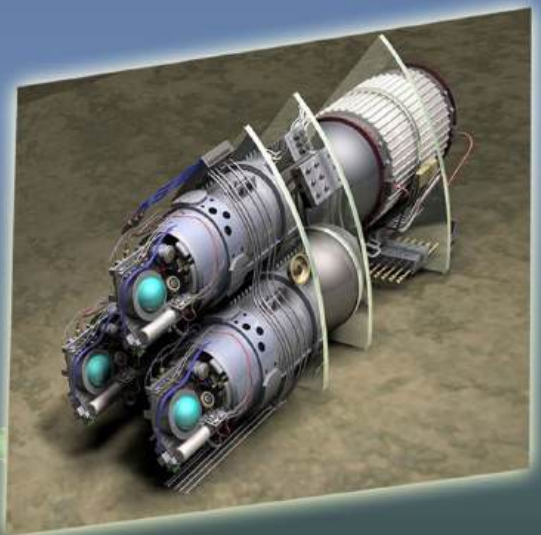
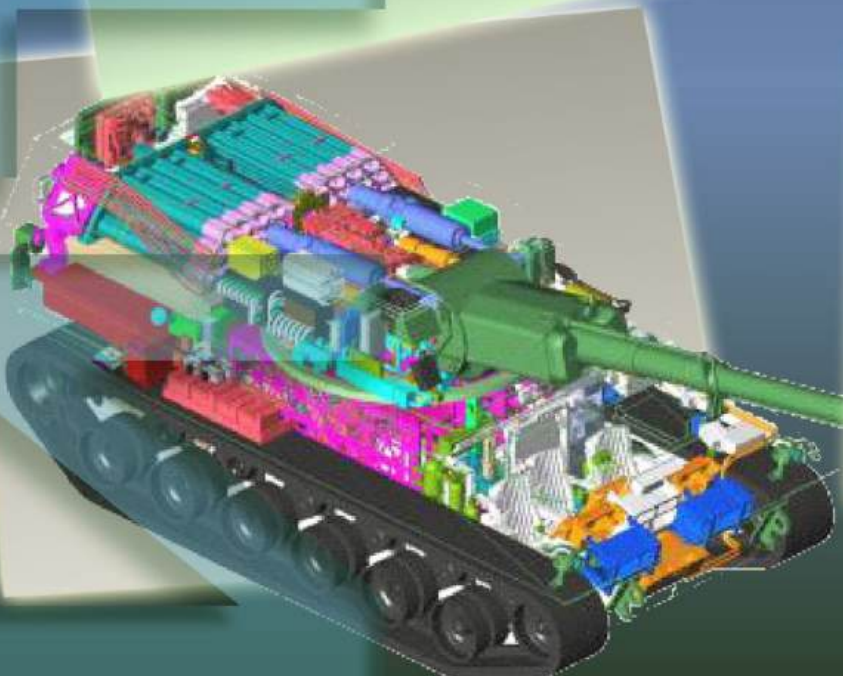
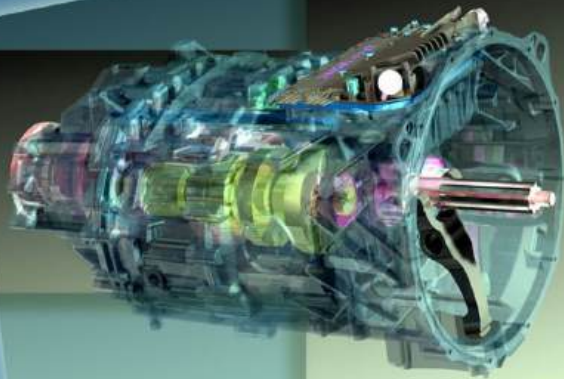
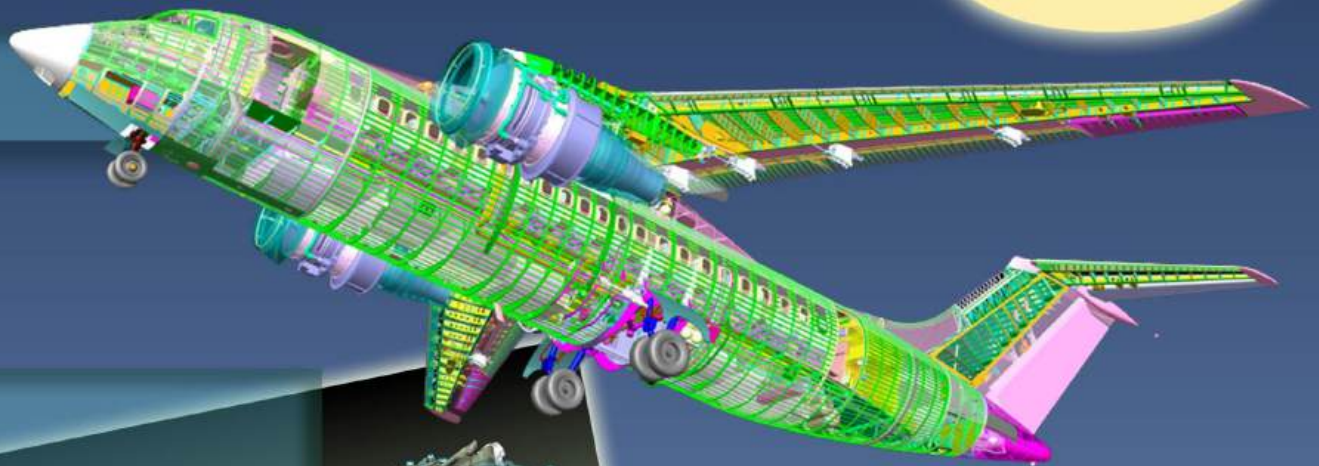


ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

в проектировании и производстве

№ 3' 2022





Все новейшие достижения и современные разработки предприятий оборонного комплекса — в научно-технических журналах ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» является издателем следующих научных журналов:



Межотраслевой научно-технический журнал
Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России
(4 выпуска)
Подписной индекс **79379**
Издается с 1984 года



Межотраслевой научно-технический журнал
Конструкции из композиционных материалов
(4 выпуска)
Подписной индекс **80089**
Издается с 1981 года



Научно-технический журнал
Информационные технологии в проектировании и производстве
(4 выпуска)
Подписной индекс **79378**
Издается с 1976 года



Межотраслевой научно-практический журнал
Экология промышленного производства
(4 выпуска)
Подписной индекс **80090**
Издается с 1993 года



Научно-практический журнал
Вопросы защиты информации
(4 выпуска)
Подписной индекс **79187**
Издается с 1974 года

Все издания ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»:

✓ включены решением ВАК Министерства науки и высшего образования России в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук;

✓ метаданные выпусков включены в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Более подробную информацию об изданиях, подписке, дополнительных услугах можно получить по тел.: 8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-67, 8 (495) 491-77-20 (подписка);
факс: 8 (495) 491-44-80.
E-mail: izdanie@ntckompas.ru

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
ОБОРОННОГО КОМПЛЕКСА
«КОМПАС»

№ 3 (183) 2021

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1976 г.

Главный редактор

И. А. Шеремет, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., заместитель директора Российского фонда фундаментальных исследований по научной работе

Заместитель главного редактора

В. Н. Гридин, д-р техн. наук, проф., научный руководитель ЦИТИ РАН

Ответственный секретарь

Г. П. Глотова, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

Редакционная коллегия:

В. В. Бордюже, д-р техн. наук, проф., Координационный совет по информационным технологиям предприятий ОПК РФ; А. И. Громов, канд. хим. наук, НИУ «Высшая школа экономики»; В. В. Кондратьев, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., Нижегородский государственный технический университет им. Р. А. Алексеева; Ю. Н. Кофанов, д-р техн. наук, проф., МИЭМ НИУ ВШЭ; С. А. Матвеев, канд. техн. наук, ФГУП «ЦНИИмаш»; Е. И. Митрушкин, д-р техн. наук, проф., АО «НИИИА»; С. В. Назаров, д-р техн. наук, проф., ЗАО «Московский научно-исследовательский телевизионный институт»; М. А. Пирогова, канд. техн. наук, НИУ МЭИ; С. В. Попов, д-р техн. наук, Холдинг «Швабе»; А. Ф. Ронжин, д-р физ.-мат. наук, проф., Вычислительный центр им. А. А. Дородницына; П. О. Скобелев, д-р техн. наук, НАО «Группа компаний «Генезис знаний», СамГТУ; В. В. Солюмин, канд. воен. наук, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»; А. П. Солищев, д-р воен. наук, проф., ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»; Е. В. Судов, д-р техн. наук, проф., НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика»; А. В. Цырклов, д-р техн. наук, проф., ГКНПЦ им. М. В. Хруничева; В. А. Шахнов, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н. Э. Баумана; Е. И. Шульгин, д-р техн. наук, НИЦ при президиуме АИИ им. А. М. Прохорова

☎ редакции (495) 491-43-17
E-mail: izdanie@ntckompas.ru
http://ntckompas.ru

Информационные технологии
в проектировании и производстве:
Науч.-техн. журн./ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2021.
№ 3 (183). С. 1—60.

Редактор О. А. Константинова
Компьютерная верстка: Н. В. Ильина,
К. В. Трыкина

Подписано в печать 24.08.2021.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 7,0. Уч.-изд. л. 7,2.
Заказ 1975 Тираж 250 экз.
Адрес редакции: 125424, Москва,
Волоколамское ш., 77, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».
Отпечатано в ООО «Рапидограф».
117342, Москва, ул. Бултерова, д. 17Б.
Индекс 79378. 9 статей.

Статьи рецензируются.

© Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Инновационные технологии решения задач проектирования, моделирования и производства

- Бутко А. О., Каленова Н. В. Формирование структуры работ при моделировании процессов в системах управления проектами на основе структурно-параметрических моделей 3
- Старостин Н. П., Тихонов Р. С. Численное исследование упрощенных моделей теплового процесса уплотнений штока..... 10
- Демин А. А., Хабаров Р. А. Анализ функций бесчертежного проектирования в концепции бережливого производства..... 16
- Бутко А. О., Кузнецов П. М. Организация технологической среды ремонтных работ 23
- Кондусова В. Б., Кондусов Д. В. Верификация компьютерной имитационной модели стоимости жизненного цикла изделий высокотехнологичных отраслей промышленности..... 27
- Федоров С. В. Исследование алгоритмов формирования управляющих импульсов на основе сравнения синхронизирующих сигналов с сигналами модуляции в широтно-импульсных модуляторах 32
- Сумароков С. В., Арутюнян А. Р., Грошев Т. А., Гусев М. В., Кечков А. А., Новосельский Ф. О. Разработка препроцессора расчетного кода СОКРАТ-БН/В2..... 39

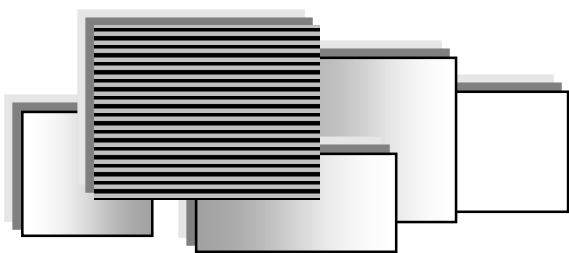
Прикладные задачи применения информационных технологий

- Кузнецов А. Ю., Решетников И. С. Поэтапное внедрение систем управления ТООР для разветвленных инфраструктурных предприятий 44
- Карпунин А. А., Кирилин В. Д., Репников П. О., Усюкин М. А. Анализ тенденций развития технологии Blockchain при реализации концепции Индустрии 4.0 53

INFORMATION TECHNOLOGY OF CAD/CAM/CAE

THE SCIENTIFIC JOURNAL

Information on recent advances in CAD/CAM/CAE, industry & business & complex information technology, including methods and tools of computer graphing, geometrical and mathematical modeling, database control methods on estimation and provision of control and reliability.



ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ, ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА

УДК 681.518.2

DOI: 10.52190/2073-2597_2021_3_3

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ РАБОТ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

А. О. Бутко, канд. техн. наук; Н. В. Каленова, канд. физ.-мат. наук
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

Рассмотрены вопросы формирования структуры проекта в системе класса Project Management в целях моделирования процессов в рамках построения и анализа конструкторско-технологических и организационно-технических решений. Исследованы варианты трансформации структуры элементов модели в системе автоматизированного проектирования (САПР) в структуру работ или задач в проекте. Предполагаемая трансформация будет обеспечиваться в автоматическом режиме с помощью предлагаемых программных средств. Обсуждены основные аспекты процесса преобразования структуры и результаты, которые будут положены в основу инструмента его автоматизации.

Ключевые слова: жизненный цикл изделия, моделирование процессов, управление проектами, параметрическое моделирование, структурное моделирование.

Для обеспечения работ по построению модели процесса в системе управления проектами (СУП) необходимо установить состав и структуру массива данных, с которыми она будет работать. Очевидно, что в основном это определяется характеристиками программного продукта (САПР, СУП, PDM и т. п.), в который производится передача информации (импорт). Поскольку выбранные автоматизированные системы имеют неидентичный набор обрабатываемых данных (одна принадлежит классу САПР, другая — СУП), можно предположить, что некоторых элементов массива для импорта/экспорта будет не хватать. Таким образом, перед реализацией процесса передачи структуры нужно построить информационную модель, представляющую исследуемый объект в виде набора данных, с которыми могут работать все связываемые компоненты интегрированного комплекса.

По результатам проведенного исследования форматов СУП Microsoft Project (см. таблица) была составлена структура информационной модели конструкторско-технологического реше-

ния (КТР), на основе чего сформулированы требования к содержанию экспортируемой из структурно-параметрической модели (СПМ) технической информации.

Выделены следующие базовые элементы, отражающие предполагаемый состав передаваемых данных:

- перечень работ будущего проекта и их ресурсные характеристики;
- перечень всех материальных и трудовых ресурсов проекта;
- длительность работ/трудоемкость и базовые затраты;
- параметры, определяющие последовательность работ;
- настройки проекта;
- параметры, определяющие сроки и степень выполнения работ.

Формат ПМК СПМ представляет собой базу данных, обычно называемую структурно-параметрической базой (СПБ), содержащую несколько разделов и хранящуюся в сжатом виде. Каждый раздел имеет уникальное имя и назначение.

Поля текстового формата Microsoft Project

Наименование поля	Наименование поля в русифицированной версии Microsoft Project	Тип	Назначение
Ид.	ID	Число	Идентификатор (номер) работы в проекте. Используется для доступа к элементам программными средствами (обязательный элемент)
Task_Name	Название_задачи	Текст	Наименование задачи (работы) (обязательный элемент)
Duration	Длительность	Число или ?	Суммарное время, затрачиваемое на выполнение описываемой задачи проекта (необязательный элемент), по умолчанию — 1 день?
Outline_Level	Уровень_структуры	Число	Число характеризует степень вложенности описываемой задачи по отношению к первой (обязательный элемент)
Predecessors	Предшественники	Текст	Перечень идентификаторов задач-предшественников. Используется для организации связей между задачами (необязательный элемент)
Start_Date	Дата_начала	Дата	Дата начала описываемой работы (необязательный элемент), по умолчанию — дата начала проекта
Baseline_Cost	Базовые_затраты	Число	Планируемые материальные (денежные) затраты на выполнение описываемой задачи с учетом ресурсов и работ (бюджет) (необязательный элемент), по умолчанию — 0
Percent_complete	Процент_завершения	Число	Процент завершения описываемой задачи. Служит для оценки степени выполнения проекта на конкретном промежутке времени (необязательный элемент), по умолчанию — 0
Number1	Число1	Число	Пользовательское поле для описания количества исполнителей описываемой работы (необязательный элемент), по умолчанию — 1

В целом в базе содержится технологическая и конструкторская информация, представляющая моделируемый технический объект. Для определения перечня разделов, с которыми будет работать интерфейс, с учетом предъявляемых требований к составу передаваемых данных нужно изучить их содержание и способы доступа к ним.

Принято решение использовать параметры в ПМК СПМ для хранения следующей проектной информации:

- наименования ресурсов (идентификаторы ресурсных параметров);
- тип ресурса (ввести тип для идентификации ресурсных параметров m или w , соответственно, для material и work);
- количество материальных ресурсов для описываемой задачи (числовые значения ресурсных параметров типа material);
- загрузка трудовых ресурсов для описываемой задачи (числовые значения ресурсных параметров типа work);
- длительность работы (ввести специальный числовой параметр — признак передачи элемента);
- количество исполнителей работы (ввести специальный параметр, имеющий определенный идентификатор);
- значение базовых затрат (ввести специальный параметр);
- дата начала работ для описываемой задачи (ввести специальный параметр);

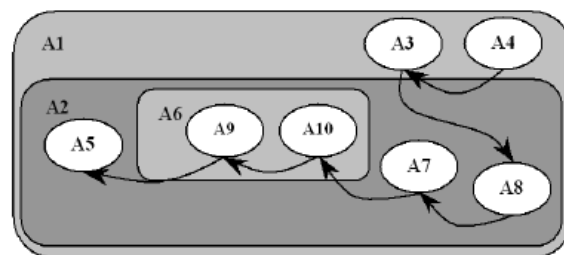
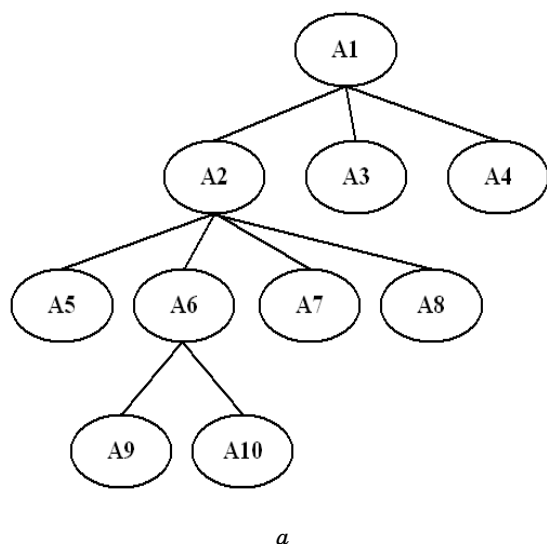
- перечень предшественников задачи (ввести специальный параметр).

Структурная модель используется для организации и описания связей между элементами СПМ. Связи, представленные данными этих разделов, называют функциональными цепочками и применяют для получения структурных решений при проектировании технологических процессов.

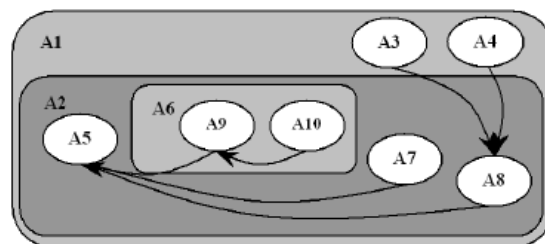
Такая система позволяет использовать сложные связи между элементами одного уровня и обеспечивает достаточную функциональность [1, 2] для полного описания всех возможных последовательностей задач в формируемом проекте. Единственное ограничение состоит в том, что элементы должны быть описаны в том же порядке, в каком они следуют в цепочке. В целом можно сделать заключение, что системы описания связей в СПМ достаточно для построения последовательностей задач.

Итак, определено, что связи элементов в проекте организуются в соответствии:

- со структурой функциональных связей в конструкции (рис. 1, а);
- с одной из базовых схем: последовательное соединение задач (рис. 1, б), параллельное соединение задач (рис. 1, в);
- с соединением задач по функциональным цепочкам (технологические маршруты, схемы членения и сборки, группы опережения) (рис. 2).

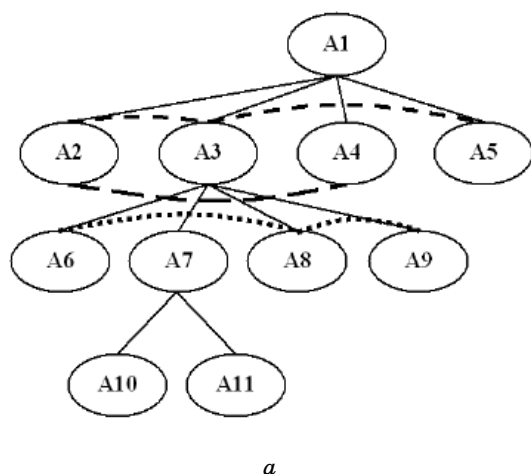


б

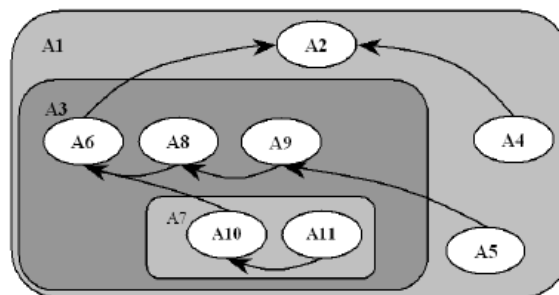


в

Рис. 1. Базовые варианты организации связей: а — структура связей в модели изделия; б — схема связей в проекте с последовательным соединением задач; в — схема связей в проекте с параллельным соединением задач



а



б

Рис. 2. Организация связей по функциональным цепочкам: а — структура связей в модели изделия (пунктиром показаны цепочки); б — схема связей в проекте (связи заданы цепочками)

Разделы, описывающие "дерево" элементов, используют для построения иерархической древовидной структуры [3–5] СПМ. Эта система в дальнейшем с помощью указателя уровня структуры, определяющего степень вложенности задачи, трансформируется в аналогичную древовидную структуру проекта при передаче в систему Microsoft Project. Кроме того, имена элементов представляют собой наименования будущих задач в формируемом проекте. Набор экспортируемых элементов осуществляется по признаку передачи — наличию у них параметра длительности задачи DUR и по вхождению элемента в решение, что определяется в разделе СПМ RESH. Помимо этого, пользователь может задать состав набора, указав конкретный элемент при работе с интерфейсом. При обмене данными тип элемента не учитывается.

Способы организации связей элементов (задач) в моделях

Существует два основных способа организации связей между элементами-задачами: использование существующей естественной иерархической структуры СПМ для определения связей и использование структурных компонент модели — функциональных цепочек, задающих взаимосвязи определенных элементов-задач.

Первый способ. При использовании этого способа пользователю нет необходимости добавлять какие-либо компоненты в модель и контролировать правильность организации связей между задачами, т. к. древовидная структура определяет эти связи однозначно. Элементы одного уровня иерархии связываются параллельно или последовательно в зависимости от состоя-

ния опции "Соединять последовательно элементы одного уровня".

На рис. 3 показана укрупненная модель корпуса отсека "О", на рис. 4 — проект с параллельным соединением задач, сформированный на ее основе.

Элемент, предшествующий увеличению уровня иерархии в Microsoft Project, автоматически становится головным "раскрывающимся" и лишается каких-либо связей. В Microsoft Project этот элемент объединяет все задачи следующего уровня иерархии и характеризует состав задачи, которую он представляет.

Здесь Корпус отсека "О" является головным элементом, состоящим из четырех задач.

Первая задача представляет процесс сборки объекта, остальные три — детали, входящие в его состав и необходимые для полной реализации сборки.

На рис. 5 показан проект с последовательным соединением элементов-задач при включенной опции "Соединять последовательно элементы одного уровня" диалога "Настройки" меню "База". Фактически задачи одного уровня следуют одна за другой, как и предполагается в данном случае.

Иерархическая структура проекта (рис. 5) практически повторяет структуру модели, описанную в [6], за исключением последовательно связанных элементов одного уровня.

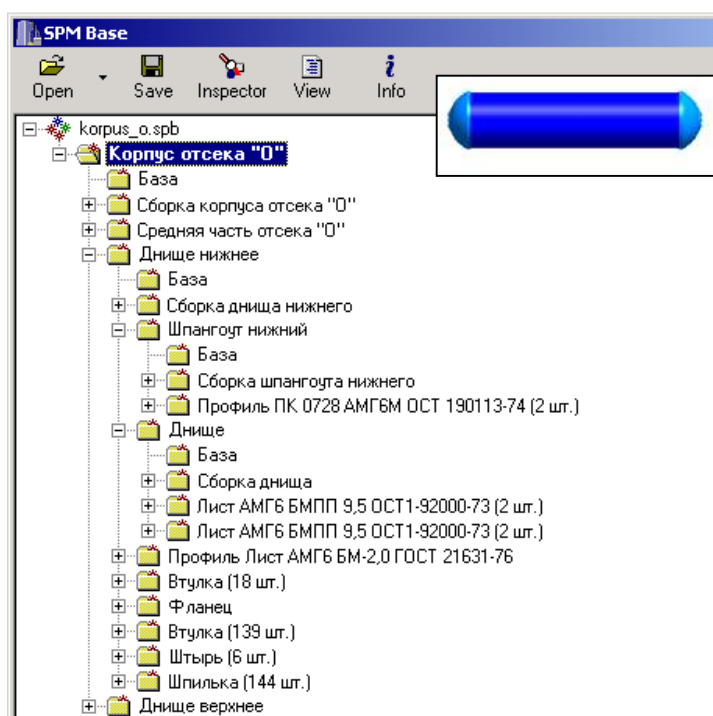


Рис. 3. Визуализация и структура модели бака

1	Корпус отсека О	12,88 days	Wed 02.10.02
2	Сборка корпуса отсека О	48 hrs	Thu 10.10.02
3	Средняя часть отсека О	24 hrs	Mon 07.10.02
4	Днище нижнее	6,88 days	Wed 02.10.02
5	Сборка днища нижнего	35 hrs	Fri 04.10.02
6	Шпангоут нижний	2,5 days	Wed 02.10.02
7	Сборка шпангоута нижнего	12 hrs	Thu 03.10.02
8	Профиль ПК 0728 АМГБМ ОСТ 190113-74 (2 шт.)	8 hrs	Wed 02.10.02
9	Днище	2,5 days	Wed 02.10.02
10	Сборка днища	12 hrs	Thu 03.10.02
11	Лист АМГБ БМПП 9,5 ОСТ1-92000-73 (2 шт.)	8 hrs	Wed 02.10.02
12	Лист АМГБ БМПП 9,5 ОСТ1-92000-73 (2 шт.)	4 hrs	Wed 02.10.02
13	Профиль Лист АМГБ БМ-2,0 ГОСТ 21631-76	2 hrs	Wed 02.10.02
14	Втулка (18 шт.)	1 hr	Wed 02.10.02
15	Фланец	5 hrs	Wed 02.10.02
16	Втулка (139 шт.)	1 hr	Wed 02.10.02
17	Штырь (6 шт.)	0,5 hrs	Wed 02.10.02
18	Шпилька (144 шт.)	3 hrs	Wed 02.10.02
19	Днище верхнее	16 hrs	Mon 07.10.02

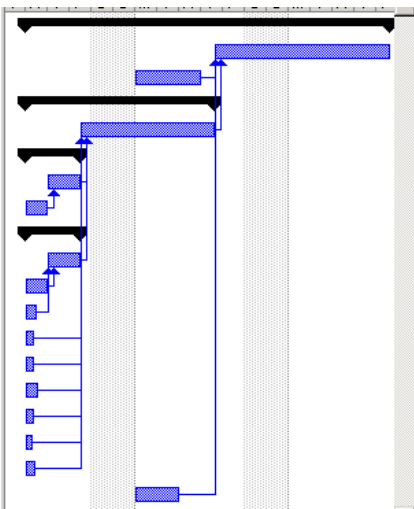


Рис. 4. Модель и проект создания корпуса отсека "О"

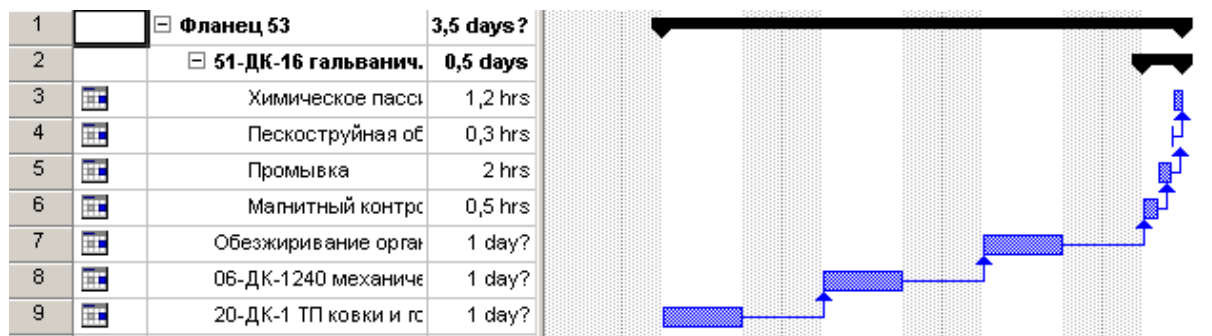
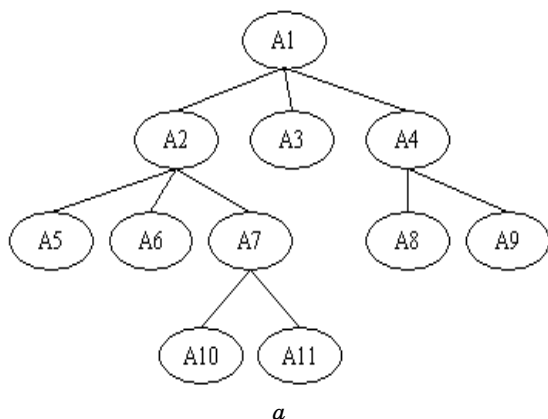


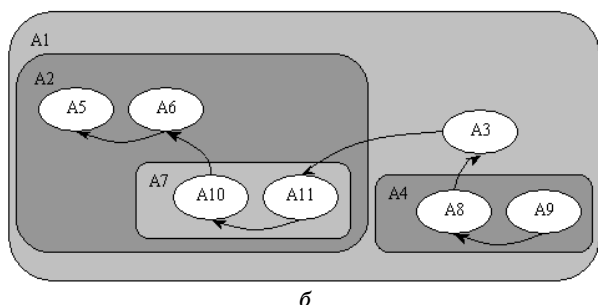
Рис. 5. Последовательное соединение задач

На рис. 6 (слева) схематично показана структура модели в ПМК СПМ.

