выполнении следующих условий:

$$F_{37} = 1, \text{ если } F(A) = \overline{F_{22}} \wedge \overline{F_{23}} \wedge \overline{F_{24}} \wedge \overline{F_{25}} \wedge \overline{F_{26}} \wedge \overline{F_{27}} \wedge \overline{F_{28}} \wedge \overline{F_{29}} \wedge \overline{F_{30}} \wedge \overline{F_{31}} \wedge \overline{F_{32}} \wedge \overline{F_{33}} \wedge \overline{F_{34}} \wedge \overline{F_{35}} \wedge \overline{F_{36}};$$

$$F_{38} = 1, \text{ если } F(A) = \overline{F_{33}};$$

$$F_{39} = 1, \text{ если } F(A) = \overline{F_{26}} \wedge \overline{F_{27}} \wedge \overline{F_{29}} \wedge \overline{F_{30}} \wedge \overline{F_{31}} \wedge \overline{F_{32}} \wedge \overline{F_{34}} \wedge \overline{F_{35}};$$

$$F_{40} = 1, \text{ если } F(A) = \overline{F_{22}} \wedge \overline{F_{23}} \wedge \overline{F_{24}} \wedge \overline{F_{25}} \wedge \overline{F_{28}} \wedge \overline{F_{36}}.$$

Свойства  $F_{19} \dots 40$  будут унитарными: их существование зависит от существования других свойств. Истинность свойств  $F_{19} \dots 21$  зависит от численных значений свойств  $F_1 \dots 18$ . Взаимосвязи между ними определяют структуру базы данных для сбора информации об отказах элементов изделия. При дальнейшем анализе данная информация будет исходной для определения надежности данных узлов.

Задача обеспечения надежности техники может быть решена с помощью функционального моделирования и математического аппарата полихроматических множеств и графов\*.

Описание процесса ремонта изделий по стандартам CALS выполняется, используя технологии IDEF0. Анализ созданных функциональных диаграмм позволяет выявить «узкие» места устранения неисправностей и пути повышения эффективности ремонтных работ. При составлении функциональных диаграмм ремонта изделий возникают трудности с содержанием отдельных операций и детализацией диаграмм. Это связано с неопределенностью вариантов выполнения ремонта и отсутствием информации о возможных оптимальных реализациях этих операций. Поскольку этапы ремонта, как правило, являются взаимосвязанными, то дальнейшее составление диаграмм либо становится невозможным, либо развивается по одному из вариантов, который не всегда является рациональным (рис. 2).

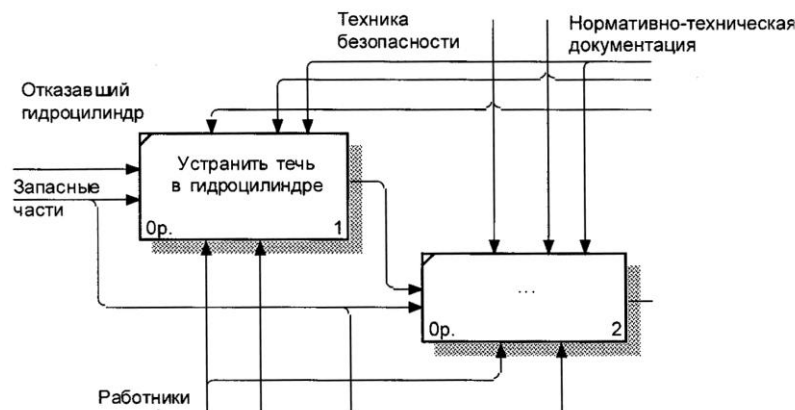


Рис. 2. Фрагмент функциональной диаграммы ремонта гидроцилиндра манипулятора СФ-65С

Выбрать оптимальное решение для проведения ремонта позволяет математический аппарат теории полихроматических множеств и графов, соответствующий международным стандартам в области CALS-технологий.

Математическая модель устранения неисправностей изделий состоит из моделей материалов (деталей) и операций, выполняемых над ними.

Модель материалов  $S(M)$  представляется в виде полихроматического множества

$$\Pi^{\vee} S_M = (M, F(M), [M \times F(M)]), \quad (1)$$

где  $M$  – множество материалов (комплектующих), используемых для устранения неисправности изделий;

\* Павлов В.В. CALS-технологии в машиностроении (математические модели) / В.В. Павлов; под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: ИЦ МГТУ СТАНКИН, 2002. – 328 с.

$F(M)$  – состав свойств, характеризующих материалы: характеристики применяемых материалов (технические и экономические), их универсальность, доступность и т.д.;

$[M \times F(M)]$  – булева матрица свойств конкретных материалов (деталей) для ремонта изделий.

Модель операций  $S(O)$  представляют в виде полихроматического множества

$$\Pi^{\vee} S_O = (O, F(O), [O \times F(O)]), \quad (2)$$

где  $O$  – множество операций, используемых для устранения неисправности изделий;

$F(O)$  – состав свойств, характеризующих операции: характеристики применяемых средств (оборудования), экономические и временные показатели ремонта, квалификация персонала и т.д.;

$[O \times F(O)]$  – булева матрица свойств конкретных операций по ремонту изделий.

Полихроматический граф, объединяющий модели  $S(M)$  и  $S(O)$ , используют для выбора оптимального решения при проведении ремонта:

$$\Pi G_{M,O} = (G, F(G), \Pi^{\vee} S_M, \Pi^{\vee} S_O), \quad (3)$$

где  $G = (M, O)$  – граф, вершинами которого являются элементы множества материалов (деталей)  $M$ , а дугами – элементы множества операций  $O$ ;

$F(G)$  – свойства графа;

$\Pi^{\vee} S_M$  – полихроматическое множество, характеризующее свойства вершин графа;

$\Pi^{\vee} S_O$  – полихроматическое множество, характеризующее свойства дуг графа.