На рис. 6, а отражены связи и номера элементов модели, которые отличаются от формируемых при трансляции СПМ, т. е. при передаче в СУП взаимосвязи организованы иначе и номера элементов заменены номерами задач, когда элементу сопоставлена задача, номер которой в СУП может не соответствовать номеру элемента в СПМ.



а



б

Рис. 6. Схематическая структура модели и схема связей задач в проекте:

а — структура модели КТР; б — схема связей задач в проекте

На рис. 6, б показаны связи между задачами-элементами модели уже в Microsoft Project, а на рис. 7 — дерево проекта, сформированного из этой модели (включена опция "Соединять последовательно элементы одного уровня").

№ задачи	Уровень структуры	Название задачи
1	1	A1
2	2	A2
3	3	A5
4	3	A6
5	3	A7
6	4	A10
7	4	A11
8	2	A3
9	2	A4
10	3	A8
11	3	A9

Рис. 7. Организация структуры элементов в проекте

На рис. 8 показана организация связей в том же проекте, но при выключенной опции "Соединять последовательно элементы одного уровня".

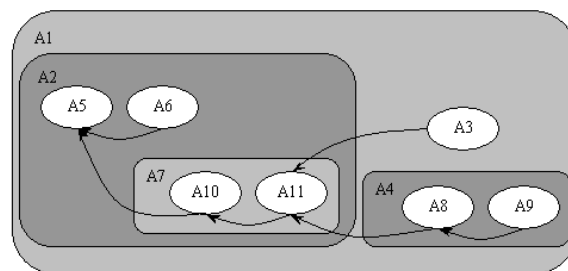
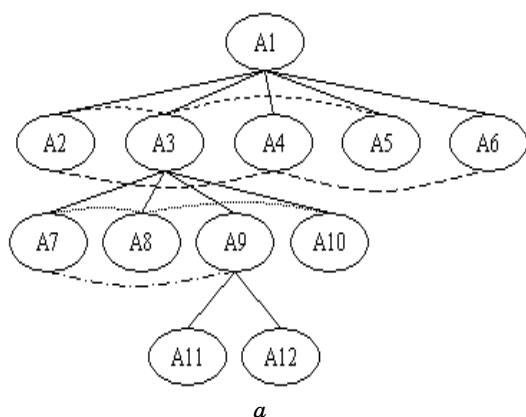


Рис. 8. Схема связей элементов модели в проекте

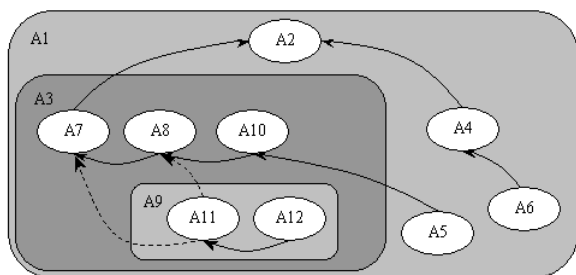
Второй способ. Этот способ позволяет помимо организации связей по "дереву" модели использовать структурные элементы-цепочки, определяющие взаимосвязь двух и более элементов. Цепочки описаны в разделе СТРУКТУРА и представляют собой последовательность меток элементов, разделенных знаком тире. При использовании цепочек в первую очередь связь элементов организована по ним, а элементы, не входящие ни в одну цепочку, связаны в зависимости от состояния опции "Соединять последовательно элементы одного уровня" либо последовательно, либо параллельно. Необходимо принимать во внимание возможность

некорректной организации связей в проекте и возникновение ошибки при передаче данных в Microsoft Project вследствие применения данного способа ввиду вероятности вхождения одного элемента в несколько цепочек, что не является правильным с точки зрения организации связей между задачами в проекте. Таким образом, пользователь должен сам контролировать корректность построения цепочек в модели для исключения негативных последствий [7].

Организация связей с помощью цепочек схематично представлена на рис. 9, а (цепочки показаны штриховой линией).



а



б

Рис. 9. Организация связей функциональными цепочками:
а — структура модели КТР;
б — схема связей задач в проекте

В данном случае цепочки в СПМ будут описаны следующим образом

+СТРУКТУРА;
ЦЕПЬ=A2-A3-A5;
ЦЕПЬ=A2-A4-A6;
ЦЕПЬ=A7-A8-A10;
ЦЕПЬ=A7-A9.

В модели рис. 9, а присутствует цепочка, нарушающая систему организации связей в проекте (A7-A9, т. к. эта связь будет интерпретирована как A7-A11, в то время как связь A9-A11 станет A8-A11). Результат передачи в Microsoft Project показан на рис. 9, б (пунктир — взаимоисключающие связи между элементами-задачами в проекте: один элемент не может быть предшественником для двух разных задач).

Древовидная структура проекта в Microsoft Project, сформированного на основе СПМ (рис. 9, а), показана на рис. 10.

№ задачи	Уровень структуры	Название задачи
1	1	A1
2	2	A2
3	2	A3
4	3	A7
5	3	A8
6	3	A9
7	4	A11
8	4	A12
9	3	A10
10	2	A4
11	2	A5
12	2	A6

Рис. 10. Организация структуры элементов в проекте

Благодаря цепочкам (структурным элементам) можно практически целиком переопределить все взаимосвязи между элементами модели (задачами) и организовать рациональную, согласно оценке пользователя, систему связей задач в предполагаемом проекте.

Пример текста СПМ:

+ОБЪЕКТ;

КОД=korpus; ИМЯ=ПБЗМ-10-01-100

Корпус; ТИП=Д;

ГРУППА(Форма)=f1;

МОДЕЛЬ=СЕМК2;

+ЭЛЕМЕНТЫ;

.....
+ПАРАМЕТРЫ;

DUR(+)=;

+ФОРМУЛЫ;

+СТРУКТУРА;

ЦЕПЬ=t1-4-1-5;

ЦЕПЬ=t1-11-12-13-14-15-16;

ЦЕПЬ=t1-8;

ЦЕПЬ=t1-2-3;

ЦЕПЬ=t1-6-9-7-10;

МАТРИЦА=;

+ПОЛОЖЕНИЕ.

Видно, что построение связей в модели КТР является достаточно непростым и требующим особого внимания этапом описания модели, поскольку необходимо точно указать все цепочки и пары элементов, чтобы избежать повторных и перекрестных ссылок в будущем проекте в СУП. Для исключения таких ошибок в системе интерфейса предусмотрена специальная опция, позволяющая включить дополнительную проверку и корректировку системы связей в процессе работы с проектными данными.

Заклучение

Представленные два варианта описания связей в СПМ позволяют формировать достаточно сложные структуры как с параллельным и последовательным, так и с комбинированным соединением задач.

Таким образом, возможны получение и анализ практически любых структур различных систем, описанных в моделях. Результаты моделирования процессов могут быть представлены средствами систем управления проектами. При этом реализуются варианты структурных решений, организация которых обеспечивается в среде СПМ. Управление данными решениями достигается путем составления матрицы взаимосвязей элементов системы (модели) непосредственно на этапе создания модели.

Литература

1. Кларк Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач / Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1990. — 544 с.
2. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы / Пер. с англ. — М.: Мир, 1978. — 312 с.
3. Хансен Г., Хансен Д. Базы данных: разработка и управление. — М.: БИНОМ, 1999. — 704 с.
4. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных. — К.—М.—СПб: Изд. дом "Вильямс", 1999. — 848 с.
5. Маршал Б. XML в действии / Пер. с англ. — М.: Триумф, 2002. — 368 с.
6. Мангейм М. Л. Иерархические структуры. Модель процессов проектирования и планирования / Пер. с англ. — М.: Мир, 1970. — 180 с.
7. Бутко А. О., Гришин Е. Е., Цыrkова Е. Е. Анализ производственных процессов на основе модели проектного управления // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2011. № 3. С. 10—15.

FORMATION OF THE STRUCTURE OF WORKS WHEN MODELING PROCESSES IN PROJECT MANAGEMENT SYSTEMS BASED ON STRUCTURAL AND PARAMETRIC MODELS

A. O. Butko, N. V. Kalenova

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

The article is devoted to the formation of the project structure in the Project Management system with the aim of process modeling as part of the work for the development and analysis of design-technological and organizational-technical solutions. Variants of transformation of the structure of model elements in CAD into the structure of works or tasks in the project are considered. The proposed transformation will be provided automatically using the proposed software. The article discusses the main aspects of the structure transformation process and the results that will form the basis of the tool for its automation.

Keywords: product life cycle, process modeling, project management, parametric modeling, structural modeling.

Бутко Антон Олегович, доцент.

E-mail: mati-tias@yandex.ru

Каленова Наталья Валерьевна, доцент.

E-mail: perepljuika@bk.ru

Статья поступила в редакцию 12 мая 2021 г.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРОЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЙ ШТОКА

Н. П. Старостин, д-р техн. наук; Р. С. Тихонов, канд. техн. наук

Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН – обособленное подразделение
ФГБНУ ФИЦ «Якутский научный центр Сибирского отделения РАН», г. Якутск, Россия

Рассмотрена задача определения нестационарного температурного поля в полимерном уплотнении штока с помощью различных моделей теплового режима. Вычислительными экспериментами показано, что для модели с учетом возвратно-поступательного движения штока наиболее близка упрощенная модель с неподвижным равномерным распределением теплового потока, учитывающая конвективную теплоотдачу со свободной поверхности трения.

Ключевые слова: математическое моделирование, температура, теплопроводность, метод конечных элементов, шток, полимерная манжета.

В уплотнительных устройствах в качестве материала широко применяют фторопласт-4, обладающий совокупностью уникальных свойств, таких, как термическая стабильность в широком диапазоне температур, низкий коэффициент трения, способность работать без смазки, устойчивость к химическому воздействию, отсутствие набухания под действием жидкостей. Обладая низким коэффициентом трения, фторопласт является самосмазывающимся материалом и допускает длительный сухой ход подвижного элемента. Путем введения в фторопласт различных наполнителей улучшают его сопротивление деформации, уменьшают коэффициент линейного расширения и повышают износостойкость.

Одним из основных параметров, лимитирующих работоспособность наполненных фторопластовых уплотнений, остается температура размягчения фторопласта. Предельные нагрузочно-скоростные режимы работы фторопластовых уплотнений выбирают по температурному ограничению. Поэтому расчет температурного режима является важной составляющей при проектировании и модернизации уплотнительных устройств. В научной литературе описано большое количество исследований температурного режима в подвижных уплотнениях вращающихся валов и торцевых уплотнениях. Особенность таких уплотнений заключается в неизменности площади трения, что позволяет упростить расчет температурного поля, принимая допущения о равномерности тепловыделения от трения по одной из координат и рассматривая элементы как неподвижные [1–4]. При этом конвективный перенос теплоты от поверхности подвижного элемента в окружающую среду учитывается коэффициентом теплоотдачи, зависящим от скорости движения. Расчет теплового режима в уплотнениях штока возвратно-поступательного движения осложняется тем, что площадь трения превышает площадь контакта и необходимо учитывать охлаждение части поверхности трения при его выдвигении

из-под уплотнения. Тем не менее при температурных расчетах принимают допущение о равномерности теплового потока по поверхности штока в зоне трения [5]. Такое предположение равносильно допущению о неподвижном контакте штока с уплотнением по всей длине поверхности трения. При этом не учитывают конвективный теплообмен свободной поверхности зоны трения с окружающей средой. В связи с этим такая модель дает завышенные значения температуры. Назовем ее моделью с избытком теплового источника.

В данной работе рассматривается упрощенная модель с допущением равномерного распределения теплового потока по площади трения, в которой учитывается конвективная теплоотдача со свободной поверхности зоны трения. При этом используется осредненный коэффициент теплоотдачи в окружающие среды с разных сторон уплотнения. Такую модель назовем моделью с недостатком.

Можно предположить, что упрощенные модели будут описывать тепловой процесс в уплотнении штока с приемлемой для практических расчетов точностью при выполнении некоторых условий по частоте возвратно-поступательного движения. В то же время определение таких граничных значений частот колебаний для конкретного уплотнения с возвратно-поступательным движением штока затруднено сложностью математического описания теплового процесса с подвижным источником тепла для твердых тел с конечными размерами. При классическом подходе рассматривается трение тела с полупространством, что позволяет движение тела при трении учитывать введением конвективного члена в уравнение теплопроводности [6]. Однако такой прием можно применять, когда одно из тел представимо в виде полупространства или для него справедливо условие цикличности, или на концах тела имеется сток тепла [7]. В уплотнениях с возвратно-поступательным движением штока такие условия не выполняются.

Целью данной работы являются численная реализация модели теплового режима в уплотнениях штока, учитывающей его возвратно-поступательное движение без введения конвективного члена в уравнение теплопроводности, и проведение сравнительного анализа температурных полей, полученных с использованием разработанной и упрощенных моделей.

Постановка задачи

Рассмотрим неподвижный шток, по поверхности которого совершает возвратно-поступательное движение с амплитудой l полимерная манжета длиной d . Известно, что вследствие низкой теплопроводности полимерного материала практически вся теплота, выделяющаяся в результате трения, отводится через стальной вал [8]. Поэтому при моделировании теплового состояния уплотнения исключим из рассмотрения полимерную манжету и будем считать, что на стальной шток действует подвижный тепловой поток. Такую модель назовем моделью с движением источника. На рис. 1 представлена расчетная схема уплотнения штока. Уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах записывается в виде [9]

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{fPV(t)}{2\pi r} \delta(r - r_{\text{шт}}) \delta[z - z_{\text{cont}}(t)],$$

$$0 < r < r_{\text{шт}}, 0 < z < L, 0 < t \leq t_m, \quad (1)$$

где T — температура;
 t — время;
 t_m — время испытаний;
 r, z — цилиндрические координаты;
 $r_{\text{шт}}, L$ — радиус и длина штока;
 C, λ — объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала штока;
 f — коэффициент трения;
 P — нагрузка;
 V — скорость движения штока;
 δ — дельта-функция Дирака;
 z_{con} — область контакта манжеты уплотнения со штоком в момент времени t .

На свободных поверхностях задаются условия конвективного теплообмена с окружающими средами. Слева от манжеты боковая и торцовая поверхности штока взаимодействуют с воздушной средой:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1 \cup \Gamma_2} = \alpha_{\text{воз}} (T|_{\Gamma_1 \cup \Gamma_2} - T_0), \quad r, z \in \Gamma_1 \cup \Gamma_2, \quad (2)$$

справа — с рабочей жидкостью:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_4 \cup \Gamma_5} = \alpha_{\text{жид}} (T|_{\Gamma_4 \cup \Gamma_5} - T_0), \quad r, z \in \Gamma_4 \cup \Gamma_5. \quad (3)$$

При движении штока площади поверхностей, взаимодействующих с воздухом и рабочей жидкостью, изменяются, что учитывается при расчете температурного поля:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = \alpha (T|_{\Gamma_3} - T_0), \quad r, z \in \Gamma_3,$$

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{\text{воз}}, & z < z_{\text{init}}; \\ 0, & z_{\text{init}} \leq z \leq z_{\text{end}}; \\ \alpha_{\text{жид}}, & z > z_{\text{end}}, \end{cases} \quad (4)$$

где $z_{\text{init}}, z_{\text{end}}$ — координаты на поверхности штока начала и конца уплотнения;

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_6} = 0, \quad r, z \in \Gamma_6. \quad (5)$$

Задается начальное условие:

$$T(r, z, 0) = 20, \quad r, z \in \Omega. \quad (6)$$

Согласно уравнению (1) в точках контакта штока и манжеты уплотнения действуют m сосредоточенных источников теплоты от трения.

Для численного решения задачи методом конечных элементов с использованием библиотеки вычислительного пакета FEniCS [10] требуется представить уравнения (1)–(6) в вариационной постановке. Примем следующее обозначение: $x = \{(r, z) : r, z \in \Omega\}$.

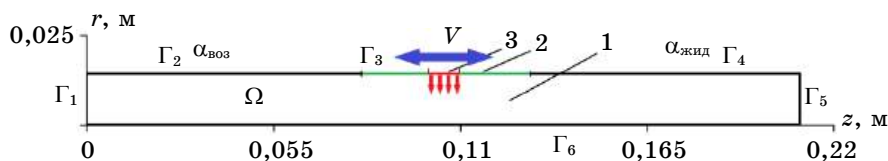


Рис. 1. Расчетная схема уплотнения штока:

1 — шток; 2 — зона трения; 3 — зона контакта с манжетой уплотнения

Определим равномерную сетку по времени $\omega_\tau = \{t^n = n\tau, n = 0, 1, \dots, N_0, \tau N_0 = t_m\}$ и проведем аппроксимацию уравнения (1) с учетом граничных условий. Для конечно-элементной дискретизации умножим уравнение (1) на тестовую функцию v и проинтегрируем по области Ω [11, 12]. Поскольку задача решается в цилиндрических координатах, при интегрировании каждый член необходимо умножить на $2\pi r$:

$$\begin{aligned} & 2\pi \int_{\Omega} Cr \frac{T^{k+1} - T^k}{\tau} v dx + \\ & + 2\pi \int_{\Omega} r \left(\lambda \operatorname{grad} T^{k+1}, \operatorname{grad} v \right) dx = \\ & = 2\pi \int_{\partial\Omega} r \lambda \frac{\partial T^k}{\partial r} v ds + 2\pi \int_{\partial\Omega} r \lambda \frac{\partial T^k}{\partial z} v ds + \\ & + \int_{\Omega} \frac{fpV(t)}{m} \delta(r - r_{\text{ш}}) \sum_{i=1}^m \delta[z - z_i(t)] v dx; \end{aligned} \quad (7)$$

Представим вариационную постановку задачи с учетом интегрирования по частям и граничных условий в виде

$$a(T^{k+1}, v) = f(v),$$

где

$$\begin{aligned} a(T^{k+1}, v) &= 2\pi \int_{\Omega} Cr \frac{T}{\tau} v dx + \\ &+ 2\pi \int_{\Omega} r (\lambda \operatorname{grad} T, \operatorname{grad} v) dx + 2\pi \int_{\partial\Omega \setminus \Gamma_6} r \alpha T v ds; \\ f(v) &= 2\pi \int_{\Omega} Cr \frac{T^k}{\tau} v dx + 2\pi \int_{\partial\Omega \setminus \Gamma_6} r \alpha T v ds + \\ &+ \int_{\Omega} \frac{fpV(t)}{m} \delta(r - r_{\text{ш}}) \sum_{i=1}^m \delta[z - z_i(t)] v dx; \\ \alpha &= \begin{cases} \alpha_{\text{air}}, & x \in \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup (\Gamma_3 \cap z < z_{\text{init}}); \\ \alpha_{\text{oil}}, & x \in \Gamma_4 \cup \Gamma_5 \cup (\Gamma_3 \cap z > z_{\text{end}}). \end{cases} \end{aligned}$$

Численное решение

Вычислительные эксперименты проводили при следующих исходных данных: длина штока 0,21 м, манжеты — 0,01 м, зоны трения — 0,05 м;

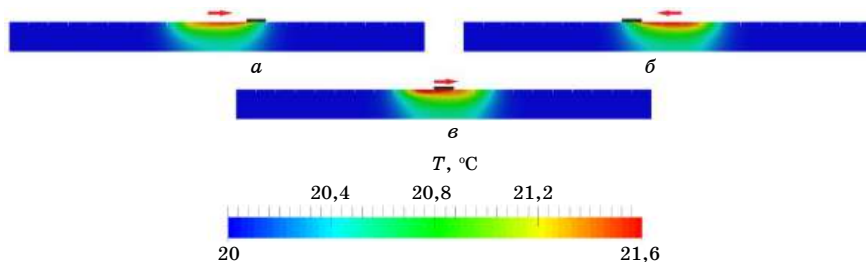


Рис. 2. Распределение температуры в штоке при различных фазах одного цикла при частоте 1 Гц: а — $t = 5,25$ с; б — $t = 5,75$ с; в — $t = 6,0$ с

диаметр штока 0,03 м; $\lambda = 30,98 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^\circ\text{С}}$, $C = 3,7 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3\text{С}}$. Температура в начальный момент времени 20 °С. Шаг сетки в области зоны трения $h = 0,001$ м. Для обеспечения устойчивости решения перемещение точек контакта реализовалось программно с шагом по времени τ , удовлетворяющим условию Куранта: $\tau = h/V$ [13].

Для сравнительного анализа динамики температурных полей при различных частотах колебаний расчеты проводили при постоянной мощности фрикционного теплообразования $fPV = 20$ Вт. При постоянной амплитуде колебаний штока увеличение (уменьшение) частоты колебаний ведет к увеличению (уменьшению) скорости скольжения и, соответственно, к увеличению (уменьшению) теплоотдачи в окружающую среду, а также уменьшению (увеличению) нагрузки. Коэффициенты теплоотдачи α с поверхности штока при продольном обтекании вычисляли с использованием расчетной формулы для теплообмена тел любой формы:

$$Nu = 0,662 Pr^{1/3} Re^{0,5}; \quad \alpha_{\text{oil}} = \frac{Nu \lambda_{\text{oil}}}{2r_{\text{ш}}}, \quad (8)$$

где $Pr = \frac{\nu c_{\text{oil}} \rho_{\text{oil}}}{\lambda_{\text{oil}}}$ — критерий Прандтля;

$Re = \frac{2r_{\text{ш}} V}{\nu}$ — число Рейнольдса;

$\nu, \lambda_{\text{oil}}, c_{\text{oil}}, \rho_{\text{oil}}$ — кинематическая вязкость, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность окружающей среды;

$r_{\text{ш}}$ — радиус штока.

В расчетах в качестве рабочей среды брали гидравлическую жидкость АМГ-10, температура которой неизменна, а с другой стороны уплотнения — воздух.

На рис. 2 представлено распределение температуры в штоке в различные моменты времени при частоте колебаний 1 Гц. Температура в зоне трения штока и манжеты выше в конце контакта, что естественно, поскольку последующие точки манжеты надвигаются на нагретые части штока.

На рис. 3 представлены распределения температур в зоне трения штока и манжеты, рассчитанные по различным моделям при различных частотах возвратно-поступательного движения в момент времени $t = 1$ ч.

Расчеты показывают, что на поверхности штока, контактирующей с рабочей жидкостью, температура ниже, чем на участке поверхности, взаимодействующем с воздушной средой. Такая закономерность обусловлена более высокой теплопередачей в рабочую жидкость. Сравнительный анализ температур в зоне трения, рассчитанных по различным моделям, показывает, что упрощенные модели с равномерным распределением теплового потока точнее описывают температурное поле при малых частотах колебаний штока. С уменьшением частоты колебаний снижается теплоотдача в окружающие среды и влияние учета или неучета конвективной теплопередачи с поверхности трения становится незначительным.

Предлагается определять частоту колебаний штока, ниже которой возможно использование упрощенных моделей, следующим образом. Расчетные зависимости температур по модели с движущимся источником принимаются за точные. Сравнением температурных зависимостей, полученных по модели с движущимся источником и по упрощенной модели, определяется частота колебаний штока, при которой достигается приемлемая для практического использования точность решений упрощенной модели. Выбор упрощенной модели с избытком или с недостатком зависит от цели расчетов. Например, для

определения допустимых нагрузочно-скоростных параметров полимерных уплотнений штока по температурному лимитирующему условию предпочтительнее использование модели с избытком, поскольку значения температур определяются с некоторым запасом. Для оценочных расчетов возможно использование модели с недостатком.

Модель теплового процесса в уплотнениях с движущимся источником обобщена для системы уплотнений штока. Проведены расчеты динамики температурных полей в системе двух уплотнений. В расчетах предполагается, что полимерные уплотнения длиной 1 см расположены на расстоянии 10 см от концов штока, который совершает возвратно-поступательное движение с амплитудой 4 см. Движение штока начинается с положения, когда уплотнения расположены в серединах зон трения. С левой стороны первой манжеты на поверхности штока происходит теплообмен с жидкостью АМГ-10, с правой стороны второй манжеты — с рабочей жидкостью ВМГЗ. Протекающие через уплотнения рабочие жидкости отводятся дренажной системой, которая в модели не рассматривается. В полости между манжетами происходит теплообмен поверхности штока с окружающим воздухом. Температуры окружающих сред неизменны и равны 20 °С.

На рис. 4 представлено распределение температуры в системе двух уплотнений штока при частоте возвратно-поступательного движения 0,5 Гц, полученное по различным моделям теплового процесса.

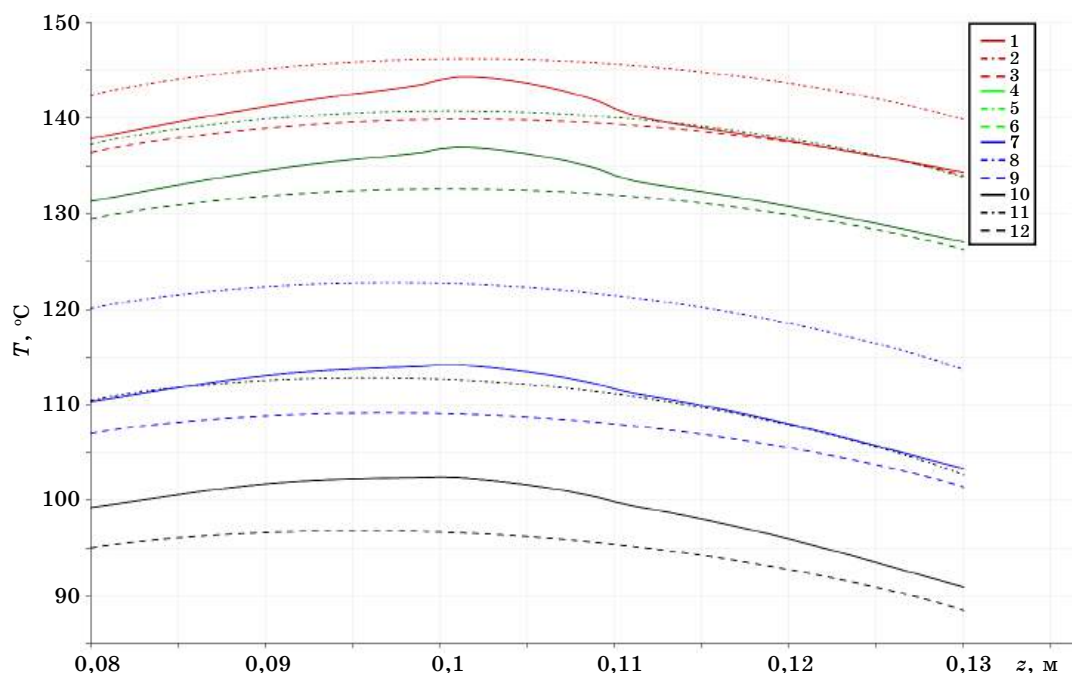


Рис. 3. Распределение температуры по длине зоны трения штока, рассчитанное по моделям с движущимся источником (сплошные линии), с избытком (штрихпунктир) и с недостатком (штриховые линии) в момент времени $t = 1$ ч при различных частотах v возвратно-поступательного движения штока: кривые 1—3 — при $v = 0,05$; 4—6 — при $v = 0,1$; 7—9 — при $v = 0,5$; 10—12 — при $v = 1,0$ Гц

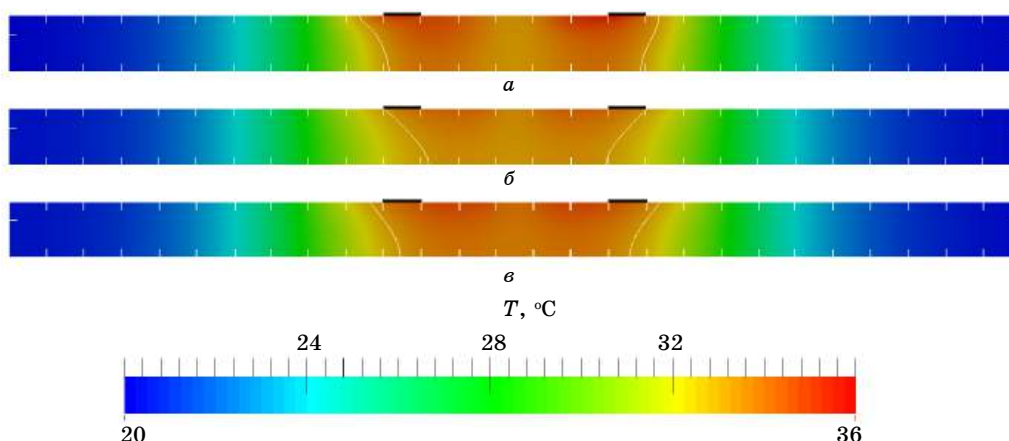


Рис. 4. Распределение температуры в системе уплотнений в момент времени 2 мин: а — модель с движущимся источником; б — модель с недостатком; в — модель с избытком

Линией белого цвета показаны изотермы с температурой 33 °С. Изотермы, полученные упрощенной моделью с недостатком, смещены в сторону середины зоны трения относительно изотермы модели с движущимся источником. Изотермы, полученные по модели с избытком, смещены в сторону середины зоны трения в начале процесса трения и со временем смещаются в противоположную сторону. Такие характерные смещения сохраняются в течение всего процесса трения.

Заключение

Упрощенные модели теплового процесса в уплотнениях штока с равномерным распределением теплового потока точнее описывают температурные поля при малых частотах колебаний штока и могут быть использованы для оперативного приближенного определения допустимых нагрузочно-скоростных параметров, а также для проведения оценочных расчетов динамики температурных полей.

Работа выполнена в рамках проекта Минобрнауки РФ (проект № АААА-А21-121011590012-9 от 14.01.2021).

Литература

1. Голубев Г. А. Исследование температурных режимов трения манжетных уплотнений быстровращающихся валов: "Тепловая динамика трения". — М.: Наука, 1970. С. 29—30.
2. Удовенко А. А., Васлаев С. М. Тепловой расчет резиновых манжетных уплотнений валов: "Труды Новочеркасского политехнического института". — Новочеркасск: НПИ, 1973. № 264. С. 52—60.
3. Овчар З. Н., Машков Ю. К., Прокудина Н. А. Совершенствование конструкции торцовых уплотнений нефтеперекачивающих насосов на основе анализа гидромеханических и тепловых расчетов // Трение и износ. 2006. Т. 27. № 2. С. 185—190.
4. Смелов А. В., Данильченко С. А. Моделирование распределения тепловых потоков в торцовом уплотнении // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2015. № 4(165). С. 14—25.
5. Черский И. Н., Попов С. Н., Гольдштрах И. З. Проектирование и расчет морозостойких подвижных уплотнений. — Новосибирск: Наука, 1992. — 121 с.
6. Иегер Дж. К. Движущиеся источники тепла и температура трения // Прикладная механика и машиностроение. 1952. № 6. С. 22—39.
7. Starostin N. P., Tikhonov R. S. Numerical solution of the inverse problem of thermal diagnostics of friction in a system of radial sliding bearings with an account of rotation of the shaft // Inverse Problems in Science and Engineering. 2020. V. 28. №. 5. P. 662—673. DOI: 10.1080/17415977.2019.1628744.
8. Васильева М. А., Старостин Н. П. Численное моделирование теплового режима уплотнений из полимерных композиционных материалов: тр. VIII Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. EURASTRENCOLD-2018. — Якутск: Цумори Пресс, 2018. С. 296—302.
9. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1989.
10. <http://fenicsproject.org/>
11. Logg A., Mardal K.-A., Wells G. Automated solution of differential equations by the finite element method: The FEniCS book. — Springer Science & Business Media, 2012.
12. Quarteroni A., Valli A. Numerical approximation of partial differential equations. — Springer Science & Business Media, 2008.
13. Мусеев Н. Я. Монотонные разностные схемы повышенной точности для решения задач газовой динамики методом Годунова с антидиффузией // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2011. Т. 51. № 4. С. 723—734.

NUMERICAL STUDY OF THE SIMPLIFIED MODELS OF THERMAL PROCESS IN THE ROD SEALS

N. P. Starostin, R. S. Tikhonov

Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the RAS - Division of Federal Research
Centre "The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences",
Yakutsk, Russia

The problem of determining the unsteady temperature field in a polymer rod seal using various models of thermal conditions is considered. Computational experiments have shown that for the model taking into account the reciprocating motion of the rod (the "with moving source" model), the most similar one simplified model with a fixed uniform distribution of the heat flux that takes into account convective heat transfer from the free surface of friction.

Keywords: mathematical modeling, temperature, thermal conductivity, finite element method, rod, polymer cuff.

Старостин Николай Павлович, главный научный сотрудник.

E-mail: nikstar56@mail.ru

Тихонов Роман Семенович, научный сотрудник.

E-mail: roman_tikhon@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 апреля 2021 г.

УДК 681.3

DOI: 10.52190/2073-2597_2021_3_16

АНАЛИЗ ФУНКЦИЙ "БЕСЧЕРТЕЖНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ" В КОНЦЕПЦИИ "БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА"

А. А. Демин, канд. техн. наук; Р. А. Хабаров

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрены принципы снижения потерь в рамках реализации концепции "Бережливого производства" за счет внедрения "Бесчертежного проектирования". Систематизированы функции бесчертежного проектирования, направленные на формальное представление пространственной геометрии изделия со всей необходимой информацией, пояснениями и указаниями без использования чертежей. Показано, что активное развитие и внедрение бесчертежного проектирования способствует снижению потерь при создании конструкторско-технологической документации. Рассмотрено применение бесчертежного проектирования при разработке изделий электронной техники в рамках реализации концепции бережливого производства.

Ключевые слова: бережливое производство, снижение рисков, снижение потерь, бесчертежное проектирование, САПР, пространственная модель.

Бережливое производство (англ. *lean manufacturing* или *lean production*) — это концепция управления, при которой уровень работы повышается за счет снижения потерь [1, 2]. Под потерями понимают все, что негативно влияет на эффективность производства.

К основным видам потерь относят: процессные (бесполезные перемещения персонала, сырья, материалов, "холостые" действия оборудования и персонала и т. п.), технологические (несовершенство технологии), нерациональные запасы (склад сырья и готовой продукции), временные (простои), брак. Применение бережливого производства допустимо на всех этапах жизненного цикла изделий (процесс проектирования, управление проектом, технологическая подготовка производства, непосредственно производство, сбыт, эксплуатация и утилизация) [3, 4].

Рассмотрим подробнее особенности внедрения "Бережливого производства" на этапе проектирования изделий электронной техники. Разработка современной электронной техники предполагает решение схемотехнических, конструкторских и технологических задач [5–8]. Реализация комплексного проекта изделий электронной техники в виде пространственных параметрических моделей уже стала нормой [1, 2, 9–11]. Однако совместное синхронное проектирование электрических и механических составляющих изделия определяет проблему инкапсуляции их моделей. Решением данной проблемы является переход на бесчертежную технологию.

Двумерное представление конструкции изделия в виде чертежей все еще превалирует в общей массе инженерных документов, однако роль сквозных трехмерных моделей неуклонно растет. Все больше инженеров работает от трехмерной модели, а не от двумерного представления конструкции (форвард-реинжиниринг), с последующей детализацией (реверс-реинжиниринг) [3, 4, 9–12].

Цель работы — создание методики внедрения бесчертежного проектирования как инструмента бережливого производства.

В большинстве случаев использование чертежей оправдывается только отсутствием должного технического или организационного обеспечения [3–5]. Основным инструментом перехода на бесчертежное проектирование являются средства CAD/CAM/CAE (Computer-Aided Design/Computer-Aided Engineering/Computer-Aided Manufacturing). При разработке изделий электронной техники используют подсистемы MCAD (Mechanical CAD) и EDA (Electronic CAD).

Анализ роли бесчертежного проектирования в концепции "Бережливого производства"

К основным принципам бережливого производства относятся:

- ориентация на работника; работники (их творческий и интеллектуальный потенциал) — основной фактор для эффективного производства;
- минимизация потерь и постоянное совершенствование;
- перспективное планирование и принятие решений без жесткого регламентирования и балльной оценки деятельности персонала.

Концепция бережливого производства делит деятельность на предприятии на два типа: операции и процессы, добавляющие товару ценность для потенциального клиента, а также операции и процессы, не добавляющие ценности товару. Все, что входит во вторую группу, относится к потерям, а значит, должно быть устранено. При реализации процессов форвард-реинжиниринга (классический процесс разработки конструкторской документации — КД) к основным потерям можно отнести:

- увеличение времени обработки трехмерной модели и чертежей;

- замедление технологического процесса на производстве;
- наличие сильно ограниченного набора функционала, лишаящего проектировщика возможности создавать сложные конструкторские единицы;
- высокие системные требования разработанных систем автоматизированного проектирования (САПР);
- существующую проблему расхождения между чертежом и моделью.

При внедрении бесчертежного проектирования в концепции "Бережливого производства" необходимо определить, какой вклад дает бесчертежное производство в общую модель ценности (табл. 1).

Таблица 1

Оценка вклада показателей бесчертежного производства

Показатель	Характеристика
Оценка ценности	Рост производительности и экономия времени для обработки конструкторской документации совместно позволяют значительно сократить материальные, энергетические и физические затраты на производстве
Устранение потерь	Пропадает необходимость создания бумажной документации; на порядок снижается количество ошибок, а в случае ошибки ее легко отследить и откорректировать непосредственно в модели
Улучшение потока работ	Количество задач и связанных с ними подпроцессов сокращается; применяются лишь те действия, которые увеличивают качество и ценность продукта
Востребованность результата	Полученные 3D-модели изделий можно с легкостью адаптировать и применять в дальнейших разработках на производстве
Совершенство	Отказ от бесполезных действий, постоянное улучшение процессов, внедрение виртуальной реальности для работы на производстве

Основную трудность при формировании бережливого производства представляет обеспечение прозрачности и управляемости активных элементов, т. е. таких элементов, которые имеют свое мнение (чаще всего людей, но возможно, и систем с искусственным интеллектом). Бережливый подход принесет максимум пользы только при условии, что все участники потока работ будут выполнять необходимые действия, результаты которых контролируемы. При этом необходимо соблюдать следующие правила [13–15]:

- ценность каждого семейства продуктов участники потока устанавливают сообща;
- все участники потока работ должны получать выгоду, соответствующую объему их инвестиций;
- члены потока должны все вместе постоянно проверять все участки потока для обнаружения потерь и их устранения.

Показатели эффективности внедрения бесчертежного производства в концепции "Бережливого производства" представлены на рис. 1.



Рис. 1. Показатели внедрения бесчертежного производства

На стартовых стадиях потока производятся наибольшие вложения. Однако самые выгодные сделки достаются компаниям, которые находятся на конечной стадии потока, т. е. являются продавцами своей продукции. Для снижения данного разрыва необходимо найти инструменты компенсации, которые позволят совместно проектировать новые производственные мощности и вкладывать средства.

Анализ реализации в распространенных САПР инструментов бережливого производства

Составив перечень 8 основных инструментов бережливого производства, можно определить, как каждый из них реализуется и влияет на всё производство.

Карта потока формирования ценности. Данная графическая схема, используемая в бережливом производстве, позволяет определить из чего складывается ценность продукта, приобретаемого клиентом, и какие задачи превалируют, а какие затрудняют и замедляют производственный процесс. Исходя из анализа слабых мест потока работ, можно без труда узнать какие процессы лучше сократить, а какие модернизировать.

Вытягивающее точное производство (pull production). Данный простой вид инструмента позволяет ускорить процесс производства за счет "вытягивания" нижестоящего процесса для выполнения последующих ступеней на производстве.

Канбан. Удобство данного инструмента заключается в своевременности оповещения о начале изготовления продукта или его сокращении. Поддержка в BPMN позволяет составить все этапы производства и сбыта, начиная со стадии анализа спроса и заканчивая проектированием какого-либо продукта.

Кайдзен. Благодаря системе поощрений инициативы сотрудников увеличивается ценность

продукции, что влечет за собой сокращение расходов. Бережливое производство делает производство в несколько раз выгоднее как для клиента, так и для производящей компании.

5S. Методика создания идеального рабочего места и оптимизации труда, включающая пять элементов. Данная методика, используемая в бережливом производстве, позволяет создать идеальное рабочее место и оптимизировать распределение труда на предприятии.

SMED ("смена штампа за одну минуту"). Функциональность и практичность оборудования позволяют внедрять бережливое производство за счет быстрой и точной подстройки оборудования. Повышение скорости настройки влечет за собой повышение ценности изделия в десятки раз.

TPM (*Total Productive Maintenance*). Бережливое производство дает возможность устранить количество дефектов на стадии проектирования, и данный инструмент позволяет организовать работу всего персонала на производстве

JIT (*Just-In-Time* — "строго вовремя"). Бережливое применение расходного материала. На каждом этапе прорабатывается количество требуемого сырья, которое подается точно в срок, не ранее установленной даты. Это позволяет избежать загруженности склада и сохранения ненужной продукции.

Представленные инструменты можно свести в таблицу, которая позволит определить возможности рассматриваемых САПР по переходу на бесчертежное производство (табл. 2).

Для детального сравнения используем паутинную модель анализа функциональности (рис. 2).

Таблица 2

Сравнительная таблица рассмотренного программного обеспечения

Наименование инструментального средства	Критерии инструментальных средств						
	Удобство	Простота	Цена	Поддержка	Функциональность	Кастомизируемость	Поддержка BPMN
Карта потока формирования ценности	7	5	9	6	5	6	8
Вытягивающее поточное производство	3	7	6	4	5	5	7
Канбан	8	5	8	6	7	7	10
Кайдзен	6	8	10	5	4	5	6
5S	9	4	5	6	5	8	4
SMED	8	8	10	4	9	8	5
TPM	5	6	10	4	8	7	6
JIT	8	3	8	5	4	7	8

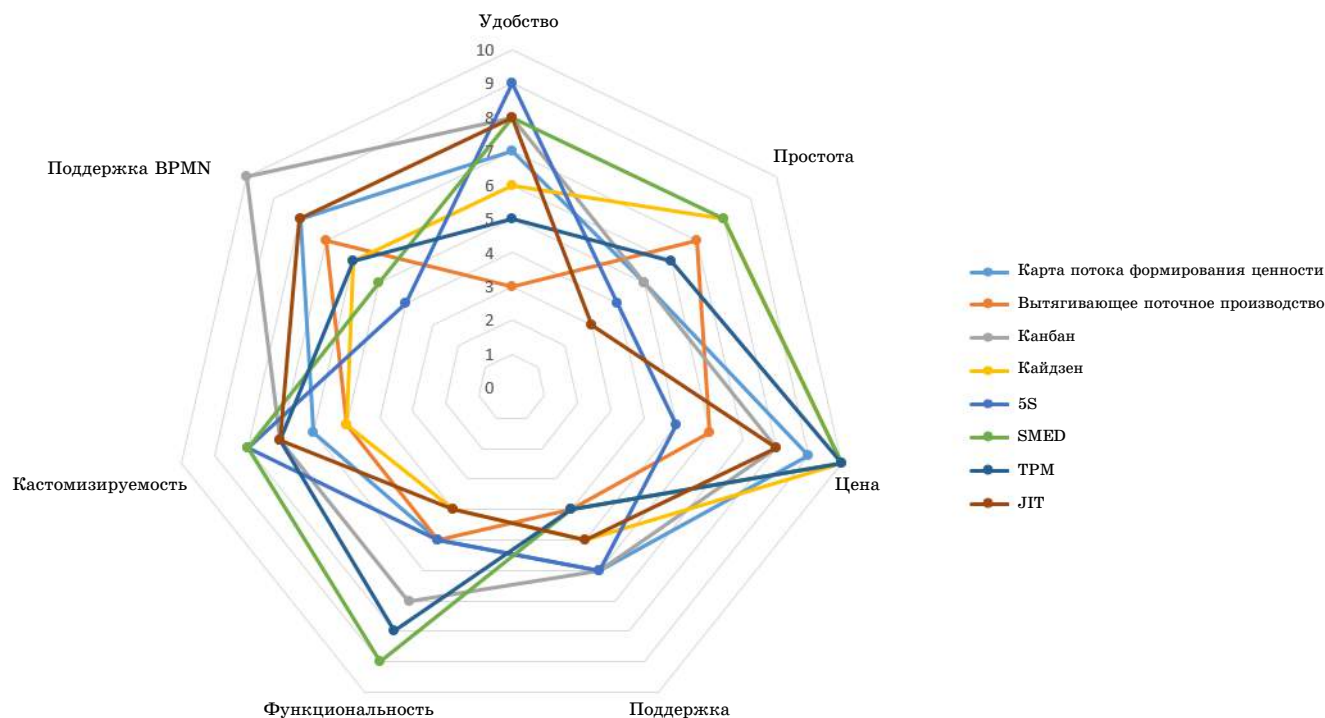


Рис. 2. Модель для анализа инструментов бережливого производства

Все основные критерии инструментальных средств можно разделить на семь групп:

- удобство использования инструмента в работе;
- простота работы с инструментом (низкий порог вхождения новых пользователей);
- цена программного продукта;
- поддержка и документация на программный продукт;
- функциональность программного продукта;
- кастомизируемость элементов модели и функционала программного решения;
- поддержка нотации BPMN.

Проанализировав полученную модель, можно сделать несколько выводов по инструментам бережливого производства:

- большинство инструментов имеет высокие значения в удобстве использования;
- высокие ценовые показатели указывают на то, что готовая продукция будет выгодной для заказчика;
- немногие инструменты соответствуют стандарту BPMN;
- наибольшее увеличение ценности достигается при использовании инструмента SMED;
- наименьшее увеличение ценности достигается при использовании инструмента "вытягивающее поточное производство".

На практике описанные инструменты не всегда могут достичь таких показателей в силу того, что не все системы могут реализовать полный набор функций. По этой причине на производство внедряют систему автоматизации, которая позволяет всем модулям выполнять в полной мере поставленные задачи без каких-либо осложнений.

При выборе системы автоматизации одним из важнейших критериев является кастомизация. Это даёт возможность расширения функциональности, которая позволяет применять не только стандартные средства настройки приложений, но и дополнительные программные интерфейсы используемой платформы.

Существующие программы по созданию трехмерных моделей можно разделять и оценивать по нескольким факторам:

- соответствие разрабатываемых моделей стандарту BPMN;
- сопоставление бизнес-плана заказчика и семантики проектируемой модели;
- разработанный процесс поддается симуляции;
- функции учета, хранения и маршрутизации документов позволяют с легкостью сохранять созданный документ без потери каких-либо данных со своевременной доставкой на рабочее место (по технологиям online и offline);
- функция предоставления доступа пользователям системы к хранимой информации, обеспечение удобства использования;
- инструменты автоматизации производства, инструменты моделирования процессов;

• возможность создания групповой работы, в том числе видеоконференций и средств для групповых обсуждений;

- возможность поиска с помощью различных видов фильтров и доступность ввода сложных поисковых запросов.

Разобрав факторы оценки требуемых программных продуктов и существующие инструменты бережливого производства, составим список подходящих САПР для перехода на бережливое производство.

Самой старой параметрической системой трехмерного проектирования является *Autodesk Inventor*. Множество обновлений, выпущенных компанией, позволило *Inventor* создать нерушимый фундамент и эталон среди отечественных САПР. Этот программный продукт прост в освоении, имеет поддержку нотации BPMN и обширный список кастомизации с функционалом, которые в совокупности образуют незаменимый компонент для внедрения бесчертежного производства. Данная отечественная разработка включает множество библиотек и часто используемых элементов, что позволяет применять программу с максимально удобным и практичным интерфейсом. В *Inventor* можно проектировать различные виды трехмерных моделей, например кабельные и трубопроводные системы.

Одной из самых многофункциональных и практичных систем автоматизированного проектирования является продукт *SolidWorks*. Сложность освоения программы перекрывается повышенной ценностью продукта на выходе, содержащего огромное количество функциональных инструментов. В данной среде можно проектировать изделия любых типов сложности и назначения. В ней также доступно проведение различных типов анализа и расчета. Так же как и *Inventor* *SolidWorks* может с легкостью быть внедрен в бесчертежное производство. С удобным интерфейсом и обилием настроек он позволяет сократить проектировочный процесс в несколько раз.

Первой и одной из самых популярных средой автоматизированного проектирования является графическая платформа *AutoCAD*. Данная платформа позволяет разработчикам создавать множество программ из различных сфер жизнедеятельности и систем для инженерного анализа. Наличие обширной кастомизации дает возможность создавать огромное количество различных надстроек и функций. Также присутствует возможность работы нескольких сотрудников в одном файле.

Высокая себестоимость программного обеспечения, отсутствие трехмерной параметризации и трудности в освоении софта приводят к тому, что конкурентоспособность данного ПО с каждым днем все уменьшается. Поэтому данное ПО выбирают реже, чем его аналог на рынке САПР. По этой причине внедрение данной САПР в бесчертежное производство является менее выгод-

ным для производящей компании по сравнению с другими программными продуктами.

Комплексная система проектирования электронных модулей на основе печатных плат *Altium Designer* позволяет выполнять весь спектр проектировочных задач. Данная САПР соответствует нотации VRPN, имеет множество кастомизаций, которые позволяют производить продукцию с максимально высокой ценностью, многозадачностью и высокой степенью сложности. Наличие групповых проектов и коммуникации с другими пользователями говорит о том, что внедрение данного программного продукта в бесчертежное производство позволит проектировщикам качественно работать на удобном интерфейсе с максимальной отдачей.

Преимущества перехода на бесчертежные технологии

Зачастую заказчики и не нуждаются в предоставлении документации на многие производственные этапы (например, инженер-расчетчик, инженер-электронщик и т. д.). Они используют другие инструменты, никак не связанные с конструкторской документацией.

Все технологическое производство, начиная с разработки и заканчивая инженерными расчетами, производят без применения чертежей. В течение этого процесса используют данные, которые берут из 3D-модели. Оборудование, используемое инженерами (планшеты, ноутбуки и т. д.), позволяет им работать удаленно, не находясь на рабочем месте. В случае, если требуется сгенерировать чертеж, его необходимо формировать на самом последнем этапе разработки.

Сокращение этапа создания и формирования чертежа позволяет экономить до 40 % времени при проектировании конструкторской документации. Утверждение требуемой документации в электронном формате позволяет сэкономить до 70 % дополнительного времени, так как это действие можно выполнять, находясь в любой точке планеты. При безбумажном проектировании можно полностью освободить склады от бумажных носителей, используя облачные хранилища для хранения различной КД. Это также является практичным, поскольку все изменения производятся непосредственно на самом изделии. Кроме того, уменьшается шанс совершить ошибку: ее проще отследить и откорректировать. Последнее влечет за собой устранение самого дорогостоящего эффекта — ошибки на этапе проектирования.

Документооборот, который будет организован по "безбумажной" технологии, позволит снизить затраты необходимых ресурсов и требуемого времени [16—21]. Последующий отказ от различных типов чертежей, например сборочного чертежа, сделает документацию более наглядной и упрощенной для анализа инженером. Данное качество позволит организовать многосерийное производство на предприятии [4].

Методика реализации бесчертежных технологий при разработке изделий электронной техники

При реализации бесчертежных технологий на производстве при разработке изделий электронной техники требуется использовать восемь описанных инструментов бережливого производства. Описанные САПР могут способствовать внедрению "безбумажной" технологии и сокращению расходов на производстве.