Если материал (деталь)  $p_k$  рассматривается как возможный элемент в ремонте изделия  $A$  с требуемым составом свойств  $F(A)$ , то производственные возможности этого материала (детали) характеризуются следующими группами свойств.

1. Нереализованные в  $F(A)_{k-1}$  свойства, которые могут быть реализованы элементом  $p_k$ :

$$F(A)_k^I = \bar{F}(A)_{k-1} \wedge F(p_k) \wedge F(A), \quad (4)$$

где  $\bar{F}(A)_{k-1}$  – результат инверсии вектора  $F(A)_{k-1}$ .

2. Нереализованные в  $F(A)_{k-1}$  свойства, которые не могут быть реализованы элементом  $p_k$ .

$$F(A)_k^{II} = \bar{F}(A)_{k-1} \wedge \bar{F}(p_k) \wedge F(A), \quad (5)$$

где  $\bar{F}(p_k)$  – результат инверсии вектора  $F(p_k)$ .

3. Реализованные в  $F(A)_{k-1}$  свойства, которые могли бы быть реализованы элементом  $p_k$ :

$$F(A)_k^{III} = F(A)_{k-1} \wedge F(p_k). \quad (6)$$

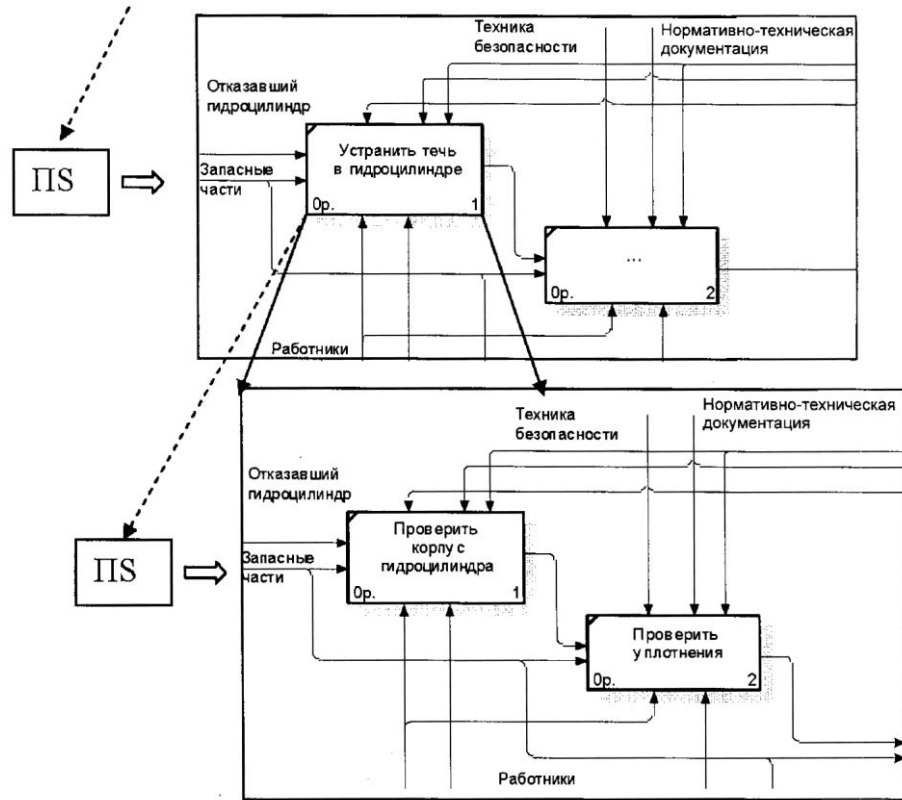


Рис. 3. Интеграция технологий IDEF0 и ПИС

4. Реализованные в  $F(A)_{k-1}$  свойства, которые не могли бы быть реализованы элементом  $p_k$ :

$$F(A)_k^{IV} = F(A)_{k-1} \wedge \bar{F}(p_k). \quad (7)$$

Модель операций  $S(O)$  анализируют по группам свойств аналогично модели  $S(M)$ .

Интеграция методологии функционального моделирования с математическим аппаратом полихроматических множеств и графов позволяет добиться эффективного проведения ремонтных работ в соответствии с международными стандартами.

При составлении функциональных диаграмм для выбора оптимального решения по выполнению ремонта обращаются к полихроматическому графу. На основе информации, предоставленной полихроматическим графом, происходит заполнение функциональной модели. Для каждого элемента функциональной диаграммы могут быть созданы и использованы свои математические модели, количество которых зависит от уровня декомпозиции функциональной модели и числа элементов (рис. 3).



*Выводы*

1. Использование системы моделирования с интеграцией методологии функционального моделирования IDEF0 и аппарата полихроматических множеств и графов позволяет повысить эффективность проведения ремонтных мероприятий в соответствии с международными стандартами.

2. Автоматизация выбора оптимального решения при проведении ремонта изделий позволит сократить время на поиск и анализ статистической информации по характеристикам материалов и комплектующих и выполняемым операциям.

3. Использование единого математического аппарата для формализации процессов системы моделирования восстановления работоспособности изделия обеспечит создание единой интегрированной среды взаимодействия участников ЖЦ изделий лесного машиностроения.

Архангельский государственный  
технический университет

Поступила 23.06.05

*A.T. Gurjev*

**Formalization of Repair and Exploitation Processes for Machinery**

Mathematical models for processes of exploitation of forest machines are developed. Method for integration of functional and mathematical models of machinery repair is offered