Методика реализации не требует краткосрочного внедрения данной технологии на производстве. В первую очередь требуется реализовать конкретный единичный продукт, применяя принципы бережливого производства. Этот важный этап позволит разобраться, насколько выгодной и практичной является данная инновация.

Важным пунктом по реализации бережливого производства является то, что все сотрудники на каждом этапе должны применять принципы бережливой технологии, которые они должны изучить и научиться применять с максимальной выгодой для предприятия. Необходимо выявить самый убыточный процесс на производстве и составить план по его модернизации.

Идеальный метод, который применяют компании для легкой интеграции бережливого процесса, — это объединение множества потоков в один процесс. После этого на выходе получают конечный продукт. Более того, компании-заказчики, поставщики и прочие лица, которые не участвуют в этом процессе, видя данные улучшения, стараются также внедрить его в свои производственные цеха.

Главная проблема, которой требуется избежать компаниям при организации бережливого производства, — это требование прозрачности всех членов потока. Необходимо чтобы все данные, документация и прочая конфиденциальная информация были доступны. Однако не все компании готовы пойти на такой шаг.

На рис. 3 представлен алгоритм методики перехода на бесчертежное производство для изделий электронной техники.

Трехмерные модели позволяют определять качество конструктивных параметров изготавливаемой продукции и последующие этапы, которые будут определять особенности конструкции до материализации модели.

На современном производстве 3D-модели используют как одну из составных частей КД на разрабатываемый продукт [5]. Можно сформулировать основные задачи технологического процесса, который применяет геометрию 3D-моделей:

- создание сложной многофункциональной оснастки;
- разработка процессов формообразования для выявления различных ошибок, которые впоследствии будут устраняться, и экономии расходного материала;

• составление шаблонов при формировании технологических процессов, которые будут применяться как операционные эскизы.

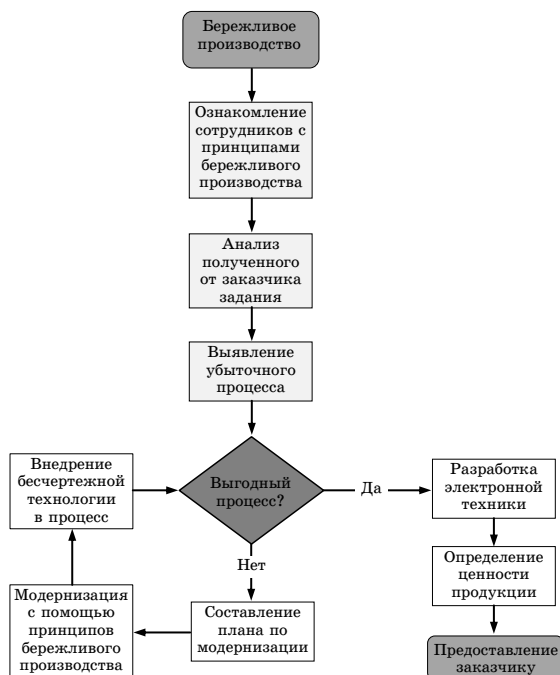


Рис. 3. Алгоритм методики перехода на бесчертежное производство

Модель чертежа связана с 3D-моделью, на основании которой создается данный чертеж. При любом изменении модели происходит автоматическое изменение всех видов чертежа. В качестве примера на рис. 4 представлена электронная модель технологической тары, разработанной в Autodesk Inventor. Данная 3D-модель позволяет оценить все необходимые характеристики, которые требуются для создания высококачественного и эргономического устройства [16, 17].

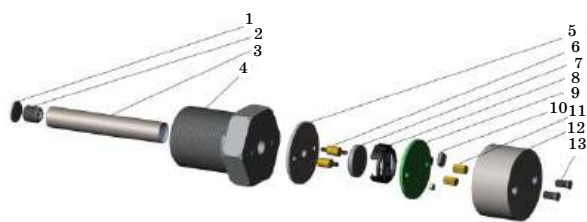


Рис. 4. Объемная модель МЭМС (микроэлектромеханические системы) датчика:

- 1 — крышка трубки датчика; 2 — МЭМС-датчик;
- 3 — трубка для датчика; 4 — винтовое основание — крепление прибора; 5 — основание корпуса платы; 6 — нижние стойки; 7 — батарейка; 8 — отсек для батарейки;
- 9 — плата; 10 — элементы платы; 11 — верхние стойки;
- 12 — крышка корпуса; 13 — крепежные винты крышки

Взаимодействие с определенным макетом позволяет организовывать на производстве параллельное проектирование. Важным моментом является то, что все требуемые данные сохраняются в единой системе хранения, а точнее, в электронном макете изделия. Это позволяет ди-

намично выбирать нужные данные, отчеты по всем или отдельным стадиями проектирования.

Заключение

Для внедрения бережливого производства необходимо соблюдать ряда требований:

- необходим человек, который способен настоять на внедрении технологии в производственный процесс;
- каждый человек на предприятии должен понимать суть и знать принципы бережливого производства;
- данная технология перспективна для компаний, которые могут обанкротиться, т. к. только такие компании готовы к массовым изменениям;
- важно понимание того, из каких потоков создается ценность на производстве.

Организация поточного метода требует выполнения следующих шагов:

- организация деления на ячейки по видам изделий, а также создание функциональных команд для активирования их работы;
- создание отдела, который будет анализировать работу групп людей и предоставлять информацию всему производству;
- создание брифингов, на которых будут обсуждаться остро стоящие вопросы об определении ценности и убытков на определенном этапе производства;
- составление требуемых показателей, которых необходимо достигать для улучшения производящей компании.

Такая технология позволит упростить прочтение конструкторской документации, а следовательно, облегчит процесс постановки изделий на серийное производство. Это приведет к совместимости между устройствами, машинами и возможности людей взаимодействовать и передавать различные данные между собой, находясь на расстоянии друг от друга. Новым трендом в четвертой технической революции является внедрение виртуальной реальности. Бесчертежное проектирование позволит интегрировать 3D-модели разрабатываемых устройств в виртуальный мир, где будет создаваться цифровой аналог реальных объектов. В результате можно будет редактировать реальные объекты с соблюдением всех законов физики в виртуальной реальности. Данная технология позволит управлять производственными процессами на уровне, не ограниченном одним предприятием, таким образом, чтобы экономить ресурсы и энергоносители.

Отдельные результаты получены в рамках госзадания № 0705-2020-0041 "Фундаментальные исследования методов цифровой трансформации компонентной базы микро- и наносистем".

Литература

1. Вумек Д., Джонс Д. Бережливое производство: Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании // Альпина Бизнес Букс. 2009 г. Серия: Модели менеджмента корпораций. — 472 с.
2. Вейдер М. Инструменты бережливого производства: Мини-руководство по внедрению методик бережливого производства // Альпина Бизнес Букс. 2005. — 110 с.
3. Shakhnov V. A., Kurnosenko A. E., Demin A. A., Vlasov A. I. Industry 4.0 Visual Tools for Digital Twin System Design // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. V. 1295. P. 864—875.
4. Шахнов В. А., Курносенко А. Е. Моделирование цифрового производства электронной аппаратуры в рамках концепции "Индустрия 4.0": мат. I Междунар. науч.-практ. конф. "Цифровая трансформация промышленности: тенденции, управление, стратегии". 2019. С. 585—594.
5. Дудко В. Г., Вереинов К. Д., Власов А. И., Тимошкин А. Г. Современные методы и средства обеспечения качества в условиях комплексной автоматизации // Вопросы радиоэлектроники. 1994. № 1. С. 71—89.
6. Власов А. И., Ганев Ю. М., Карпунин А. А. Системный анализ "Бережливого производства" инструментами визуального моделирования // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2015. № 4(160). С. 19—24.
7. Власов А. И., Ганев Ю. М., Карпунин А. А. Система 5S-технология создания эффективного рабочего места в концепции "Бережливого производства" // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 1(161). С. 65—68.
8. Власов А. И., Ганев Ю. М., Карпунин А. А. Картирование потока создания ценностей в концепции "Бережливого производства" // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2016. № 2(162). С. 23—27.
9. Берлинер Э. М., Таратынов О. В. САПР конструктора-машиностроителя // Форум, Инфра-М. 2015. № 8(288). С. 50—64.
10. Райан Д. Инженерная графика в САПР // Мир. 1989. № 5(391). С. 95—124.
11. Большаков В. П., Бочков А. Л. Твердотельное моделирование сборочных единиц в САД-системах // Питер. 2018. № 1(368). С. 45—76.
12. Галиновский А. Л., Бочкарев С. В. Информационные системы управления качеством в автоматизированных и автоматических производствах // Инфра-М. 2018. № 3(284).
13. Шеффер Э. Ф. Индустрия 4.0. Преимущества цифровых технологий для производства // Издательская группа "Точка". 2019. № 4(320). С. 74—91.
14. Рот А. Внедрение и развитие Индустрии 4.0. Основы, моделирование и примеры из практики // Editorial URSS. 2017. № 2(294). С. 25—56.
15. Комаров А. С., Крапучин Д. В. Управление техническим уровнем высокоинтегрированных электронных систем // Техносфера. 2014. № 4(240). С. 64—94.
16. Герасименко А. С. Проектирование в AutoCAD 2020 // ДМК-Пресс. 2020. № 1(435). С. 10—25.
17. Andreev K. A., Vlasov A. I., Shakhnov V. A. Silicon pressure transmitters with overload protection // Automation and Remote Control. 2016. V. 77. № 7. P. 1281—1285.
18. Зиновьев Д. В. Основы моделирования в SolidWorks // ДМК-Пресс. 2017. № 4(240). С. 14—31.
19. Певницкий С. Ю. Разработка печатных плат в NI Ultiboard // ДМК-Пресс. 2012. № 5(256). С. 115—141.
20. Лопаткин А. В. Проектирование печатных плат в Altium Designer // ДМК-Пресс. 2016. № 1(400). С. 235—265.
21. Гительман Л. Д. Менеджмент, опережающий время. Прорыв к цифровой индустрии 4.0 // Библиотека создания инноваций. 2020. № 8(364). С. 15—52.

ANALYSIS OF THE FUNCTIONS OF DRAWINGLESS DESIGN IN THE CONCEPT OF LEAN MANUFACTURING

A. A. Demin, R. A. Khabarov
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The article discusses principles of reducing losses in the framework of the implementation of the concept of Lean production through the introduction of Drawingless design. Functions of drawingless design are systematized, aimed at the formal representation of the spatial geometry of the product with all the necessary information, explanations and instructions without using drawings. It shows that the active development and implementation of drawingless design contributes to the reduction of losses in the creation of design and technological documentation. This article discusses the use of drawingless design in the development of electronic products in the framework of the implementation of the concept of Lean Manufacturing.

Keywords: lean manufacturing, risk reduction, loss reduction, drawingless design, CAD, spatial model.

Демин Алексей Анатольевич, доцент.
E-mail: fiz.alex@gmail.com
Хабаров Ричард Алексеевич, бакалавр.
E-mail: richard.kh.basket@gmail.com

Статья поступила в редакцию 11 апреля 2021 г.

УДК 621.9

DOI: 10.52190/2073-2597_2021_3_23

ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ РЕМОНТНЫХ РАБОТ

А. О. Бутко, канд. техн. наук; П. М. Кузнецов, д-р техн. наук
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

Рассмотрены вопросы организации ремонтных и регламентных работ в отношении изделий машиностроительной техники. Предложены подходы на основе математических моделей, позволяющих повысить производительность ремонтных организаций, обеспечить более полную и рациональную загрузку производственных мощностей.

Ключевые слова: жизненный цикл изделия, моделирование, производственная система, технологическое оборудование, управление.

Предприятия регламентных и ремонтных работ в отношении различного машиностроительного оборудования являются важной составной частью производственного этапа жизненного цикла изделия. При эксплуатации различных видов машиностроительного оборудования оно с некоторой периодичностью требует проведения регламентных работ, а в случае потери работоспособности — и проведения ремонта. В любом случае оборудование перестаёт выполнять заданные функции в течение некоторого отрезка времени, что влечет за собой существенные материальные затраты [1].

Крайне важно сократить время простоя оборудования в целях увеличения производительности производственной системы, в которую входит это оборудование. Сокращение времени простоя определяется прежде всего обеспечением эффективной системой организации регламентных и ремонтных работ. Для повышения эффективности планирования подобных работ необходимо организовывать их таким образом, чтобы они проводились с минимальными длительностью и себестоимостью [2].

Анализ сложившихся условий показывает, что, как правило, ремонтные предприятия или их подразделения не уделяют должного внимания планированию и обеспечению сопровождения изделий на производственном этапе жизненного цикла. В результате возникает несогласованность действий при одновременном выполнении ряда регламентных и восстановительных работ при обслуживании нескольких изделий. Эта несогласованность выражается в ошибочных действиях при планировании и выборе стратегии управления ресурсами технологического оборудования, которое используется для подобных работ.

Здесь можно выделить три случая. Первый из них связан с неправильным выбором оборудования, подразделения и т. д. В этих условиях выполнение работ не может быть осуществлено даже частично из-за несовпадения множеств технологических возможностей и возможностей, требуемых по условиям выполнения работ:

$$VS_i \not\subset VD_i,$$

где VS_i — множество технологических возможностей, требуемых для выполнения работ;

VD_i — множество технологических возможностей ремонтной единицы оборудования или подразделения;

i — отдельно взятый случай проведения работ.

Второй вариант: при пересечении множеств,

$$VS_i \cap VD_i,$$

оказывается возможным выполнение ремонтных работ частично данным подразделением. Это можно записать следующим образом:

$$VS_i \cap VD_i = \{R | R \in VS_i \wedge R \in VD_i\}.$$

В данном выражении R представляет собой объем работ, которые могут быть выполнены при использовании технологических возможностей i -го ремонтного предприятия.

Третьим вариантом является случай, когда объем технологических возможностей оказывается больше требуемого для проведения ремонтных работ:

$$VS_i \supset VD_i.$$

Возникают различные сценарии выполнения регламентных и ремонтных работ. Например, при отсутствии загрузки ремонтных подразделений целесообразно использовать третий вариант, т. к. задействованным оказывается только одно подразделение.

Тем не менее в обычных условиях выбор производственных ресурсов различных подразделений является достаточно сложной задачей, причем сложность определяется отсутствием полной формализации состояния производственных систем подразделений во времени. Формализация подобной задачи определяется адекватной математической моделью, отражающей состояние производственных систем отдельных подразделений и его зависимость от

различных факторов, воздействующих на них [3].

Целью моделирования являются получение информации о состоянии производственных систем во времени и выработка стратегии загрузки технологического оборудования производственных систем подразделений, предполагающей максимальную производительность за счет рационального распределения ремонтных и регламентных работ.

Каждый элемент C_i является структурно-параметрической моделью процесса работ по ремонту и регламенту для изделия i -го наименования. Момент запуска очередного изделия определяется текущим временем t_i , совокупностью параметров C_i , с одной стороны, и текущим состоянием производственной системы подразделения — с другой. Обеспечение информации о текущем состоянии производственной системы представляется динамически меняющимся потоком информации Z_i :

$$Z = \bigcup_{i=1}^{n_{\text{т.об.}}} Z_i,$$

где $n_{\text{т.об.}}$ — число единиц технологического оборудования в рассматриваемом подразделении.

Информационное обеспечение C_i содержит две части: постоянную, описывающую последовательность выполняемых технологических операций, и переменную, описывающую возможности технологического оборудования и момент запуска на выполнение очередной технологической операции. Первая часть информационного обеспечения определяется совокупностью спроектированных вариантов технологических процессов, вторая — текущим состоянием производственной системы, формируемым путем диспетчеризации в ключевых точках производственных систем Z .

Информационный поток Z представляет собой массив данных по всему парку технологического оборудования, составляющего производственную систему всех подразделений.

Каждая единица технологического оборудования производственной системы ориентирована на работу с определенным базовым конструктивом. Тем не менее при разработке вариантов выполнения технологических процессов целесообразно учитывать варианты других допустимых по технологическим признакам базовых конструктивов. Таким образом, задача распределения работ по отдельным подразделениям и внутри них имеет многопараметрический характер с широкой вариативностью.

Основными параметрами математической модели, характеризующими состояние технологического оборудования, являются:

- время завершения очередной технологической операции на каждом из вариантов технологического оборудования, составляющих производственную систему;
- длительность переналадки технологического оборудования с одной технологической

операции на другую с учетом возможности частичного сохранения элементов предыдущей наладки;

- длительность выполнения каждой технологической операции.

Параметрами, характеризующими выполняемые работы, являются:

- множество технологических операций, обеспечивающих выполнение регламентных и ремонтных работ;
- возможные варианты маршрутов выполнения технологических процессов;
- заданные сроки выполнения регламентных и ремонтных работ и требования к ним.

Перечисленные параметры необходимы при определении стратегии запуска изделий в производственную систему того или иного подразделения. Эта последовательность представляет собой динамический ряд, элементы которого могут менять места и значения в зависимости от состояния производственной системы подразделения [4].

В условиях динамически меняющихся параметров, характеризующих состояние производственной системы, обработка данных представляет собой многопараметрическую задачу. Ее спецификой являются целочисленность и, следовательно, невозможность использования традиционных методов линейного программирования. Применение методов полного или направленного перебора в подавляющем большинстве случаев оказывается невозможным вследствие большой размерности и неопределенности структуры процесса обработки данных.

С другой стороны, параметры, характеризующие состояние производственной системы, меняются достаточно предсказуемо при условии использования данных диспетчеризации. Для формализации значений этих параметров удобно использовать их матричное представление. В данном случае используют два вида матриц.

Первая матрица — трехмерная (Z), состоящая из n двумерных матриц A_i , каждая из которых представляет совокупность свойств конкретного технологического оборудования. Состояние производственной системы в каждый момент времени описывается двумерной матрицей B .

Каждый слой A_i матрицы Z характеризует технологические возможности i -й единицы технологического оборудования и представляет собой двумерную матрицу размерности $m + 1, m$:

$$A_i = \begin{vmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,m} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m,1} & a_{m,2} & \dots & a_{m,m} \\ a_{m+1,1} & a_{m+1,2} & \dots & a_{m+1,m} \end{vmatrix},$$

где m — общее количество технологических операций, выполняемых в данной производственной системе;

$a_{p,q}$ — время переналадки данного технологического оборудования с технологической операции p на технологическую операцию q , причем

$$1 \leq p \leq m;$$

$$1 \leq q \leq m.$$

Одновременно

$$a_{p,q} = 0 \text{ при } p = q.$$

Последняя строка $a_{m+1,q}$ — время выполнения операции q .

При наличии i -го технологического оборудования, идентичного технологическому оборудованию j , выполняется условие

$$A_i = A_j.$$

При невозможности выполнения операции на данном технологическом оборудовании, и данная операция не может быть переставлена в последовательности ни в одном из сформированных технологических маршрутов, рассматривается требуемый вариант с использованием другого технологического оборудования.

При разработке методики определения оптимальной загрузки технологического оборудования необходимо учитывать, что данная задача имеет большую размерность. Поэтому для решения поставленной задачи выбран метод блочного программирования. Это позволяет при решении задач моделирования большого объема использовать решения ряда линейных экстремальных задач меньшей размерности. Здесь используется декомпозиция общей задачи на ряд задач, специфика решения которых допускает применение методов решения, непригодных для ее решения в целом [5].

Полная реализация такого подхода возможна при условии, что в любой момент времени пропускная способность совокупности производственных систем шире, чем требуется для одновременного обслуживания всего объема ремонтных и регламентных работ:

$$M_y^* \subseteq M_{\text{п.сис}}^*,$$

где M_y^* — массив необходимых технологических возможностей производственных систем для выполнения всего объема ремонтных и регламентных работ;

$M_{\text{п.сис}}^*$ — общий массив технологических возможностей всех производственных систем.

Звездочка указывает на то, что составляющие массивов взяты за малый интервал времени Δt ($\Delta t \rightarrow 0$).

При несоблюдении данного условия, но соблюдении условия:

$$\int_{t_1}^{t_2} M_y^* dt \leq \int_{t_1}^{t_2} M_{\text{п.сис}}^* dt$$

на интервале времени t_1, t_2 больше, чем время выполнения самого трудоемкого производственного заказа (ПЗ), оказывается возможным выполнение всего объема ПЗ. Однако выполнение части из них будет иметь прерывистый характер во времени и выполняться, скорее всего, по неоптимальным маршрутам. К таким работам следует отнести работы, имеющие заведомо длинные, не критические сроки выполнения.

Если не выполняется и последнее условие, данная производственная система оказывается технически неспособной своевременно выполнить весь объем заданных работ при любом их распределении как по оборудованию, так и по времени. Следствием этого оказывается рост очереди на выполнение работ. Данная проблема выходит за рамки решения задачи рационального распределения и требует решений на другом уровне (например, расширение производственной системы, замена устаревшего оборудования более современным и т. д.).

При перемещении изделия от одного технологического оборудования к другому, затрачивается время, которое определяется их относительным расположением на производственных площадях. Время перемещения заготовок между технологическим оборудованием может быть представлено в виде матрицы размерности $n + 2, n$:

$$B = \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \dots & b_{1,n} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \dots & b_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n,1} & b_{n,2} & \dots & b_{n,n} \\ b_{n+1,1} & b_{n+1,2} & \dots & b_{n+1,n} \\ b_{n+2,1} & b_{n+2,2} & \dots & b_{n+2,n} \end{bmatrix},$$

где n — общее количество технологического оборудования, составляющего производственную систему;

$b_{p,q}$ — время перемещения заготовок от p -го технологического оборудования к q -у, причем

$$1 \leq p \leq n;$$

$$1 \leq q \leq n.$$

Одновременно

$$b_{p,q} = 0 \text{ при } p = q.$$

Строка $n + 1$ содержит информацию о времени доступа к q -у технологическому оборудованию и определяется временем завершения на нем предшествующей операции. Компоненты этой строки являются динамически меняющимися.

Строка $n + 2$ содержит информацию о приоритете выполняемых на данном технологическом оборудовании работ. Кроме того, в данной строке содержится информация о потере работоспособности оборудования в текущий момент

времени. Например, если данное технологическое оборудование не функционирует по причине выхода из строя, то в соответствующий элемент строки $n + 2$ записывается признак занятости по высшему приоритету, а в строке $n + 1$ — время доступа, соответствующее предполагаемому времени проведения восстановительных работ.

Поиск варианта оптимальной загрузки технологического оборудования начинается с анализа сроков запуска ремонтных и регламентных работ очередного изделия. Работы с более ранним сроком поступают на технологическое оборудование согласно его оптимальному технологическому маршруту. Далее выбирается следующее изделие с более поздним сроком окончания работ, ему также назначается технологическое оборудование согласно его оптимальному маршруту и т. д. Наконец, для очередного изделия из-за предшествующей загрузки технологического оборудования более приоритетными заказами оказывается невозможным обеспечить выполнение технологической операции согласно его оптимальному маршруту. В этом случае весь объем работ направляется на свободное технологическое оборудование, для которого соблюдается условие

$$F(b_{n+1,k} + b_{k1,k} + a_{m+1,j} n_{ci} + a_{1,j}^k) \rightarrow \min,$$

где $b_{n+1,i}$ — члены матрицы В;

$a_{m+1,j}$ — члены матрицы А.

Выбор рационального варианта осуществляется не только в среде свободного на текущий момент времени технологического оборудования, но и в среде технологического оборудования, занятого работами с более низким уровнем приоритета. Работы с более высоким приоритетом вытесняют работы с более низким приоритетом. Затраты от образующегося при этом

незавершенного производства компенсируются своевременным выполнением приоритетных работ и отсутствием штрафных санкций.

Заключение

В результате проведенного исследования выяснено, что процессы планирования работы предприятий, занимающихся ремонтными и регламентными работами, как правило, имеют нереализованные возможности для повышения степени рациональной загрузки их производственных систем. Это приводит к снижению производительности и затягиванию сроков выполнения работ.

Разработанные математические модели позволяют моделировать производственные процессы и на основе полученной информации управлять движением работ в целях повышения степени загрузки технологического оборудования. В отдельных случаях это позволило снизить время выполнения работ на 25—30 %.

Литература

1. Кузнецов П. М., Хорошко Л. Л. Цифровизация процессов восстановления дробильно-измельчительного оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 10. С. 195—205.
2. Бутко А. О., Кузнецов П. М. Построение информационных моделей в интегрированных системах // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2019. № 3. С. 20—25.
3. Kalyakulin S. Y., Kuz'min V. V., Mitin E. V., Sul'din S. P. Informational Relational Models for Calculating the Cutting Conditions in Automatic Control Systems // Russian Engineering Research. 2018. V. 38. № 12. P. 1049—1052.
4. Ягопольский А. Г., Домнышев А. А., Воронцов Е. А. Проблемы инновационного развития машиностроения России // Инновации и инвестиции. 2019. № 2. С. 7—9.
5. Бутко А. О., Кузнецов П. М. Организация целеустремленной среды управления единичным производством // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2020. № 2. С. 7—11.

ORGANIZATION OF THE TECHNOLOGICAL ENVIRONMENT OF REPAIR WORK

A. O. Butko, P. M. Kuznetsov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

The article is devoted to the issues of the organization of repair and maintenance work of mechanical engineering products. The article discusses approaches based on mathematical models that improve their productivity, provide a more complete and rational utilization of production facilities.

Keywords: product life cycle, modeling, production system, technological equipment, management.

Бутко Антон Олегович, доцент.

E-mail: mati-tias@yandex.ru

Кузнецов Павел Михайлович, доцент.

E-mail: profpol@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 12 мая 2021 г.

ВЕРИФИКАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СТОИМОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В. Б. Кондусова, д-р техн. наук; Д. В. Кондусов, канд. техн. наук
ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, Россия

Рассмотрен процесс верификации имитационной модели стоимости жизненного цикла изделий высокотехнологичных отраслей промышленности методом проверки корректности результатов на "крайние" значения. Верификация проведена для построенной авторами имитационной модели на примере эксплуатации воздушного судна.

Ключевые слова: жизненный цикл изделий, эксплуатация, имитационная модель, система контрактации, высокотехнологичные изделия.

Минимизация общей стоимости жизненного цикла высокотехнологичных изделий, на этапе эксплуатации, с условием поддержания необходимого уровня его технической готовности является главной совместной задачей изготовителя и потребителя в рамках модели контрактов жизненного цикла [1]. Механизм контрактации рассмотрен В. А. Федоровичем, В. Б. Муравником, О. И. Бочкаревым [2]. В их трудах анализируются государственный рынок и военно-промышленный комплекс США в сопоставлении правовых и организационных аспектов в управлении оборонно-промышленным комплексом в России.

Такую задачу позволяют решить технологии интегрированной логистической поддержки (ИЛП) изделия, использование которой на отечественных предприятиях все более востребовано в связи с выходом высокотехнологичных изделий на внешние рынки с высокими требованиями, основанными на международных стандартах [3].

Основополагающим инструментом ИЛП является анализ логистической поддержки (АЛП), представляющий собой формализованную технологию всестороннего исследования как самого высокотехнологичного изделия, так и вариантов системы его эксплуатации и обслуживания. Информация об изделии, исходные данные и результаты АЛП хранятся в специализированной базе данных анализа логистической поддержки, структура которой утверждена согласно ГОСТ Р 57105-2016.

Значительный вклад в теорию и практику информационного сопровождения изделия в производстве и эксплуатации внесли исследования отечественных специалистов Е. В. Судова, А. И. Левина, А. В. Петрова, А. А. Вепрева [4, 5]. В иностранных источниках данные вопросы нашли отражение в трудах Ettore Settanni, Linda B. Newnes, Nils E. Thenent, Glenn Parry, Yee Mey Goh, Yisha Xiang, Zhicheng Zhu, David W. Coit, Qianmei Feng, R. Roy, R. Stark, K. Tracht, S. Takata, M. Mori, Sanjay Kumar Shukla, Satish Kumar, P. Selvaraj, V. Subba Rao [6–10].

Стоимость жизненного цикла (СЖЦ) является важнейшим показателем для потребителя изделий высокотехнологичных отраслей промышленности, характеризующим конкурентоспособность и поддерживаемость изделия. Взаимодействие изготовителя и потребителя высокотехнологичных изделий должно быть направлено на ее минимизацию.

Изготовление нового изделия высокотехнологичных отраслей промышленности, его изменение или усовершенствование должно быть оценено с точки зрения СЖЦ для определения экономической целесообразности и обоснования необходимых затрат. Сравнение СЖЦ при существующих и при измененных условиях на этапе эксплуатации позволяет оценить срок окупаемости затрат за счет снижения стоимости и отклонить те изменения, которые не дают значительных преимуществ еще на этапе проектирования.

СЖЦ изделия включает в себя затраты на этапе эксплуатации на:

- персонал;
- расходные материалы;
- запасные части;
- наземное оборудование, в том числе:
 - специальное;
 - стандартное;
- инфраструктуру.

Следует учитывать регламентные работы, замены агрегатов (плановые и по выработке ресурса), устранение неисправностей (процедуры обслуживания). Исходными данными для расчета являются сведения обо всех видах ресурсов, необходимых для выполнения задач обслуживания [4].

Для получения СЖЦ целесообразно использовать средства имитационного моделирования, позволяющие воспроизвести поведение сложной системы взаимодействующих элементов. Проведение имитационных экспериментов дает возможность оценить влияние изменения различных параметров системы и принять правильное решение. Моделирование позволяет наблюдать

за поведением реальной системы во времени с необходимым уровнем детальности.

Разработанная имитационная модель, указанная в [11], позволяет определить СЖЦ изделий высокотехнологичных отраслей промышленности на примере воздушного судна (ВС).

Для верификации компьютерной модели предложено использовать метод проверки корректности результатов на "крайние" значения [12].

Первоначально задают нулевые значения входных параметров модели и анализируют результаты. Если модель построена верно, по окончании процесса моделирования должны быть получены нулевые выходные данные. Если результаты моделирования отличны от нуля, то модель подлежит проверке и уточнению.

Итак, определим всем входным параметрам модели нулевые значения. Период эксплуатации $t_{эк}$ установим в 20 лет. В результате проведения эксперимента получим, что все выходные данные, кроме параметра "общее время эксплуатации" ($T_{об.эк}$), равны нулю. Параметр $T_{об.эк}$ является итерационно-накопительным и при $t_{эк} > 0$ всегда больше нуля. В нашем случае $t_{эк} = 20$, по

окончании моделирования $T_{об.эк} = 20$, что соответствует действительности. На рис. 1 показан результат эксперимента при нулевых входных параметрах.

Затем входным параметрам установим значения, которых не может быть в реальной системе.

Исходные данные для проведения эксперимента представлены в табл. 1.

Установим параметр модели "интенсивность отказов" ($I_{от}$) равным нулю на протяжении всего периода эксплуатации, чего не может быть в реальной системе. Результаты данного эксперимента представлены на рис. 2. При проведении моделирования наблюдаем, что выходные данные, зависящие от $I_{от}$ (количество отказов $k_{от}$, время непланового ТО $t_{неп.ТО}$, общее время ожидания поставок запчастей $t_{об.зап}$, затраты на неплановое ТО $Cost_{неп.ТО}$), равны нулю. Следовательно, модель корректно реагирует на входные данные, значений которых не может быть в реальной системе.

На последнем этапе проверки результатов на "крайние" значения проведем моделирование с корректными входными данными.

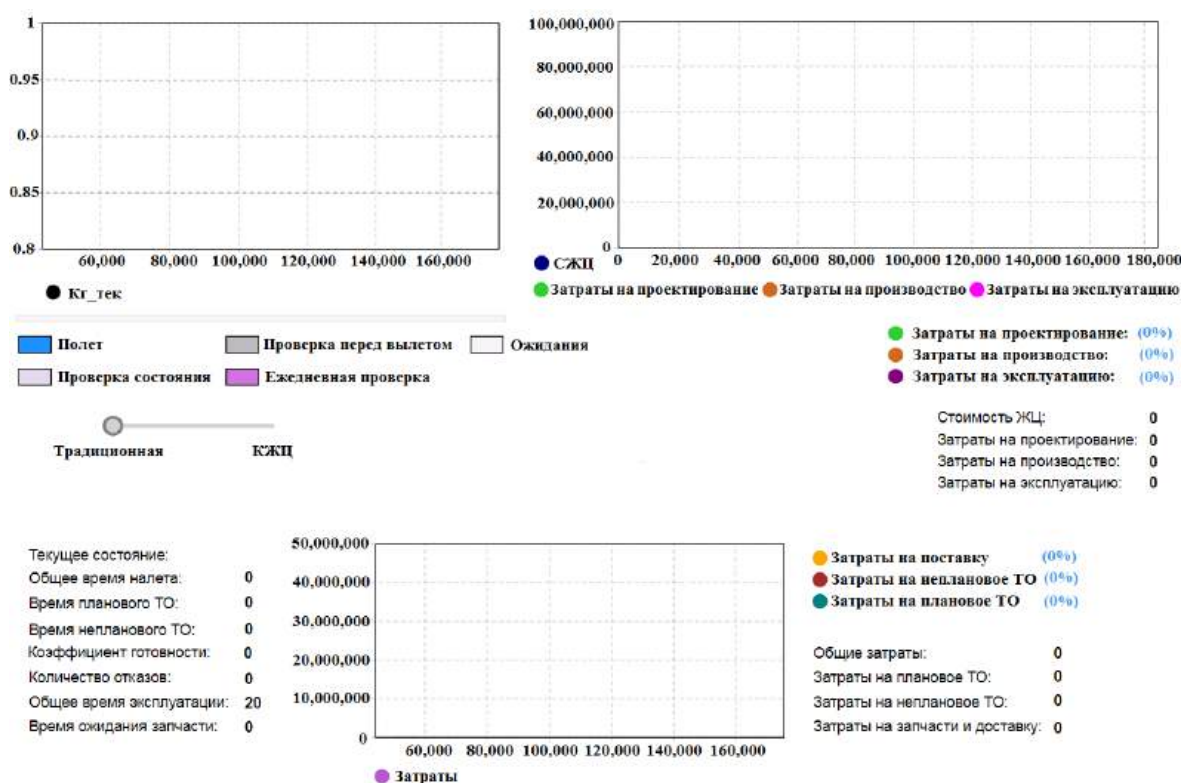


Рис. 1. Результат моделирования при нулевых входных параметрах

Таблица 1

Исходные данные для проведения эксперимента

Параметр	Обозначение	Ед. измерения	Значение
Период эксплуатации	$t_{эк}$	г.	20
Период пополнения склада	$t_{склад}$	ч	1400
Среднее время ожидания поставки запчасти	$t_{ср.зап}$	день	[2; 3; 5]
Интенсивность отказов	$t_{от}$	шт./г.	0



Рис. 2. Результат моделирования стоимости жизненного цикла ВС с исходными данными из табл. 1

При прочих равных условиях последовательно введем различные варианты входных данных (табл. 2).

По окончании процесса моделирования получаем выходные данные, пример которых представлен на рис. 3.

Таблица 2

Исходные данные для проведения эксперимента

Параметр	Обозначение	Ед. измерения	Значение
Период эксплуатации	$t_{эк}$	г.	20
Период пополнения склада	$t_{склад}$	ч	1400
Среднее время ожидания поставки запчасти	$t_{ср.зап}$	день	[2; 3; 5]
Интенсивность отказов (1)	$I_{от}$	шт./г.	1
Интенсивность отказов (2)	$I_{от}$	шт./г.	[2; 5]
Интенсивность отказов (3)	$I_{от}$	шт./г.	[6; 12]



Рис. 3. Результат моделирования при $I_{от} = [2; 5]/г.$

В разработанной модели входной параметр $I_{от}$ формируется с периодичностью 1 г. и принимает значения в заданном диапазоне. Визуально оценить изменение интенсивности отказов на протяжении жизненного цикла ВС можно по рис. 4.

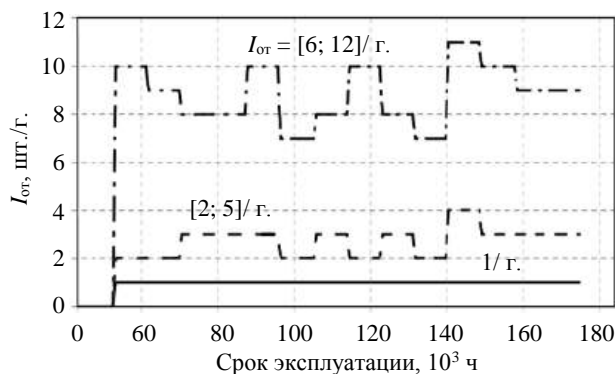


Рис. 4. Значения $I_{от}$ на протяжении жизненного цикла

Видно, что значения параметра $I_{от}$ находятся в заданном интервале и равны нулю на этапах проектирования и производства.

Параметр $k_{от}$ является накопительным и показывает общее количество отказов за весь жизненный цикл. Его зависимость от интенсивности отказов показана на рис. 5.

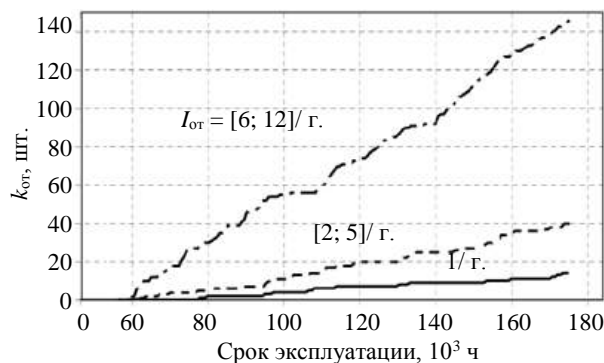


Рис. 5. Зависимость параметра отказов от интенсивности отказов

Увеличение $I_{от}$ приводит к увеличению общей стоимости жизненного цикла ВС и затрат на стадии эксплуатации $Cost_{эк}$ (рис. 6).

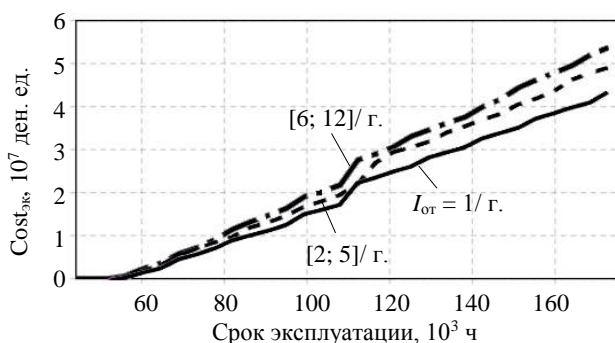


Рис. 6. Зависимость $Cost_{эк}$ от интенсивности отказов

Путем анализа результатов моделирования выявлено, что увеличение диапазона значений входного параметра $I_{от}$ влечет за собой изменение выходных данных: увеличение общего количества отказов, времени непланового ТО, общего времени ожидания поставок запчастей, затрат на неплановое ТО и стоимости жизненного цикла ВС, а также приводит к уменьшению коэффициента готовности.

Выходные данные, полученные в ходе моделирования сопоставимы с результатами исследований Е. В. Судова, А. В. Петрова, Н. В. Полищук [4, 13].

Литература

1. Кузнецова (Кондусова) В. Б., Кондусов Д. В., Сергеев А. И. Принципиальные отличия контракта жизненного цикла изделия от существующей системы обеспечения вооружения и военной техники // Наука и бизнес: пути развития. № 11(77). С. 16—19.
2. Федорович В. А., Муравник В. Б., Бочкарев О. И. США: военная экономика (организация и управление) / под общ. ред. Золоторева П. С., Роговского Е. А. — М.: Междунар. отношения, 2013. — 616 с.
3. Кузнецова (Кондусова) В. Б., Сердюк А. И., Сергеев А. И. Модель контракции с включением фактора риск-разделенного партнерства как способа достижения установленных показателей качества при интегрированной логистической поддержке изделий // СТИН. 2018. № 2. С. 2—4.
4. Судов Е. В., Левин А. И., Петров А. В., Чубарова Е. В. Технологии интегрированной логистической поддержки изделий машиностроения. — М.: ИнформБюро, 2006. — 232 с.
5. Венрев А. А., Григорьев С. И., Кулаков В. Г., Заматиков А. М. Интегрированная логистическая поддержка. Применение дисциплин ИЛП в Корпорации "Иркут": Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение / гл. ред. Братухин А. Г. — М.: ОАО "НИИ АСК", 2008. С. 536—537.
6. Settanni E., Newnes L. B., Thenent N. E., Parry G., Yee Mey Goh. A through-life costing methodology for use in product-service-systems // Int. J. Production Economics. 2014. № 153. P. 161—177.
7. Mas F., Arista R., Oliva M., Hiebert B., Gilkerson I., Rios J. A review of PLM impact on US and EU Aerospace Industry // Procedia Engineering. 2015. № 2. P. 1053—1060.
8. Sanjay Kumar Shukla, Satish Kumar, Selvaraj P., Subba Rao V. Integrated Logistics System for Indigenous Fighter Aircraft Development Program // Procedia Engineering. 2014. № 97. P. 2238—2247.
9. Roy R., Stark R., Tracht K., Takata S., Mori M. Continuous maintenance and the future — Foundations and technological challenges // CIRP Annals — Manufacturing Technology. 2016. № 65. P. 667—688.
10. Xiang Y., Zhicheng Zhu, Coit D. W., Qianmei Feng. Condition-based maintenance under performance-based contracting // Computers & Industrial Engineering. 2017. № 111. P. 391—402.
11. Кондусова В. Б., Кондусов Д. В. Разработка имитационной модели жизненного цикла сложных изделий машиностроения с длительным сроком экс-

плуатации на основе применения контракта жизненного цикла // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2019. № 2. С. 30—34.

12. Зиновьев В. В., Стародубцев А. Н., Николаев П. И., Кузнецов И. С. Реализация модуля системы имитационного моделирования технологий проведения горных выработок для сравнения схем отработки заходов при проходке штреков: сб. тр. Девятой все-

росс. науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности "Имитационное моделирование. Теория и практика" (ИММОД). 2019. С. 428—433.

13. Полищук Н. В. Интегрированная логистическая поддержка и стоимость жизненного цикла воздушного судна // Транспортное дело России. 2017. № 4. С. 112—116.

VERIFICATION OF A COMPUTER SIMULATION MODEL OF THE LIFE CYCLE COST OF PRODUCTS OF HIGH-TECH INDUSTRIES

V. B. Kondusova, D. V. Kondusov

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Orenburg State University",
Orenburg, Russia

The article discusses the process of verification of a simulation model of the life cycle cost of products of high-tech industries by checking the correctness of the results for "extreme" values. Verification was carried out for the simulation model built by the authors using the example of aircraft operation.

Keywords: product life cycle, operation, simulation model, contracting system, high-tech products.

Кондусова Валентина Борисовна, доцент.

E-mail: valyosha@list.ru

Кондусов Дмитрий Викторович, старший преподаватель.

E-mail: kdimka@list.ru

Статья поступила в редакцию 22 апреля 2021 г.

УДК 621.314

DOI: 10.52190/2073-2597_2021_3_32

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ СРАВНЕНИЯ СИНХРОНИЗИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ С СИГНАЛАМИ МОДУЛЯЦИИ В ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫХ МОДУЛЯТОРАХ

С. В. Федоров, канд. техн. наук

Кумертауский филиал ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»,
Республика Башкортостан, г. Кумертау, Россия

Дана классификация алгоритмов формирования управляющих импульсов на основе сравнения синхронизирующих сигналов с сигналами модуляции в широтно-импульсных модуляторах. Подробно описаны виды синхронизирующих и модулирующих сигналов. Представлены обобщенная структурная схема широтно-импульсного преобразователя, а также функциональная схема широтно-импульсного модулятора. Сформулирована задача необходимости исследования влияния алгоритмов широтно-импульсной модуляции на качество выходного напряжения и управление передаточной характеристикой широтно-импульсного преобразователя.

Ключевые слова: широтно-импульсный модулятор, модулирующий сигнал, сигнал синхронизации.

В силовой преобразовательной технике используют различные виды и модификации импульсной модуляции. В большинстве случаев в статических преобразователях различного функционального назначения применяют широтно-импульсную модуляцию (ШИМ).

Алгоритмы ШИМ, используемые для управления широтно-импульсными преобразователями (ШИП), достаточно многообразны и различаются по следующим основным признакам [1]:

- по способу организации модуляции различают следящие ШИМ с обратными связями и ШИМ с программным управлением без обратных связей;
- по форме модулирующего сигнала различают ступенчатую, синусоидальную, треугольную, трапецидальную, прямоугольную ШИМ;
- по полярности выходных импульсов на периоде модуляции различают двухполярную и однополярную ШИМ;
- по способу задания модулирующего сигнала различают векторную ШИМ в виде обобщенного вектора и ШИМ в виде функции времени;
- по способу изменения длительности выходных импульсов на периоде модуляции различают одностороннюю и двухстороннюю ШИМ.

Одним из наиболее важных критериев выбора алгоритма ШИМ является качество выходного напряжения, которое оценивается по спектральному составу или интегральной величине отклонения мгновенных значений выходного напряжения от желаемых средних значений за период модуляции. Для повышения качества выходного напряжения требуется уменьшение периода модуляции, которое ограничивается динамическими возможностями выбранного способа ШИМ, динамическими возможностями силовых полупроводниковых ключей и ростом дополнительных коммутационных потерь [1].

В связи с этим создание эффективных алгоритмов ШИМ, позволяющих не только повы-

шать качество выходного напряжения, но и осуществлять управление передаточной характеристикой, является весьма актуальной задачей.

Известные способы ШИМ основаны на сравнении синхронизирующих сигналов с сигналом модуляции. Процесс сравнения производится на каждом тактовом интервале ШИМ при любой форме представления сигналов, цифровой или аналоговой, и формально сводится к решению уравнения

$$M(t) = f(t),$$

где $M(t)$ — модулирующая функция;

$f(t)$ — синхронизирующая функция.

Обобщенная структурная схема ШИП представлена на рис. 1.

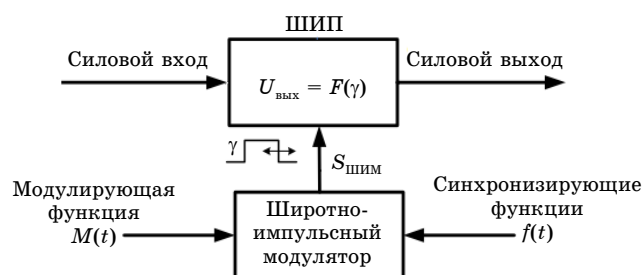


Рис. 1. Обобщенная структурная схема ШИП

Исследование алгоритмов формирования управляющих импульсов на основе сравнения синхронизирующих сигналов с сигналами модуляции

Для формирования переключающих импульсов для силовых ключей ШИП используют подход, который основан на сравнении модулирующего и синхронизирующего сигналов.

Алгоритм формирования выходного напряжения ШИП основан на сравнении синхронизирующего и модулирующего сигналов и представляет собой циклическое подключение

нагрузки последовательно к каждой из фаз источника питания. Для определения времени переключения используют модулирующую функцию $M(t)$, а также синхронизирующее напряжение $f(t)$, которое представляет собой периодически повторяющийся сигнал. Переключение осуществляют в момент пересечения функции $M(t)$ с напряжением $f(t)$.

В качестве синхронизирующего используют одно из следующих напряжений [2, 3].

Синусоидальное напряжение питающей сети. Синхронизирующие функции положительного типа $f_{11}, f_{12}, f_{13}, \dots, f_{1n}$ представляют собой синусоидальное многофазное напряжение питающей сети, где время переключения с одной фазы на другую определяется как точки пересечения ниспадающих участков этих функций с модулирующей функцией.

На рис. 2, а представлены синхронизирующие функции положительного типа. Ниспадающие участки их синусоид показаны непрерывными линиями. Данные функции определяются следующими зависимостями ($i = 1, 2, \dots$):

- при 3-фазном напряжении на входе

$$f_{1i} = F_m \sin \left\{ \omega_{\text{вход}} t - \left[(i-1) \frac{2\pi}{3} + \frac{4\pi}{3} \right] \right\};$$

- при 6-фазном напряжении на входе

$$f_{1i} = F_m \sin \left\{ \omega_{\text{вход}} t - \left[(i-1) \frac{2\pi}{6} + \frac{8\pi}{6} \right] \right\}.$$

Синхронизирующие функции отрицательного типа $f_{11}, f_{12}, f_{13}, \dots, f_{1n}$ представляют собой синусоидальное многофазное напряжение питающей сети, где время переключения с одной фазы на другую определяется как точки пересечения восходящих участков этих функций с модулирующей функцией.

На рис. 2, б представлены синхронизирующие функции отрицательного типа. Восходящие участки их синусоид показаны непрерывными линиями. Данные функции определяются следующими зависимостями ($i = 1, 2, \dots$):

- при 3-фазном напряжении на входе

$$f_{1i} = F_m \sin \left[\omega_{\text{вход}} t - (i-1) \frac{2\pi}{3} \right];$$

- при 6-фазном напряжении на входе

$$f_{1i} = F_m \sin \left[\omega_{\text{вход}} t - (i-1) \frac{2\pi}{6} \right].$$

В общем случае выражение для синхронизирующей функции f_{1i} может быть записано в виде

$$f_{1i} = F_m \sin \left\{ \omega_{\text{вход}} t - \left[(i-1) \frac{2\pi}{n} + \frac{4\pi}{3} q \right] \right\},$$

где n — число фаз напряжения питающей сети ($n = 3, 6$);

q — параметр, определяющий тип синхронизирующей функции ($q = 1$ для синхронизирующих функций положительного типа; $q = 0$ для синхронизирующих функций отрицательного типа).

Синхронизирующие функции поочередно-составного типа формируются из чередующихся участков положительного и отрицательного типов [2, 4].

Синхронизирующие функции совместно-составного типа сформируются на всем их протяжении из кривых обоих типов [2, 4].

Линейное напряжение. Линейное напряжение представляет собой наклонные параллельные линии $f_{11}, f_{12}, f_{13}, \dots, f_{1n}$, наложенные на модулирующую функцию. Данные линии являются синхронизирующими функциями положительного типа (рис. 3, а), определяемыми следующими зависимостями ($i = 1, 2, \dots$) [2, 4]:

- при 3-фазном напряжении на входе

$$f_{1i} = i \frac{2\pi}{3} - \omega_{\text{вход}} t;$$

- при 6-фазном напряжении на входе

$$f_{1i} = i \frac{2\pi}{6} - \omega_{\text{вход}} t;$$

- при 12-фазном напряжении на входе

$$f_{1i} = i \frac{2\pi}{12} - \omega_{\text{вход}} t.$$

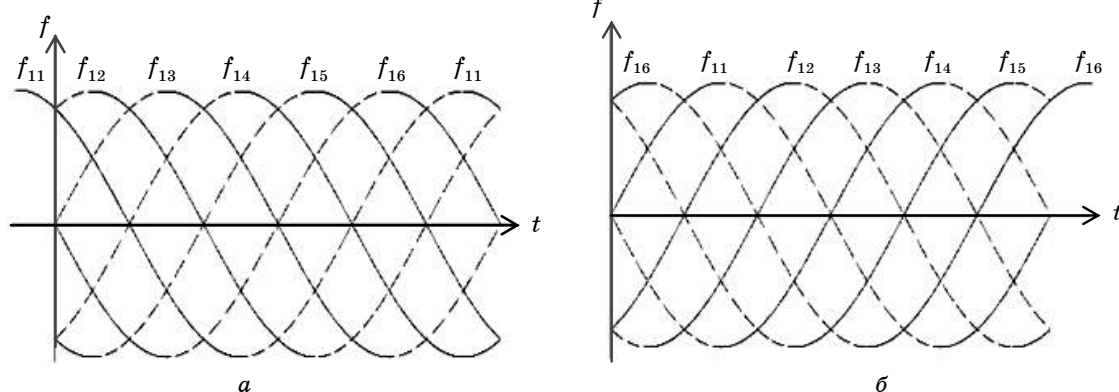


Рис. 2. Синусоидальные синхронизирующие функции положительного (а) и отрицательного (б) типов

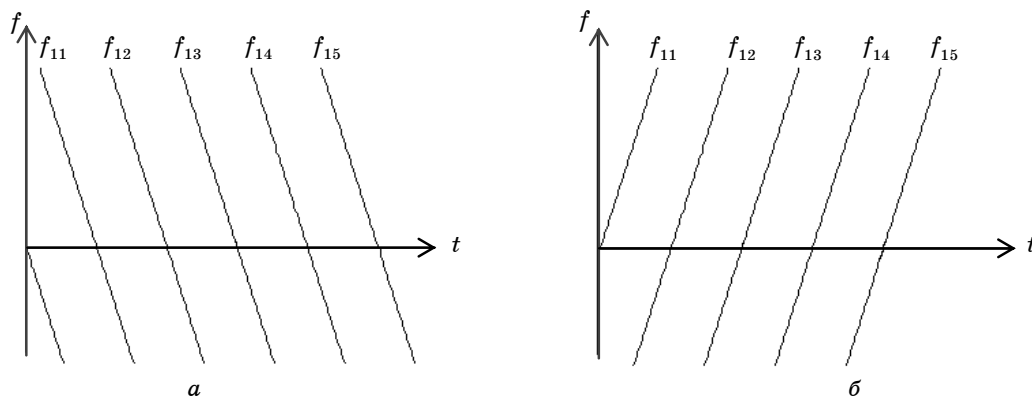


Рис. 3. Линейные синхронизирующие функции положительного (а) и отрицательного (б) типов

Синхронизирующие функции отрицательного типа (рис. 3, б) определяются следующими зависимостями ($i = 1, 2, \dots$) [2, 4]:

- при 3-фазном напряжении на входе

$$f_{1i} = -i \frac{2\pi}{3} + \omega_{\text{вход}} t;$$

- при 6-фазном напряжении на входе

$$f_{1i} = -i \frac{2\pi}{6} + \omega_{\text{вход}} t;$$

- при 12-фазном напряжении на входе

$$f_{1i} = -i \frac{2\pi}{12} + \omega_{\text{вход}} t.$$

Синхронизирующие функции поочередно-составного типа формируются из чередующихся участков положительного и отрицательного типов.

Синхронизирующие функции совместно-составного типа, формируются на всем их протяжении из кривых обоих типов.

Данные функции f_{1i} необходимы для определения точек пересечения их с модулирующей функцией $M(t)$. Значения времени их пересечения являются временем переключения с одной фазы входного напряжения на другую, формируя, таким образом, выходное напряжение $U_{\text{вых}}(t)$.

В качестве модулирующих функций используются следующие.

- Треугольная модулирующая функция [2, 4] определяется из уравнения

$$M(t) = \arcsin[r \sin(\omega_{\text{вых}} t)]$$

при $r = 1$, т. е.

$$M(t) = \arcsin[\sin(\omega_{\text{вых}} t)] = \omega_{\text{вых}} t.$$

Эта функция определена на периоде 2π следующим образом:

$$M(t) = \begin{cases} \omega_{\text{вых}} t, & -\pi/2 \leq \omega_{\text{вых}} t < \pi/2; \\ -\omega_{\text{вых}} t + \pi, & \pi/2 \leq \omega_{\text{вых}} t < 3\pi/2. \end{cases}$$

График треугольной модулирующей функции показан на рис. 4, а.

- Линейная модулирующая функция [2, 4] определяется из уравнения

$$M(t) = \omega_{\text{вых}} t.$$

Эта функция определена на периоде 2π следующим образом:

$$M(t) = \omega_{\text{вых}} t, \quad 0 \leq \omega_{\text{вых}} t < 2\pi.$$

График линейной модулирующей функции показан на рис. 4, б.

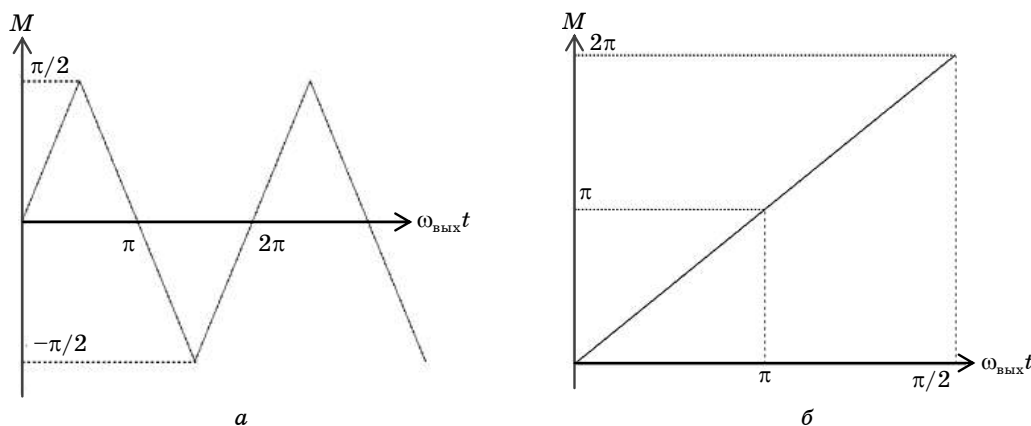


Рис. 4. Треугольная (а) и линейная (б) модулирующие функции

- Прямоугольная модулирующая функция [2, 3] определяется из уравнения

$$M(t) = M = \text{const.},$$

Эта функция определена на периоде 2π следующим образом:

$$M(t) = \begin{cases} M, & 0 \leq \omega_{\text{ВЫХ}} t < \pi; \\ -M, & \pi \leq \omega_{\text{ВЫХ}} t < 2\pi. \end{cases}$$

График прямоугольной модулирующей функции показан на рис. 5, а.

- Трапецидальная модулирующая функция [2, 3] определена на периоде 2π следующим образом:

$$M(t) = \begin{cases} \omega_{\text{ВЫХ}} t, & 0 \leq \omega_{\text{ВЫХ}} t < \pi/3; \\ \pi/3, & \pi/3 \leq \omega_{\text{ВЫХ}} t < 2\pi/3; \\ \pi - \omega_{\text{ВЫХ}} t, & 2\pi/3 \leq \omega_{\text{ВЫХ}} t < 4\pi/3; \\ -\pi/3, & 4\pi/3 \leq \omega_{\text{ВЫХ}} t < 5\pi/3; \\ -2\pi + \omega_{\text{ВЫХ}} t, & 5\pi/3 \leq \omega_{\text{ВЫХ}} t < 2\pi. \end{cases}$$

График трапецидальной моделирующей функции показан на рис. 5, б.

- Синусоидальная модулирующая функция [2, 4] определяется из уравнения

$$M(t) = \arcsin[r \sin(\omega_{\text{ВЫХ}} t)]$$

при $r = 0,5$, т. е.

$$M(t) = \arcsin[0,5 \sin(\omega_{\text{ВЫХ}} t)].$$

Эта функция определена на периоде 2π . График синусоидальной модулирующей функции показан на рис. 6, а.

- Прямоугольно-ступенчатая модулирующая функция [2, 3] представляет собой ступенчатое напряжение. Существует два варианта формирования ступенчатого напряжения: при равных приращениях напряжения на каждой ступени изменяются их длительности либо при равной длительности ступеней изменяются приращения напряжения. Второй вариант реализуется проще. Длительность ступени для второго варианта

$$\tau = \frac{\pi}{2n-1},$$

где n — число ступеней в четверти периода низкой частоты.

Каждая ступень представлена постоянным уровнем напряжения: M_1, M_2, \dots, M_n . График прямоугольно-ступенчатой функции показан на рис. 6, б.

Время переключения определяется точками пересечения модулирующей функции с синхронизирующими функциями

$$M(t) = f_{1i}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (1)$$

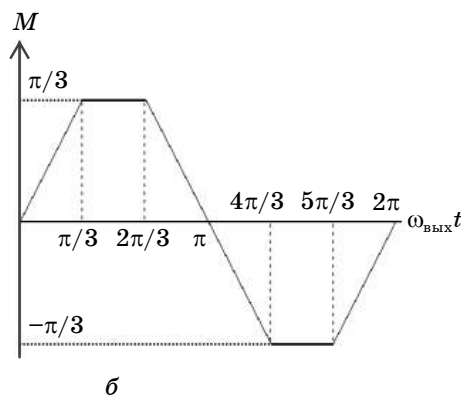
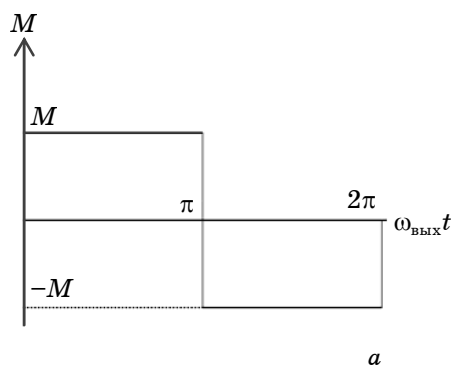


Рис. 5. Прямоугольная (а) и трапецидальная (б) модулирующие функции

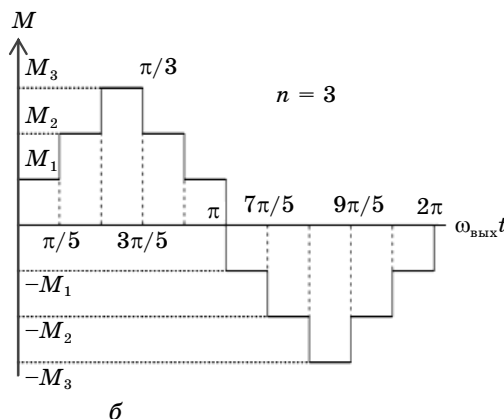
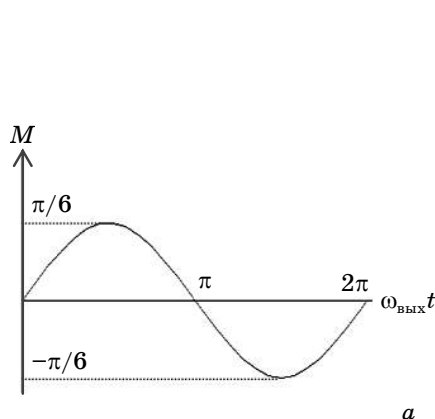


Рис. 6. Синусоидальная (а) и прямоугольно-ступенчатая (б) модулирующие функции

Формирование управляющих импульсов на основе сравнения синхронизирующих сигналов с сигналами модуляции в широтно-импульсных модуляторах

Технически условие (1) реализуется с помощью широтно-импульсного модулятора (рис. 7).

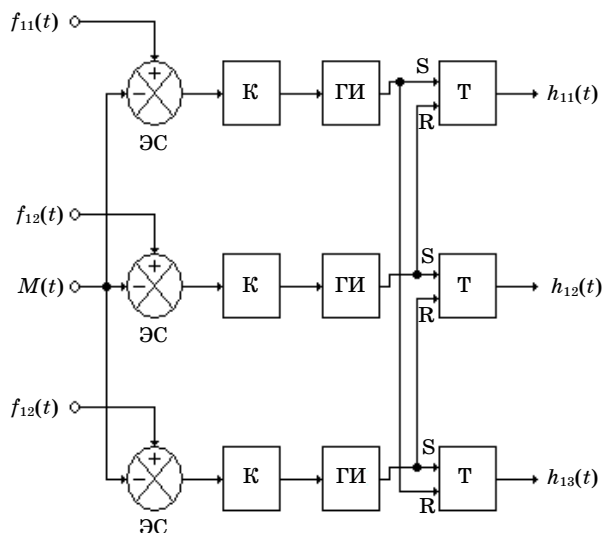


Рис. 7. Схема трехканального широтно-импульсного модулятора

Данное устройство является трехканальным с тремя управляющими импульсами на выходе (h_{11} , h_{12} , h_{13}) [2, 4].

При работе данной схемы в элементе сравнения (ЭС) какого-либо канала определяется разность между синхронизирующим сигналом $f_{11}(t)$ и модулирующим сигналом $M(t)$. Полученный положительный или отрицательный сигнал поступает на вход компаратора К. Заданным значением сигнала компаратора выбирается нулевое напряжение. Таким образом, если на вход компаратора поступает положительный сигнал с элемента сравнения, то на выходе устанавливается значение 1. Если разность отрицательна, то на выходе устанавливается значение 0.

Далее сигнал 1 с выхода какого-либо компаратора поступает в генератор импульсов ГИ. Задачей генератора импульсов является создание импульса для последующей подачи его на триггер Т. Триггер Т выдает сигнал 1, который является одним из управляющих импульсов. Управляющий импульс с предыдущего триггера сбрасывается до 0 импульсом, поступающим из следующего канала.

На рис. 8 показан алгоритм формирования управляющих импульсов на основе сравнения синхронизирующих сигналов с модулирующими сигналами в ШИМ.

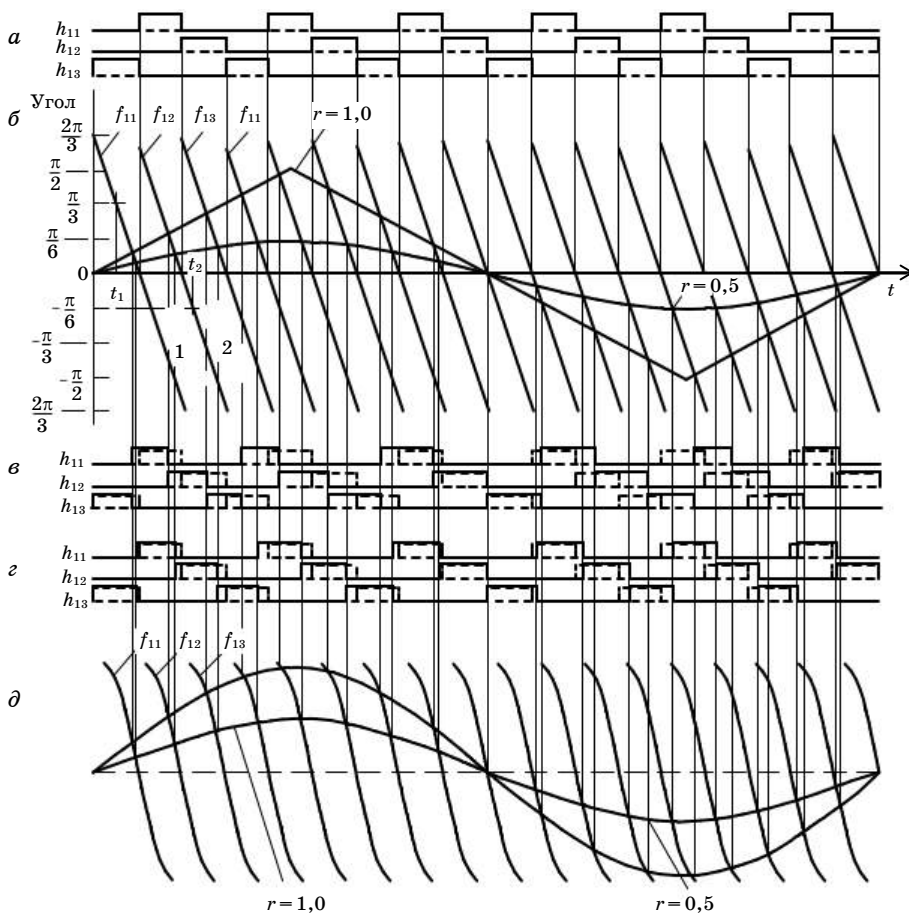


Рис. 8. Алгоритм формирования управляющих импульсов на основе сравнения синхронизирующих сигналов с модулирующими сигналами в ШИМ:

а — исходные импульсы управления; б — модулирующие функции при $r = 0,5$ и 1 и линейные синхронизирующие функции; в — управляющие импульсы для $r = 1$ (исходные показаны пунктиром); г — управляющие импульсы для $r = 0,5$ (исходные показаны пунктиром); д — синусоидальная задающая кривая при $r = 0,5$ и 1 и косинусные синхронизирующие кривые;

1 — $f(t) = \frac{2\pi}{3} - \omega_{\text{вход}} t$;

2 — $f(t) = \frac{4\pi}{3} - \omega_{\text{вход}} t$

Заключение

Таким образом, задачей выбора алгоритма широтно-импульсной модуляции для ШИП является определение либо разработка оптимального алгоритма ШИМ, обеспечивающего наилучшее качество выходного напряжения.

При решении данной задачи в качестве ШИП был рассмотрен преобразователь частоты с однотактной схемой подключения нагрузки к каждой фазе (рис. 9) и двухпроводными ключами S_{Aa} , S_{Ab} , S_{Ac} , S_{Ba} , S_{Bb} , S_{Bc} , S_{Ca} , S_{Cb} , S_{Cc} .

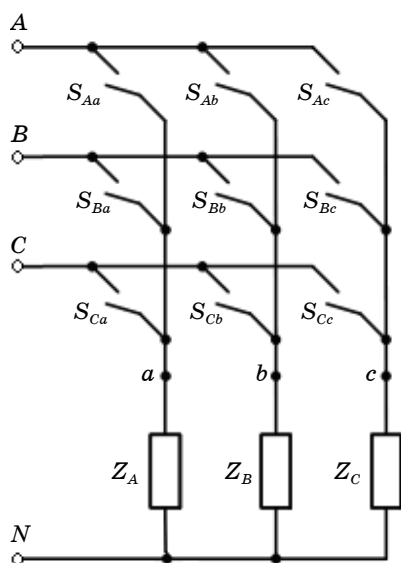


Рис. 9. Схема преобразователя частоты

Проведен анализ спектрального состава выходного напряжения преобразователя при различных видах модулирующей и синхронизирующей функций. Целью данного исследования являлось определение возможностей уменьшения коэффициента искажения синусоидальности выходного напряжения с помощью существующих алгоритмов модуляции и системы управления, реализующей данные алгоритмы на основе разработанных моделей.

Результатом анализа спектрального состава выходного напряжения стал совмещенный график коэффициентов гармоник (рис. 10) [5–9].

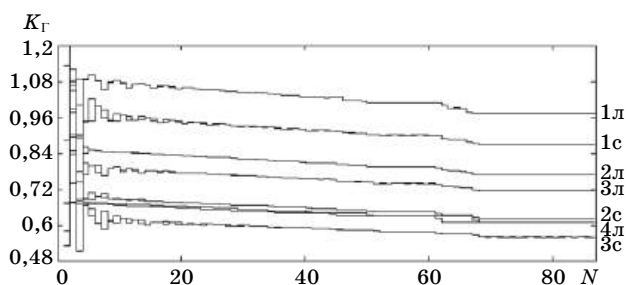


Рис. 10. Совмещенные графики коэффициентов гармоник выходного напряжения при линейной и синусоидальной синхронизации

На рис. 10 совмещены графики коэффициентов гармоник K_G от номера частоты выходного напряжения N при:

1с — треугольной модуляции для синусоидальной положительной и отрицательной синхронизации;

2с — синусоидальной модуляции для синусоидальной положительной и отрицательной синхронизации;

3с — трапецеидальной модуляции для синусоидальной положительной и отрицательной синхронизации;

1л — треугольной модуляции для линейной положительной и отрицательной синхронизации;

2л — синусоидальной модуляции для линейной положительной и отрицательной синхронизации;

3л — трапецеидальной модуляции для линейной положительной и отрицательной синхронизации;

4л — линейной модуляции для линейной положительной и отрицательной синхронизации.

Анализ данных рис. 10 показывает, что изменение алгоритма модуляции системы управления влияет на качество выходного напряжения преобразователя частоты. Наименьшее значение коэффициента гармоник получается при трапецеидальной модуляции для синусоидальной положительной и отрицательной синхронизации (зависимость 3с). Значение коэффициента гармоник K_G при этом составляет не менее 53,9 % (для диапазона частот $50 \text{ Гц} \leq \nu < 1,5 \text{ Гц}$). Однако для схемы, представленной на рис. 9, данные алгоритмы не позволяют получить значение коэффициента гармоник в соответствии с ГОСТ 32144-2013.

Литература

1. Кувшинов А. А. Разработка и исследование методов коммутационно-логического управления передаточными характеристиками широтно-импульсных преобразователей: дисс. ... канд. техн. наук — Тольятти, 2009. — 202 с.
2. Федоров С. В. Устройство формирования переключаяющих функций управляющего блока матричного преобразователя частоты для системы частотного управления электроприводом: дисс. ... канд. техн. наук — Уфа, 2015. — 171 с.
3. Жемеров Г. Г. Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью. — М.: Энергия, 1977. — 280 с.
4. Джуджи Л., Пели Б. Силовые полупроводниковые преобразователи частоты: теория, характеристики, применение / Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 400 с.
5. Федоров С. В., Бондарев А. В., Яппаров Ф. К. Расчет коэффициента гармоник выходного напряжения непосредственного преобразователя частоты с трехфазным входным напряжением при треугольной и синусоидальной модуляции. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013615359 от 05.06.2013.

6. Федоров С. В., Бондарев А. В., Яппаров Ф. К. Расчет коэффициента гармоник выходного напряжения непосредственного преобразователя частоты с трехфазным входным напряжением при прямоугольной модуляции. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013615360 от 05.06.2013.

7. Федоров С. В., Бондарев А. В., Яппаров Ф. К. Анализ гармонического состава выходного напряжения непосредственных преобразователей частоты // Практическая силовая электроника. 2013. № 52 (4).

8. Федоров С. В. Спектральный анализ выходного напряжения, формируемого системой управления матричного преобразователя частоты, на основе метода прямого преобразования при линейной синхронизации // Приволжский научный вестник. 2014. № 10 (38). С. 36—44.

9. Федоров С. В., Рогинская Л. Э., Бондарев А. В. Спектральный анализ выходного напряжения, формируемого системой управления матричного преобразователя частоты, на основе метода прямого преобразования при синусоидальной синхронизации // Приволжский научный вестник. 2014. № 10 (38). С. 45—52.

INVESTIGATION OF ALGORITHMS FOR GENERATING CONTROL PULSES BASED ON THE COMPARISON OF SYNCHRONIZATION SIGNALS WITH MODULATION SIGNALS IN PULSE-WIDTH MODULATORS

S. V. Fedorov

Kumertau branch of Orenburg State University, Republic of Bashkortostan, Kumertau, Russia,

In this article, the classification of algorithms for generating control pulses is given based on the comparison of synchronization signals with modulation signals in pulse-width modulators. The types of synchronizing and modulating signals are described in detail. A generalized block diagram of a pulse-width converter is presented, as well as a functional diagram of a pulse-width modulator. The problem of the necessity of studying the influence of pulse-width modulation algorithms on the quality of the output voltage and the control of the transfer characteristic of the pulse-width converter is formulated.

Keywords: pulse-width modulator, modulating signal, synchronization signal.

Федоров Сергей Витальевич, доцент.
E-mail: proinfosystem@gmail.com

Статья поступила в редакцию 7 апреля 2021 г.

УДК 004.4

DOI: 10.52190/2073-2597_2021_3_39

РАЗРАБОТКА ПРЕПРОЦЕССОРА РАСЧЕТНОГО КОДА СОКРАТ-БН/В2

С. В. Сумароков; А. Р. Арутюнян, канд. техн. наук; Т. А. Грошев; М. В. Гусев;
А. А. Кечков; Ф. О. Новосельский, канд. эконом. наук

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

Приведено описание разработанного препроцессора для интегрального тяжелоаварийного расчетного кода СОКРАТ-БН/В2. Представлены основные технические решения по реализации препроцессора, интерфейса и основных функциональных возможностей препроцессора.

Ключевые слова: расчетный код, препроцессор, расчетные обоснования, расчетная модель, СОКРАТ-БН/В2.

Большинство современных расчетных систем представляют собой сложные программные комплексы. Подготовка входных расчетных моделей для таких систем — это сложная, трудоемкая задача, требующая от пользователей знаний физики процессов, правил описания расчетных моделей, форматов и структур представления расчетных моделей. Препроцессоры расчетных систем предназначены для снижения трудоемкости и уровня подготовки расчетчиков в части формирования расчетных моделей по правилам и в форматах соответствующих расчетных модулей.

Использование интерактивных графических средств препроцессинга при подготовке расчетных моделей является установившейся нормой при проведении расчетов. Практически все производители коммерческих расчетных систем уделяют особое внимание интерфейсу взаимодействия пользователя с расчетной системой. Это наглядно прослеживается в решениях таких компаний, как Ansys, Siemens Digital Industries Software, Dassault Systèmes и т. д. Удобство работы, функциональность интерфейса в значительной мере влияют на востребованность расчетной системы у пользователей.

Разработчики расчетных кодов (РК) нового поколения, разрабатываемых в рамках проектного направления "Прорыв" Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом" [1], также уделяют этому аспекту большое внимание [2, 3]. В рамках набора кодов нового поколения разрабатывается интегральный тяжелоаварийный расчетный код СОКРАТ-БН/В2 [4]. РК СОКРАТ-БН/В2 предназначен для реалистического анализа поведения реакторной установки (РУ) на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем в режимах нарушений нормальной эксплуатации, проектных и запроектных аварий. Расчетный код прошел аттестацию и применяется при обосновании безопасности РУ в АО "ОКБМ Африкантов" [5, 6].

В состав РК СОКРАТ-БН/В2 входит несколько расчетных модулей, моделирующих различные процессы и системы реакторной установки и выход продуктов деления за ее пределы. Основной набор модулей, отвечающих за моделирование процессов в РУ, использует единый

входной файл с описанием параметров расчетов. До недавнего времени в связи с отсутствием графических средств препроцессинга пользователи вынуждены были формировать такой входной файл в текстовых редакторах на основании технической документации РК. В рамках развития РК СОКРАТ-БН/В2 разработан препроцессор, первой версии которого достаточно для подготовки всех входных данных, участвующих в моделировании контура РУ.

Реализация препроцессора

В первую версию препроцессора включена поддержка следующих расчетных модулей кода СОКРАТ-БН/В2:

- двухжидкостной теплогидравлический модуль SOFAR-TH для моделирования рабочих и аварийных режимов работы ядерных энергетических установок и других сложных теплогидравлических систем;
- тяжелоаварийный модуль MELT-BN для учета формоизменения элементов конструкций в аварийных режимах;
- термомеханический модуль ТВЭЛ-БН;
- модуль расчета накопления ПД в переходных и аварийных режимах БОНУС-БН;
- модуль нейтронной кинетики в точечном приближении QUASIK;
- модуль нейтронной кинетики в диффузионном приближении SYNTEZ;
- модуль TRANS_FP для решения задач моделирования процессов переноса, осаждения и повторного взвешивания радиоактивных продуктов деления и коррозии в двухфазном натриевом теплоносителе реакторов типа БН.

Расчетная модель строится на основе гидравлической нодализационной схемы, описывающей основные компоненты модели, такие, как каналы, квазиканалы, камеры, насосы, клапаны, и их взаимосвязи. Каждый расчетный модуль использует свой набор параметров, описывающий прохождение соответствующих процессов в рамках схемы.

Подготовка входных файлов выполняется по следующему сценарию:

- создание нового проекта или загрузка существующего;

- задание общих параметров расчета;
- выбор используемых расчетных модулей;
- подготовка гидравлической схемы;
- задание параметров элементов гидравлической схемы;
- задание параметров дополнительных модулей;
- сохранение входного файла.

Препроцессор реализован с использованием кроссплатформенных языка C++ и свободно распространяемой библиотеки Qt 5.15 [7]. При этом применены дополнительные свободно распространяемые компоненты.

Графический интерфейс препроцессора представлен на рис. 1. В его левой части приведено дерево модели, содержащее полный набор включенных в расчетную модель компонентов. В верхней части расположена панель инструментов, включающая часто используемые функции, настройки отображения, элементы гидравлической схемы. В правой части рисунка находится окно ввода параметров выбранного компонента. Центральную часть занимает интерактивное окно для формирования гидравлической схемы.

Интерфейс препроцессора реализован в соответствии с современными подходами проектирования CAD/CAE систем:

- представление может быть подстроено под пользователя;
- есть возможность сразу открывать несколько проектов;
- добавление элементов на гидравлическую схему выполняется через панель инструментов, контекстное меню или дерево модели;

- на схеме реализовано свободное расположение элементов, их перемещение, поворот и изменение размеров;

- функции повторить/отменить позволяют возвращать любое количество введенных действий как для схемы, так и для параметров элементов;

- реализованы функции копировать/вставить для элементов схемы, что облегчает тиражирование элементов с большим количеством повторяющихся параметров;

- реализованы функции контроля форматов и диапазонов вводимых значений, динамического формирования списков значений;

- настройки препроцессора позволяют настраивать цветовые схемы под предпочтения пользователей.

Отдельно стоит отметить некоторые особенности функционирования препроцессора и подходов при построении расчетных моделей.

Элементы гидравлической схемы реализованы в виде интерактивных блоков. Наиболее сложный из них — "Канал" — показан на рис. 2.

Для элемента "Канал" реализованы следующие возможности:

- разбиение канала на расчетные ячейки;
- привязка к ячейкам тепловых структур;
- расположение в канале гидравлических элементов, таких, как локальное сопротивление, диафрагма, клапан;
- наличие функциональных элементов канала, таких, как источники неконденсируемых газов, примесей, критическое истечение;
- выделение тепла в теплоноситель и теплообмен со стенкой.

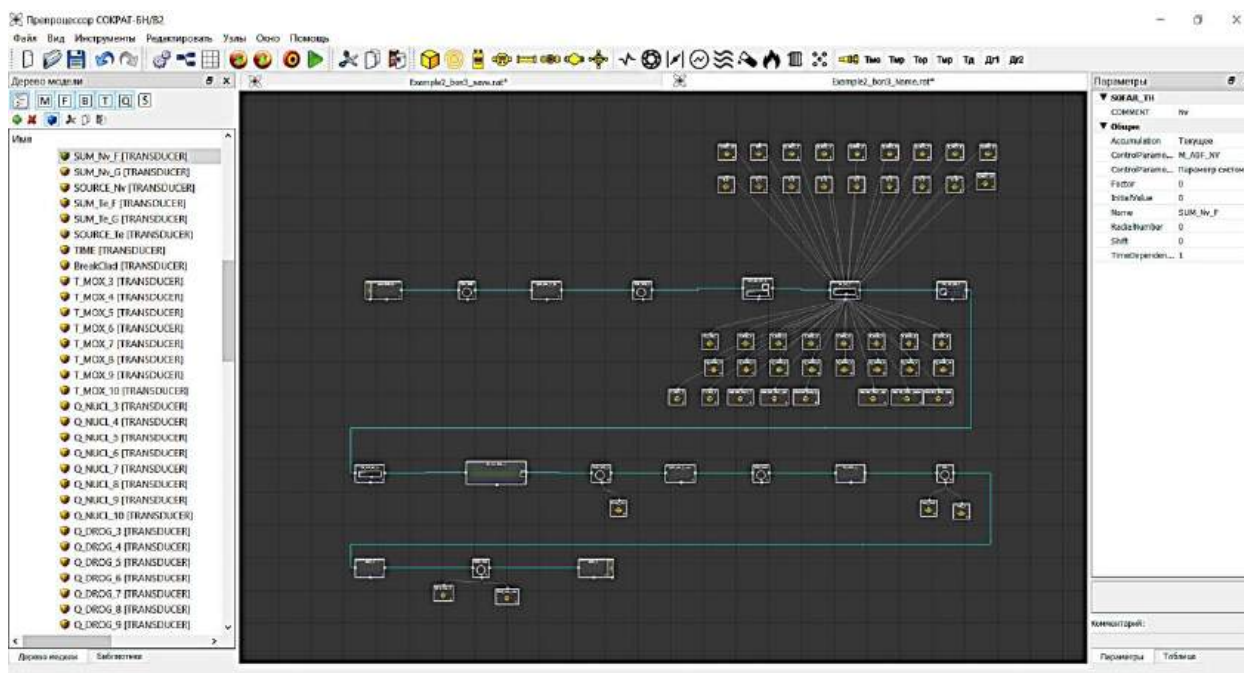


Рис. 1. Интерфейс препроцессора СОКРАТ-БН/В2

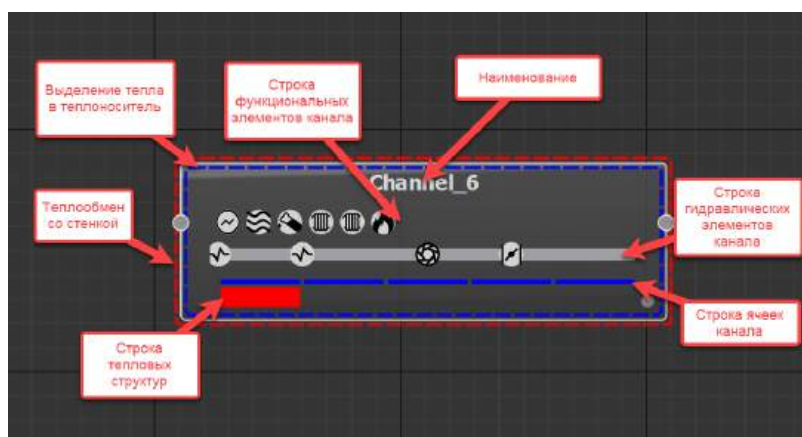


Рис. 2. Элемент схемы "Канал"

В канале с помощью мыши можно перемещать тепловые структуры по ячейкам, менять расположение гидравлических элементов канала.

Каждый элемент гидравлической сети имеет одну или две точки гидравлического подключения и одну точку логического подключения. Через гидравлические точки выполняется соединение входов и выходов элементов по теплоносителю, через логические точки — подключение датчиков.

В препроцессоре реализована возможность делать схемы с вложенной структурой. Для этого используется библиотека фрагментов. Практически любая схема может быть добавлена в библиотеку фрагментов. Для этого необходимо добавить в нее специальные точки подключения — внешние порты (рис. 3).

После этого схема появится в библиотеке фрагментов и далее может быть добавлена в другую схему в виде блока типа Fragment, как это показано на рис. 4. При сохранении входного файла препроцессор "развернет" вложенную структуру и включит вложенный фрагмент в общую расчетную схему. Такой подход призван повысить читаемость больших схем за счет отображения отдельных подсистем (например, парогенератора или коллектора) в виде фрагментов. Кроме того, применение фрагментов обеспечивает возможность повторного использования отлаженных фрагментов схем в различных расчетных моделях, тем самым снижая временные затраты и вероятность ошибок.

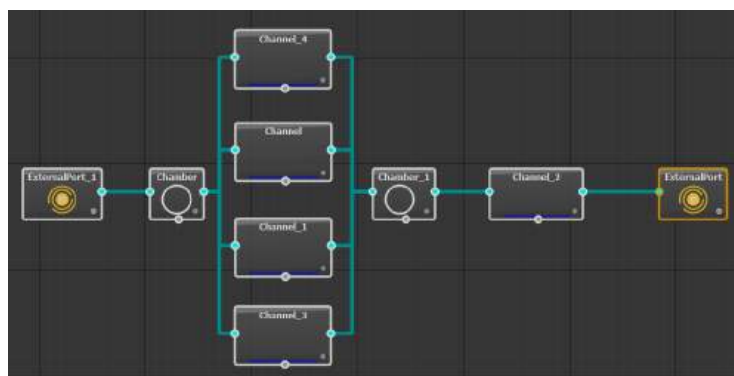


Рис. 3. Схема фрагмента

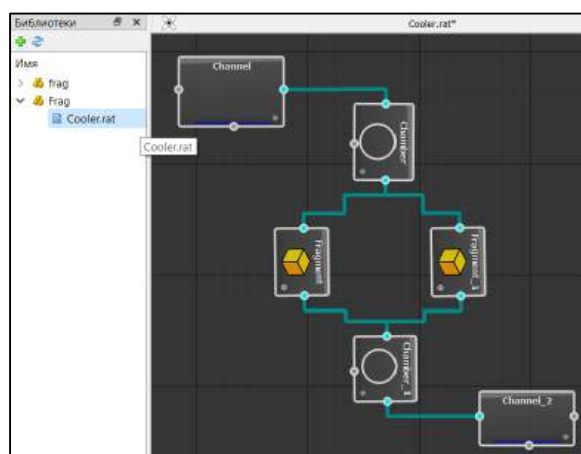


Рис. 4. Использование фрагментов в другой схеме

Расчетные модули, которые необходимо использовать в расчете, можно включать и отключать в расчетной модели на панели инструментов (рис. 5). Включение расчетного модуля открывает дополнительные разделы параметров в дереве и элементах модели. Отключение модуля не влечет за собой потерю введенных для него параметров. При последующем включении они будут восстановлены.

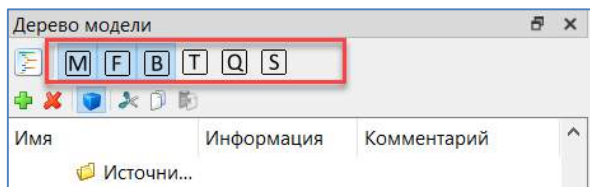


Рис. 5. Включение расчетных модулей в расчетную модель

Все параметры расчетной модели для отображения в препроцессоре, в том числе гидравлическая схема, хранятся в отдельном разделе входного файла кода СОКРАТ-БН/В2. При этом допускается изменение параметров элементов модели (без изменения схемы модели) через текстовые редакторы. При загрузке препроцессор выполнит диагностику и предложит обновить данные препроцессинга по измененным параметрам.

При сохранении входного файла СОКРАТ-БН/В2 препроцессор выполняет диагностику модели и выдает сообщения о недостающих и некорректно заданных параметрах. Кроме того, непосредственно из препроцессора можно запустить модель на расчет.

Отдельно стоит выделить структуру хранения и представление модельных параметров в препроцессоре. Весь перечень допустимых параметров модели, компонентов, элементов, расчетных модулей хранится в отдельном конфигурационном файле. На данный момент файл содержит около 17 000 строк. Несмотря на размер, его редактирование не вызывает сложностей, так как использовано структурированное представление в формате json. Файл позволяет добавлять/удалять параметры для элементов, редактировать их типы, связи и зависимости от других элементов, режимы отображения. Поскольку все формы ввода параметров в препроцессоре являются динамическими, использование конфигурационного файла позволяет сопровождать изменения в расчетном коде СОКРАТ-БН/В2 по большей части без дополнительного программирования.

Расчетная модель кода СОКРАТ-БН/В2 в зависимости от схемы может содержать очень большое количество параметров. При этом часть

параметров может быть использована только опытными расчетчиками для отдельных расчетных случаев. В большинстве расчетов для этих параметров используют значения по умолчанию. Для реализации данного подхода в препроцессоре предусмотрен расширенный режим, который обеспечивает отображение всего набора параметров. В обычном режиме представлены только основные параметры. Выбор и настройка отображения параметров для расширенного режима выполняются также через конфигурационный файл. Кроме того, такой подход позволяет настраивать препроцессор для использования в учебных целях, показывая только необходимый перечень параметров.

Заключение

В ходе проведенной работы реализована первая версия препроцессора РК СОКРАТ-БН/В2. В данную версию препроцессора входит поддержка всех расчетных модулей кода, отвечающих за расчет реакторной установки. Препроцессор обладает современным графическим интерфейсом, большими функциональными и интерактивными возможностями по созданию гидравлической схемы и редактированию всех параметров расчетной модели.

Планируется проведение опытной эксплуатации препроцессора, а также разработка второй версии, включающей поддержку всего перечня расчетных модулей кода СОКРАТ-БН/В2.

Литература

1. Большов Л. А., Мосунова Н. А., Стрижков В. Ф., Шмидт О. В. Расчетные коды нового поколения для новой технологической платформы ядерной энергетики // Атомная энергия. 2016. № 6. С. 303—312.
2. Алипченков В. М. и др. Интегральный код нового поколения ЕВКЛИД YI для обоснования безопасности АЭС с реакторными установками на быстрых нейтронах: новые модели, расширенные возможности: тез. докладов "Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики", 2018.
3. Чалый Р. В. Развитие интегрального кода СОКРАТ-БН для анализа безопасности АЭС с реакторами на быстрых нейтронах: тез. докладов "Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики", 2018.
4. Жилкин А. С., Осипов С. П., Саляев А. В., Семенов В. Н., Филиппов М. Ф., Цаун С. В. Численное моделирование поведения продуктов коррозии и газообразных продуктов деления с помощью кода СОКРАТ-БН // Изв. российской академии наук. Энергетика. 2014. № 3. С. 97—105.
5. <https://www.qt.io/product>

DEVELOPMENT OF THE PREPROCESSOR FOR THE CALCULATION CODE SOKRAT-BN/V2

S. V. Sumarokov, A. R. Arutyunyan, T. A. Groshev, M. V. Gusev, A. A. Kechkov,
F. O. Novoselsky

Institute for Problems of Safe Development of Nuclear Energy of the RAS, Moscow, Russia

The article describes the developed preprocessor for the SOCRAT-BN/V2 integrated heavy-accident computational code. It also provides a description of the main technical solutions for the implementation of the preprocessor, interface and basic functionality of the preprocessor.

Keywords: computational code, preprocessor, computational justifications, computational model, SOKRAT-BN/V2.

Сумароков Сергей Вячеславович, заведующий отделом.

E-mail: sumarokov@ibrae.ac.ru

Арутюнян Артем Рафаэлевич, научный сотрудник.

E-mail: artem@ibrae.ac.ru

Грошев Тимофей Андреевич, инженер.

E-mail: groshev.ta@ibrae.ac.ru

Гусев Михаил Владимирович, главный специалист.

E-mail: gusev@ibrae.ac.ru

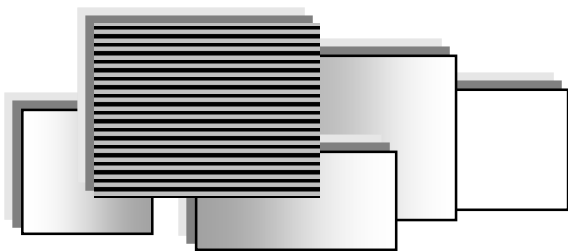
Кечков Алексей Александрович, ведущий инженер.

E-mail: kechkov@ibrae.ac.ru

Новосельский Филипп Олегович, заместитель начальника отдела.

E-mail: pn@ibrae.ac.ru

Статья поступила в редакцию 28 декабря 2020 г.



ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 65.011.56

DOI: 10.52190/2073-2597_2021_3_44

ПОЭТАПНОЕ ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТООИР ДЛЯ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

А. Ю. Кузнецов

ООО НПП «Нефтегазсофтсервис», Москва, Россия

И. С. Решетников, канд. техн. наук

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

Рассмотрены вопросы оптимизации плана внедрения и последовательности включения бизнес-процессов для информационных систем автоматизации процессов управления ТООИР в инфраструктурных предприятиях со сложившейся технической структурой. Показано, что в случае отсутствия единой технической политики и стратегии обслуживания модель построения системы на базе ранжирования бизнес-процессов по критичности и их итерационной автоматизации имеет преимущества перед другими подходами. Проведен анализ опыта применения данного подхода на примере газовой отрасли.

Ключевые слова: системы управления ТООИР, CMMS, ERP, ЕАМ-системы, управление ТООИР, ТООИР, внедрение информационных систем, НСИ, архитектура информационных систем.

Любое предприятие сталкивается с тем, что для повышения эффективности использования его активов и управления их техническим состоянием управление процессами технического обслуживания и ремонта (ТООИР) уже не может обходиться простыми электронными таблицами и необходимо внедрение специализированной информационной системы (ИС). На рынке представлено множество решений, которые предлагают приблизительно схожий функциональный объем и последовательность действий по внедрению [1, 2]. Несмотря на это, нередко в результате получают практически не используемые де-факто информационные системы или системы, не дающие реального операционного эффекта для деятельности предприятия и не обеспечивающие даже возврат инвестиций.

Аторами проведен критический анализ того, в чем состоит такой "классический" внедренческий подход, проанализировано, где могут возникать проблемы при его использовании, как обеспечить комплексность подхода к управлению ТООИР [3] и каким способом можно оптимизировать процесс внедрения информационной системы управления ТООИР.

Классический подход к внедрению систем управления ТООИР/ЕАМ

Рассмотрим усреднённый "стандартный" подход вендоров к внедрению систем ТООИР. Обычно он включает следующие стадии проекта (рис. 1):

- Разработка полной технологической нормативно-справочной информации (НСИ), необходимой для планирования ТООИР. В эту стадию входит составление полной библиотеки используемого оборудования с разузловкой до единиц оборудования (отдельных заменяемых/ремонтируемых технологических узлов либо крупных деталей) с ведением регламентов обслуживания и наработки оборудования.

- Разработка системы автоматизации формирования графика ремонта оборудования для генерации в автоматическом режиме планов ТООИР (как краткосрочных, так и долгосрочных). На данном этапе, как правило, необходима также настройка интеграции с производственными системами для двустороннего учёта показателей технического состояния, графика загрузки оборудования и его вывода в ремонт.

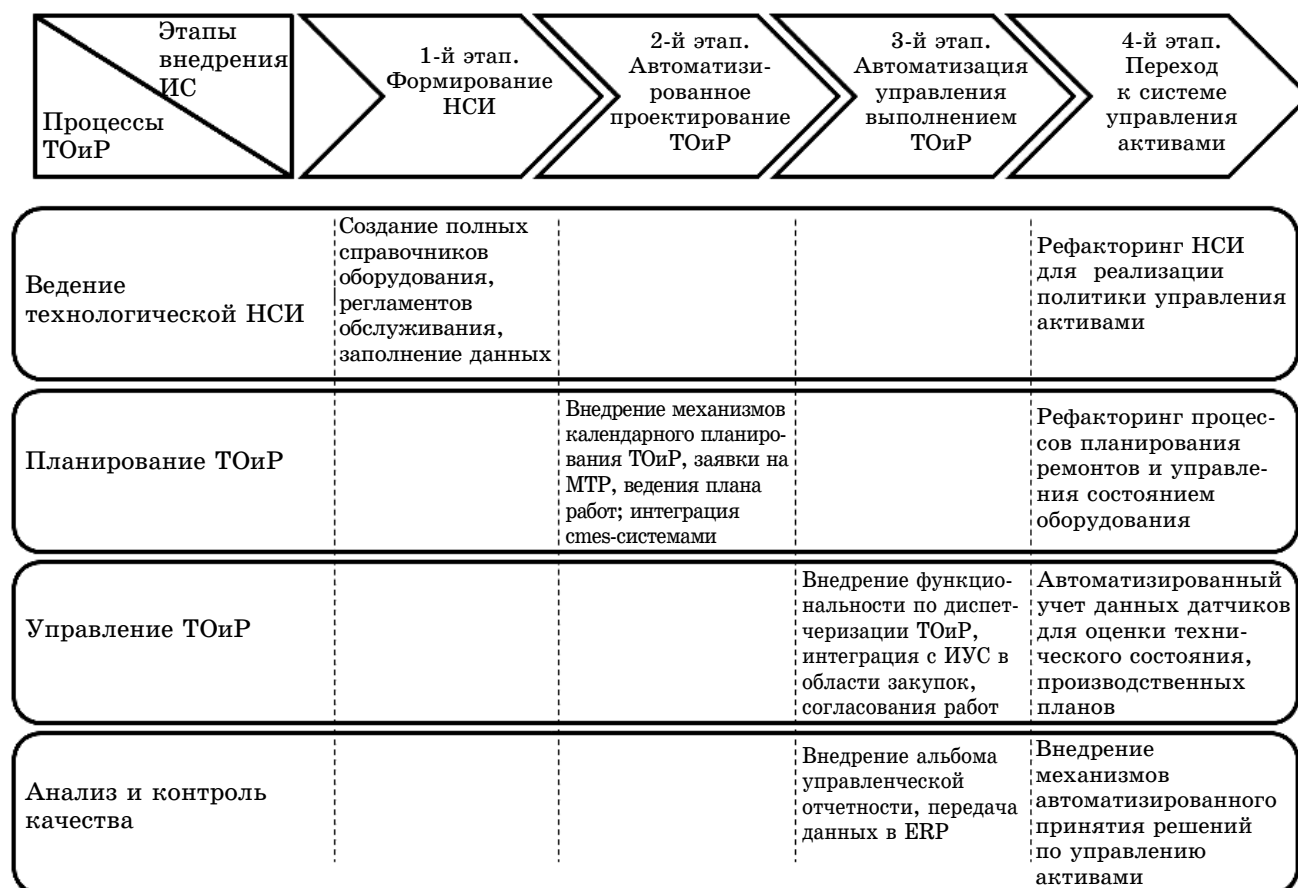


Рис. 1. Общая последовательность внедрения ИС управления ТОиР при "классическом" подходе

- Разработка системы автоматизации управления ремонтами: системы согласования и ведения планов ТОиР, подготовки заявки на необходимые материально-технические ресурсы (МТР) и привлечение внешних подрядных организаций, контроля над ходом подготовки вывода в ремонт, диспетчеризации работ, контроля завершения работ и итогового учёта затрат в разрезе мест возникновения затрат (МВЗ). На данном этапе невозможно обойтись без интеграции с системами управления складом и закупками, а также бухгалтерскими и финансовыми системами предприятия для формирования отчетности.

- Переход от системы управления ТОиР к системе управления активами [4] в соответствии со стандартами ИСО серии 55000 [5], когда после накопления определенного массива информации выстраивается стратегия наиболее оптимального использования существующего оборудования (и даже шире: всех активов предприятия, включая складские запасы и денежные ресурсы) для получения максимального экономического эффекта в заданный период.

Логика данной последовательности основана на том, что на каждом этапе используются результаты предыдущего, что теоретически должно позволять минимизировать переделки системы в связи с изменившимися функциональными требованиями или уточнениями подходов к автома-

тизации бизнес-процессов и приводить в итоге к внедрению системы управления предприятия, соответствующей концепции Индустрии 4.0. Иными словами, это выталкивающая система реализации проекта, не предусматривающая сильной обратной связи. Поэтому на практике для большинства предприятий, особенно для разветвленных организаций с исторически сложившейся неоднородностью оборудования и процессов в подразделениях, такой подход может не дать ожидаемых результатов: возникают ошибки в целях и задачах из-за работы внешних консультантов, результаты каждого этапа принимаются формально как удовлетворительные, но фактически являются недостаточными для работы и полноценного проведения следующего этапа внедрения. В итоге все внедрение получается формальным.

Типичный пример:

- расписание работ ТОиР формируется, но реально за основу принимается проект планов-графиков, сверстаный вручную в MS Excel;
- интеграция с ER- системой работает, но только на уровне сводных показателей;
- корректировки и внеплановые работы проходят внесистемно и т. д.

Как следствие массив реальных данных не формируется, и получается, что даже после многолетнего и дорогого проекта на выходе информационная система фактически ничего не

даёт: источником достоверной НСИ остаются мастера цехов либо бумажные архивы; планы-графики работ верстаются и согласовываются вне системы; взаимодействие между участниками процесса ТООР осуществляется вне системы, в информационную систему заносятся только данные дублирующие сводки, ведущиеся в MS Excel для формирования итоговых отчетов для руководства, причем данные часто корректируются в угоду вышестоящему руководству.

Корень проблемы лежит в том, что к системе управления ТООР подходят с точки зрения финансового учёта, а в реальности все проекты сфокусированы на учёте работ в ERP-системе. Но системы управления ТООР по своей сути являются системами оперативного менеджмента [6]. Они работают в едином информационном пространстве и простираются через все уровни управления (рис. 2).

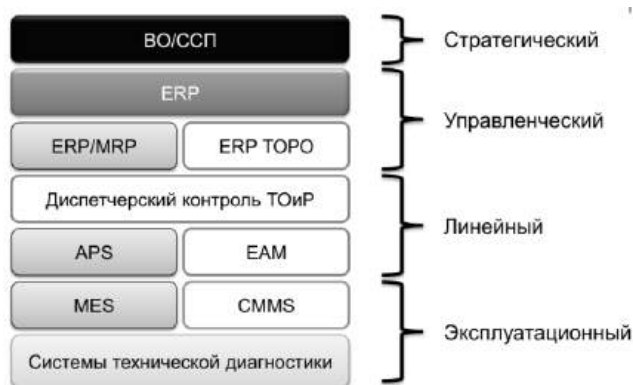


Рис. 2. Структура комплекса систем управления ТООР

Рассмотрим основные причины возникновения описанных проблем и сделаем попытку на основании опыта внедрения сформулировать альтернативный подход к последовательности охвата бизнес-процессов для запуска информационной системы в таком режиме, чтобы она не удваивала объем работ на ведение данных, а позволяла облегчить жизнь службам, организующим ТООР.

Проблемы "классического" подхода

Анализ ряда проектов, не показавших в итоге ожидаемых результатов, позволил выявить ряд общих факторов, препятствующих успешному внедрению информационной системы.

Как уже было упомянуто, каждый следующий этап внедрения серьезным образом зависит от полноты и качества выполнения предыдущего этапа. Поэтому первые серьезные риски возникают при переходе от первого этапа создания НСИ к автоматизации планирования ТООР. Календарное планирование ТООР требует в первую очередь использовать однородный детализированный технологический НСИ по всему эксплуатируемому оборудованию. У каждого функционирующего предприятия за десятки лет работы

накапливается огромный массив небольших модификаций, модернизации отдельных узлов оборудования либо производственных линий в целом. В случае, если в течение этих десятков лет никакой специализированной ИС для ведения НСИ не использовалось, складывается ситуация, когда в каждом филиале или на каждой производственной площадке действует своя (часто не формализованная) политика ведения состояния оборудования. Соответственно, если в какой-то момент возникнет задача в сжатые сроки классифицировать всё оборудование и разузловать его до отдельных узлов или деталей, то производственные службы разных филиалов не смогут договориться между собой о том, что же считать эталонным образцом модели или модификации. В результате в справочниках появляются странные модификации оборудования, например "Модель А Екатеринбург" и "Модель А Саратов" (которые могут различаться физически между собой в 1 % деталей, но в классификаторе не будут никак связаны). Возможны и ещё более утрированные случаи, когда методисты НСИ полностью отказываются разбираться в хитросплетениях модификаций и каждой единице оборудования присваивают отдельный класс (например, "Гелиевая установка Завод А", "Гелиевая установка Завод Б" и т. д.). В результате такой ускоренной классификации структура узлов, наработок, регламентов обслуживания создаётся отдельно по каждой модификации (или даже по каждой отдельной единице оборудования), эксплуатационные службы вынуждены заполнять огромный массив информации, единой технической политики по предприятию в целом сформировать невозможно: каждый инженер филиала с полным правом может заявить (условно), что регламенты "Модель А Екатеринбург" совершенно не подходят для его оборудования, для него требуются другая периодичность, другой состав работ и другой набор деталей от другого поставщика. Понятно, что этап внедрения автоматизированного планирования с такой НСИ будет провальным: если система сгенерирует, что в одном филиале оборудование необходимо ремонтировать в 5 раз чаще, чем аналогичное оборудование в другом, то такой проект плана, конечно, никто не возьмет за основу для дальнейшего планирования, и всё планирование ТООР будет проходить вне системы.

Единственный выход из этой тупиковой ситуации (при последовательности внедрения функциональности по схеме 1) — это настоящая унификация технической политики между филиалами, кропотливая работа по анализу расхождений модификаций, построение сложной иерархии, отражающей фактическую разницу и схожесть между различными единицами оборудования, и внедрение общей политики и регламентов обслуживания, т. е. разработка полной унифицированной технологической НСИ для ТООР — массива данных об оборудовании, его

узлах, техническом состоянии, регламентах обслуживания, технических картах, достаточного для автоматизированного планирования ТООР и оценки его эффективности. Однако все эти операции — это сложная инженерная работа, требующая изучения колоссальных объемов документации по техническим паспортам, всем проведенным работам на оборудовании с момента установки, сертификатов замененных деталей и т. д. В случае, если внедрение системы происходит на предприятии, оборудование на котором функционирует уже давно и покупалось у разных поставщиков в разное время, даже если вся необходимая документация сохранилась, такой процесс может занять месяцы и годы, причем всё это время никакого экономического эффекта от внедрения автоматизации ТООР не будет, т. к. не будет завершен даже первый базовый этап. Да и с точки зрения самой логики процесса выстраивания НСИ всё будет неизбежно погрязать в рутине, т. к. промежуточными результатами унификации технической политики без информационной системы никто не сможет воспользоваться и они не могут быть апробированы.

Другая важная проблема при переходе между первым и вторым этапами организационная. Внедрение автоматизированного планирования требует корректировки всех устоявшихся на предприятии процессов планирования, всей устоявшейся практики, "тайные знания" мастеров и т. п. оказываются невостребованными. При небольшом масштабе предприятия и ограниченном количестве сотрудников, отвечающих за планирование ТООР, данная проблема может быть решена ручными корректировками либо изменениями алгоритма планирования в ИУС для учета нюансов оборудования. Однако в случае больших разветвленных предприятий или холдингов, где в планировании работ могут быть задействованы сотни людей, быстро прийти к устраивающему всех варианту автоматически сгенерированного плана работ (с учётом фактора недостаточной полноты НСИ) становится невозможным. Кроме того, т. к. планирование ТООР начинается за несколько месяцев (а по крупным ремонтам и лет) до выполнения работ, параллельно с внедрением планирования в ИС управления ТООР ремонтные службы вынуждены продолжать организовывать выполнение текущих работ ТООР вне информационных систем в течение нескольких месяцев. Если в филиалах предприятия функционирует несколько независимых служб ТООР, то такой переход вызывает параллельное существование нескольких регламентов организации текущего ТООР, работы с планом будущих работ в информационной системе, порядков корректировок планов и алгоритмов планирования, что неизбежно ведет к хаосу и возврату к планированию работ вне информационных систем.

Естественно, что если в информационной системе управления ТООР не ведется актуального

плана работ, то вся дальнейшая функциональность, внедряемая на последующих этапах по автоматизации контроля, диспетчеризации работ, организации закупок и формированию отчетности, бесполезна.

Таким образом, можно сформулировать следующие факторы, препятствующие внедрению системы по рассматриваемой схеме.

- Трудность формирования полной и унифицированной НСИ, достаточной для автоматизированного планирования работ. Этот фактор играет крайне важную роль для инфраструктурных предприятий, холдингов, организаций с множеством производственных площадок, в которых не внедрена единая техническая политика и нет ограниченного стандартизованного перечня поставщиков оборудования.

- Организационные трудности одномоментного резкого перестраивания бизнес-процессов планирования под информационную систему при сохранении остальных процессов ТООР вне системы. Этот фактор играет особенно важную роль при существовании на предприятии нескольких независимых служб ТООР, отвечающих за планирование, в филиалах для предприятий со сложной исторически сложившейся структурой управления процессами эксплуатации оборудования.

Итерационные подходы к построению системы управления ТООР

При подходе к внедрению систем ТООР по аналогии с системами ERP, т. е. в режиме капстройке, процесс внедрения может занимать годы, причем на самом долгом и трудоемком этапе разработки НСИ никакого видимого экономического эффекта от ИС не будет и все это время ремонтникам придется дублировать работу вне информационной системы. Динамика изменений на предприятии опережает данный процесс. Поэтому после его окончания (а его практически всегда делают избыточным) при текущем состоянии он окажется неактуальным.

Отсюда возникает закономерный вопрос о том, возможно ли внедрение системы управления ТООР без опоры на полную технологическую НСИ, которая могла бы функционировать (пусть и в ограниченном объеме) сразу и охватывать автоматизацию оставшихся бизнес-процессов ТООР по ходу эксплуатации системы по мере методологической готовности. Рассмотрим подробнее вопрос о том, из каких принципов должна определяться последовательность внедрения функциональности для управления ТООР для того, чтобы проект внедрения ИС начал давать экономический эффект в сжатые сроки и был спроектирован таким образом, чтобы поэтапно вырасти в полноценную систему для управления ТООР (рис. 3).

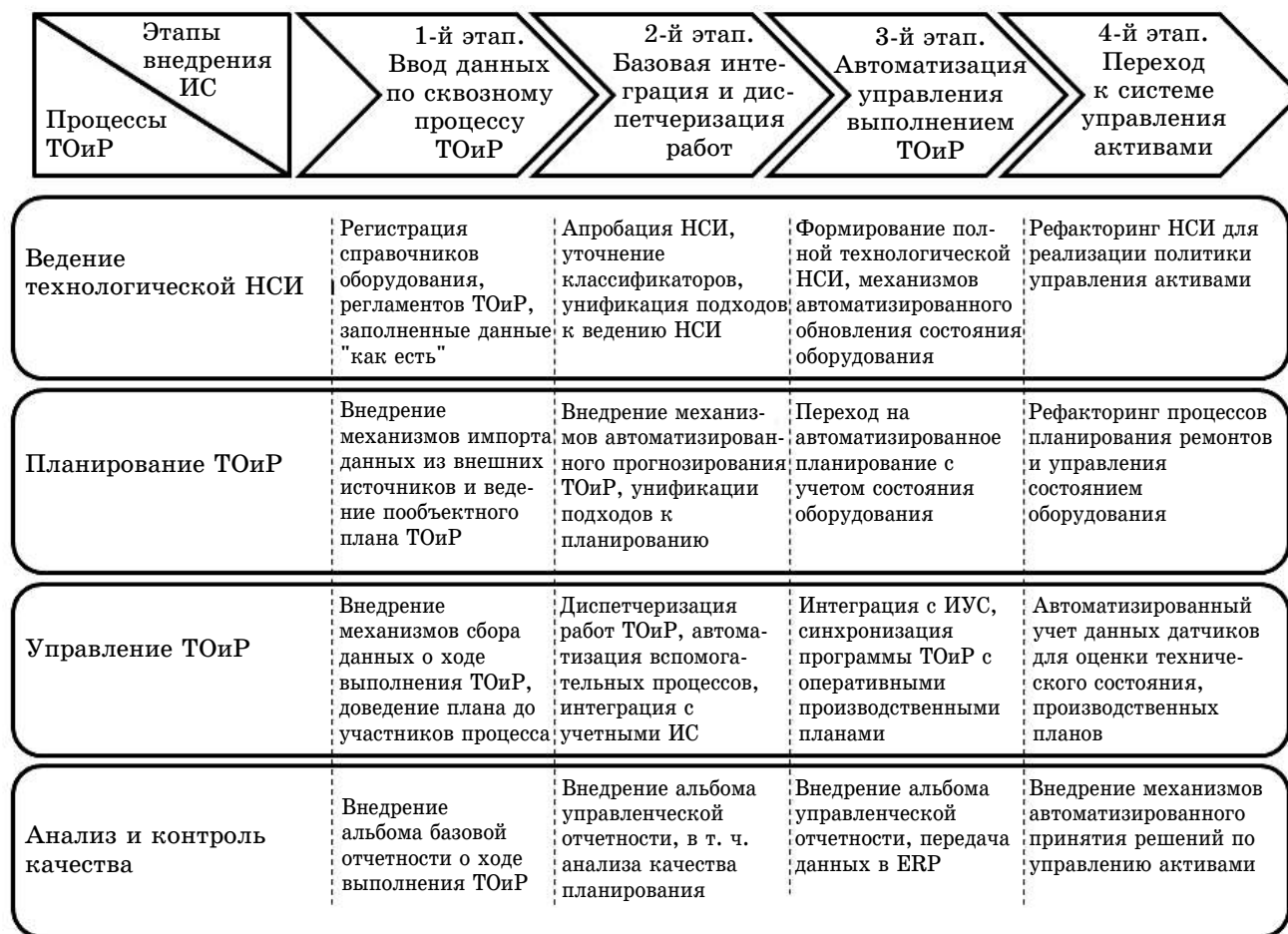


Рис. 3. Последовательность внедрения ИС управления ТООР при итерационном подходе

Для того чтобы информационная система могла дать операционный эффект, необходимо, чтобы в ней содержались релевантные данные, которые могут быть использованы участниками процесса организации и выполнения ТООР. Но т. к. процесс ТООР циклический, для того чтобы достигнуть релевантности, необходимо, чтобы в системе отражался весь сквозной бизнес-процесс ТООР. При этом система сразу позволяет получать достоверную отчетность и обратный отклик от исполнителей и участников процесса, что также повышает релевантность информации. Очевидно, что автоматизировать весь процесс ТООР в полном объеме одновременно невозможно. Поэтому в первую очередь должны автоматизироваться критические бизнес-процессы ТООР, т. е. те процессы, которые обеспечивают связь между этапами выполнения ТООР (планирование–подготовка–выполнение–завершение работ–анализ) и для которых создание единого информационного пространства и внедрение инструментов автоматизации немедленно повышают качество и сокращают объем ручного труда. Для разных предприятий набор критических бизнес-процессов может быть различным. Он зависит от специфики оборудования, способа организации ТООР и особенностей производственного процесса (далее подробнее

рассмотрим пример выделения таких процессов для инфраструктурных предприятий).

Поскольку при таком подходе из объема проекта изначально выпадает часть вспомогательных бизнес-процессов ТООР, первоочередное внимание должно быть уделено получению данных из внешних источников и информационных систем и файлов с данными, которые пользователи ведут вне системы. Можно сформулировать этот принцип как максимальную открытость системы для внешней информации с возможностью её интеграции в основную структуру данных системы [7].

Ранее обсуждалась важность наличия однородной полной технологической НСИ, но необходимо принять как ограничение, что достаточно качественной НСИ на старте проекта заведомо нет. Однако для ведения программы ТООР необходима опора на минимально достаточную НСИ для того, чтобы все пользователи могли говорить между собой на одном языке. Можно даже использовать для начала НСИ для бухгалтерских задач. Нужно помнить, что она не заменяет технологическую НСИ, но может быть использована для идентификации объектов ремонта и их атрибутов и также будет полезна при дальнейшей интеграции системы управления ТООР с учетными системами. При-

вязка программы ТОиР к технологической НСИ для реализации автоматизированного планирования, оценки эффективности выполнения ремонта и интеграции с производственными системами также необходима, но её строгость и детализация должны постепенно возрастать по мере разработки качественной НСИ и её апробации. Можно сформулировать этот принцип как параллельное использование технологической и бухгалтерской НСИ в ИС с поэтапным повышением роли технологической НСИ.

Исходя из этих базовых принципов разрабатывается план внедрения функциональности и интеграции с другими информационными системами предприятия. При этом на первом этапе внедрения системы могут быть пропущены очень существенные бизнес-процессы ТОиР, если их автоматизация не даёт заметного эффекта либо если процесс и не в автоматизированном виде выполняется удовлетворительно, либо когда процесс запутан и требует переработки с точки зрения бизнес-процессов. Например, если на предприятии уже существует календарное планирование работ ТОиР, но нет качественной и полной технологической НСИ, то целесообразно на первом этапе загружать пообъектные планы ТОиР как внешние данные из файлов пользователя и дальше автоматизировать бизнес-процессы контроля, организации ТОиР и учета затрат для экспертной оптимизации этих планов.

Апробация итерационного подхода

Описанный подход к внедрению систем управления ТОиР был апробирован при разработке системы диспетчерского контроля (СДК) ТОиР в холдинге ООО "Газпром центрремонт", компании, организующей ремонты на объектах Единой системы газоснабжения (ЕСГ РФ) ПАО "Газпром" [8]. Рассмотрим далее, каким образом происходило внедрение системы и к каким результатам привело использование данного подхода.

Исходные предпосылки

ООО "Газпром центрремонт" было создано как специализированное предприятие для внедрения централизованной схемы организации ТОиР на всех объектах ЕСГ от определения технической политики, разработки регламентов, организации выполнения программы ТОиР, включая закупку услуг и МТР у внешних поставщиков, до технического и финансового закрытия работ, контроля качества, соблюдения гарантийных обязательств и анализа эффективности выполнения ремонтов. На момент создания компании существовало только несколько разрозненных справочников эксплуатируемого оборудования и не существовало ни единого подхода к классификации и выделению объек-

тов ремонта, ни информации по узлам оборудования.

Программа ремонта объектов ЕСГ включала более 100 тыс. объектов ремонта на общую сумму более 100 млрд руб. Централизованное ведение этой программы, координация между исполнителями работ, производственными службами и диспетчерскими подразделениями физически невозможны без использования специализированной информационной системы и создания единого информационного пространства для всех подразделений, участвующих в процессе ТОиР. Поэтому руководством была поставлена задача по внедрению информационной системы в кратчайшие сроки, в течение нескольких недель. Естественно, в таких условиях о предварительном создании полной и качественной НСИ, внедрении общей технической политики и автоматическом календарном планировании не могло быть и речи.

Решения о порядке автоматизации процессов ТОиР

После анализа возможностей и задач было принято решение о поэтапной разработке системы исходя из перечисленных ранее принципов. На первом этапе были определены следующие наиболее критичные для компании требующие автоматизации бизнес-процессы.

- Ведение корректировок пообъектных планов работ: в связи с большим количеством изменений планов и множественностью источников этих изменений (эксплуатирующие организации, администрация ПАО "Газпром", исполнители по результатам диагностики) ведение единой, общей для всех программы ремонта оказалось первой ключевой задачей. Для реализации этой задачи были разработаны специализированные механизмы анализа исходных данных в файлах формата MS Excel, основанные на поиске расхождения между текстовыми строками с описанием работ для нахождения расхождений между версиями планов и ведения корректировок планов с сохранением истории.

- Организация договорной работы: проведение всех закупок с соблюдением требований законодательства и корпоративных стандартов, своевременное заключение дополнительных соглашений в связи с корректировками планов работ. Для автоматизации управления данным процессом был разработан специализированный модуль ведения закупок и договорных отношений с контролем хода согласования критически важных контрактов и включения всех работ, в том числе и внеплановых, в состав договорных отношений.

- Мониторинг хода подготовки к выполнению ремонтов: существенная часть срывов сроков работ происходит из-за несогласованности действий служб при подготовке ремонтов либо из-за того, что разные подразделения работают

с разными версиями плана ремонтов и ход подготовки работ просто не контролируется ответственными службами, либо из-за того, что между исполнителями и диспетчерской службой нет полного взаимопонимания по вопросу о том, какие предварительные работы должны быть выполнены (должен быть разработан проект, необходимо согласовывать работу с эксплуатирующими службами, какой пакет документации необходим, входит ли работа в договор либо необходимо заключать дополнительное соглашение в связи с корректировкой плана и т. д.). Для автоматизации задач сбора данных, мониторинга и диспетчеризации разработаны формы сбора данных с возможностью заполнения через Web либо через загрузку электронных таблиц от исполнителей работ и производственных служб с информацией о ходе подготовки и выполнения работ по порученным им работам ТООР, настроен автоматизированный обмен данными с ИС ПАО "Газпром", с данными о согласованных режимах транспорта газа и датах ввода/вывода из ремонта.

- Контроль над физическим ходом работ и диспетчеризация ресурсов: для управления сроками завершения работ крайне важно контролировать в ежедневном режиме, что происходит на каждом объекте ремонта. Разумеется, обрабатывать и анализировать такой массив информации (до 200 параметров контроля по крупным работам) в ежедневном режиме без использования ИС невозможно. Для реализации задачи автоматизированного контроля также разработаны набор настраиваемых форм сбора данных от исполнителя о физическом ходе выполнения и соответствующих механизмов загрузки с детализацией, зависящей от типа работы, важности объекта и близости завершения работ, а также набор аналитических форм, позволяющих в автоматическом режиме выявлять проблемные объекты, требующие особого контроля либо привлечения дополнительных ресурсов.

- Контроль закрытия работ ТООР: после выполнения всех работ должен быть выполнен комплекс мероприятий: объект сдан эксплуатационным службам, подписаны документальные акты, созданы гарантийные обязательства. Документальное закрытие работ по времени всегда несколько расходится с техническим. При этом управление учета затрат контролирует, чтобы были оплачены только выполненные работы и только после сдачи эксплуатационным службам, чтобы были зарегистрированы гарантийные обязательства. Для автоматизации задачи управления закрытием работ ТООР настроены механизмы обмена данными с учетными системами, а также аналитические отчеты (в том числе автоматически формирующиеся), которые позволяют выявлять объекты с неполным или некорректным закрытием работ.

В качестве НСИ по ремонтируемым объектам на первом этапе использовали бухгалтерский справочник основных средств (дополняемый на

основе планов ремонтов) и технологический справочник объектов ремонта, связанный с корпоративной системой ПАО "Газпром" сбора данных о технологических объектах "Инфотех", также расширяемый на основе планов. Архитектура системы была построена так, что на первом этапе все справочники носили необязательный характер и могли расширяться на основе текущей информации.

Для уменьшения объема проекта были максимально полно задействованы существующие системы компании: системы по закупкам МТР, согласованию договоров, созданию закрывающих документов и т. д. Для этого были реализованы универсальные коннекторы с системами холдинга и отраслевыми системами ПАО "Газпром", позволяющие обмениваться необходимыми данными в автоматизированном режиме. Такой подход позволил избежать дублирования функциональности и дублирования ввода данных в несколько информационных систем пользователями.

Стадии проекта и промежуточные результаты

Использование рассмотренных подходов позволило в срок около двух месяцев внедрить функциональность по ведению единого централизованного плана работ ТООР и сбору данных от исполнителей, эксплуатирующих служб и профильных подразделений для формирования оперативной отчетности и диспетчеризации работ с отставанием от фактических событий в два—три дня (а по критическим объектам — в дневном режиме). Таким образом, уже через 2 месяца система стала инструментом, помогающим производственно-диспетчерской службе и плановому управлению в ежедневной работе. В качестве ядра системы был выбран отечественный программный комплекс СПКР (система планирования капитальных ремонтов) разработки ООО "Компания "ТЕРСИС".

Через коннекторы были реализованы обмены данными со смежными системами (около 12 штук), благодаря чему в системе появились данные по согласованию режимов транспорта газа, технологические паспорта объектов, данные системы электронного документооборота, материально-технического снабжения и т. д. Таким образом, в системе с минимально возможным вводом данных пользователями появился весь существующий объем данных о ходе подготовки и выполнения программы ТООР. Отчетность, формируемая на основе данных системы, с первых дней функционирования обладала необходимой точностью и начала использоваться как основа для формирования оперативной и итоговой отчетности, как внутренней, так и отраслевой.

В ходе эксплуатации апробирована НСИ, за время эксплуатации изменены и добавлены де-

сятки классов объектов ремонтов, добавлены десятки тысяч объектов ремонта, не зарегистрированных ранее ни в каких информационных системах. Этот процесс был максимально упрощён, чтобы исключить стандартные задержки корректировки данных через "группы НСИ".

Параллельно с развитием системы происходила унификация технической политики по всем предприятиям отрасли, были разработаны общие регламенты обслуживания и ремонтные формуляры для критически важного оборудования.

Как и предполагалось по планам развития, информационная система стала использоваться в производственной деятельности по организации ТОиР уже в первые месяцы после постановки задачи, а упорядочение бизнес-процессов ТОиР в организации и формирование НСИ происходило затем постоянно и параллельно с эксплуатацией системы, получало обратную связь и во многом опиралось именно на то, что система управления ТОиР уже была запущена в эксплуатацию, пусть и не с полным охватом всех бизнес-процессов.

Текущее состояние развития системы

На текущий момент система СДК ТОиР встроена в информационный ландшафт предприятия. В ней собирается весь массив технических и экономических данных о ходе подготовки и выполнения ремонтов от сметных расчетов и дефектных ведомостей до физического хода выполнения работ, изменения технических показателей по результату ремонтов и показателей эффективности выполнения ремонтов. В результате внедрения системы резко повысилось качество управления критическими объектами, практически исключены срывы сроков на объектах, влияющих на общую пропускную способность ЕСГ. За счет повышения качества диспетчеризации удалось существенно сократить время вынужденного простоя ремонтных бригад. Оценочный экономический эффект от внедрения системы составил более 500 млн руб. ежегодно.

За время эксплуатации системы благодаря её открытой модульной системе был внедрен ряд модулей, автоматизирующих вспомогательные бизнес-процессы. Это модули учёта движения и вовлечения номерных изделий, ведения экспертизы сметной документации, управления агентскими поручениями и согласования изменений договорных обязательств, управления рассылками, контроля исполнения поручения, ведения электронных ремонтных формуляров и другие. Таким образом, были охвачены практически все основные и вспомогательные бизнес-процессы, касающиеся организации ТОиР. Планирование выполнения работ по-прежнему частично осуществляется вне системы как в силу организа-

ционных причин, так и в силу того, что работа по унификации технических регламентов не закончена из-за большого разнообразия оборудования на объектах ЕСГ, и того, что существенная часть оборудования произведена на Украине и техническую документацию для него приходится восстанавливать практически с нуля. На текущий момент реализованы механизмы прогнозирования ремонтов на основе регламентов и статистики эксплуатации оборудования, а также замены отдельных узлов на основании их наработки в объеме, охваченном электронными ремонтными формулярами. Данные прогнозы используются в качестве системы поддержки принятия решений для формирования прогнозного плана-основы для планов-графиков работ для дальнейшего уточнения экспертами и помогают прогнозировать корректировки планов при изменении режима эксплуатации оборудования.

Заключение

Рассмотрен подход к построению систем управления ТОиР, позволяющий получить быстрый результат в сжатый период времени. Сформулированы основные принципы альтернативного подхода. Приведен пример его практического использования при разработке системы управления ТОиР на объектах газоснабжения. Показано, что при определенных условиях при внедрении как систем управления ТОиР, так и других производственных систем применение данного подхода может быть целесообразным и давать результаты в более сжатые сроки по сравнению с классическим подходом.

Литература

1. Антоненко И. Н. ЕАМ-система TRIM: От автоматизации ТОиР к управлению активами (НПП "СпецТек") // Автоматизация в промышленности. 2015. № 1. С. 40—43.
2. Сидоров И. 1С:ПРЕДПРИЯТИЕ 8: Управление ремонтами и обслуживанием оборудования // Финансовая газета. 2011. № 44.
3. Решетников И. С. Автоматизация производственной деятельности газотранспортной компании. — М.: НГСС, 2011.
4. Сухобоков А. А. Алгоритм стратегического управления активами для ЕАМ-систем // Прикладная информатика. 2017. Т. 12. № 4(70). С. 22—52.
5. ГОСТ Р 55.0.**-2014 / ИСО 55000:2014 Управление активами. Национальная система стандартов.
6. Решетников И. С. MES: Стратегическая инициатива. — М.: НГСС, 2019.
7. Решетников И. С. Системный ландшафт современной ИУСПП // Автоматизация в промышленности. 2019. № 8. С. 14—18.
8. Решетников И. С., Кузнецов А. Ю., Чиглинец А. А. Система управления потоками ремонтных работ на объектах нефтегазовой отрасли // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2020. № 9(566). С. 30—37.

PHASED IMPLEMENTATION OF MRO MANAGEMENT SYSTEMS FOR BRANCHED INFRASTRUCTURE ENTERPRISES

A. Yu. Kuznetsov

LLC SPE «Neftegazsoftservice», Moscow, Russia

I. S. Reshetnikov

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Russia

The article considers issues about optimization of planning and sequence of involvement business-processes in building information system for automation processes of management of maintenance And Repair in infrastructure organizations with mature structure. It is shown that in case of absence of unified technical policy and maintenance strategy model of building system on base of ranging business-process by critical influence and its iteration automation has advantages against other approaches. Performed analysis of experience of using such approach in case of gas-transition sector.

Keywords: MRO management systems, CMMS, ERP, EAM-systems, MRO management, MRO, information systems implementation, NSI, information systems architecture.

Кузнецов Андрей Юрьевич, руководитель проектов.

E-mail: mail@ogss.ru

Решетников Игорь Станиславович, старший научный сотрудник.

E-mail: i.reshetnikov@mescenter.ru

Статья поступила в редакцию 15 марта 2021 г.

АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ BLOCKCHAIN ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ ИНДУСТРИИ 4.0

А. А. Карпунин; В. Д. Кирилин; П. О. Репников; М. А. Усюкин

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Проанализированы основные преимущества технологии блокчейн и особенности ее применения. Показано, что возможна широкая область инновационного применения в разных сферах технологии блокчейн как математической структуры для хранения данных с высоким уровнем защищенности. Кратко рассмотрены особенности реализации технологии смарт-контракт с позиции ее использования для обеспечения безопасности и автоматизации транзакций. Основное внимание уделено распределенным информационным и конструкторским системам. Предложены новые варианты использования технологии блокчейн, отличающиеся от аналогов, построенных не на блокчейне, и обеспечивающие прозрачность, безопасность и простоту использования. Проведен анализ преимуществ и проблем, возникающих при использовании блокчейна для разработки приложений Индустрии 4.0. Представлен подробный обзор наиболее актуальных приложений на основе блокчейна для технологий Индустрии 4.0. Предложена методика для разработчиков приложений Индустрии 4.0, которая позволяет применять инструментарий блокчейн для улучшения кибербезопасных промышленных приложений.

Ключевые слова: Индустрия 4.0, блокчейн, Интернет вещей, киберфизические системы, BigData.

В условиях цифровизации экономики все более актуальными становятся проблемы сохранности личной информации. К примеру, в октябре 2016 г. из-за хакерской атаки на DNS-провайдера Dyn оказались недоступны Twitter, Reddit, PayPal, Airbnb и многие другие интернет-ресурсы. Если бы DNS-провайдеры работали по принципу блокчейна, таких проблем можно было бы избежать.

Блокчейн (англ. *Blockchain* — блочная цепь) — это децентрализованная база данных, распределенная на множестве компьютеров и не имеющая подключения к общему серверу. Блокчейн хранит упорядоченный список записей каждой транзакции, совершенной в мире (называемых блоками) [1].

Для создания блоков в блокчейне применяется процесс, называемый майнингом (англ. *Mining* — добыча). Майнинг — процесс записи блоков данных о транзакциях, совершаемых в сети блокчейн, в распределенную базу данных, доступную для просмотра каждому пользователю сети Интернет. Узлы сети обращаются к блокчейну при проведении каждой новой транзакции, сравнивая все существующие данные в ней с транзакцией, совершаемой в данный момент, для отделения настоящих транзакций от попыток потратить одно и то же количество монет два и более раз. Блоки содержат подтверждение решения уравнения. При этом каждый подключенный к системе пользователь может проверить, был ли блок закрыт по правилам или же была допущена ошибка.

Майнинг — единственный существующий способ добычи новых биткойнов из сети, которые выдаются как вознаграждение за удачное решение уравнения с помощью специализированного оборудования (ASIC-майнер) или обыч-

ного компьютерного оборудования [2]. Работа, которой занимаются майнеры в сети биткойн, заключается в высчитывании хэша, подходящего всем транзакциям, находящимся в обработке, и обеспечении получения секретного ключа. Скорость, с которой происходит вычисление хэша, называется Хэшрейт (англ. *Hash Rate*) и имеет размерность хэш в секунду (H/s).

Хэш является величиной, состоящий из суммы хэша предыдущего блока, суммы чисел транзакций, прошедших в течение последних 10 мин, а также случайного числа. При этом данным условиям удовлетворяет лишь одно значение, являющееся неизменным после его нахождения.

Главная польза блокчейна — это децентрализация. У каждого из узлов сети дублируется история всех транзакций (подобно тому, как если бы все собирали бумажные чеки о своих операциях на счете, а потом выкладывали бы их в Интернет). В таком случае решается проблема проведения мошеннических операций [3].

Одна из основ Индустрии 4.0 состоит в сборе как можно большего количества данных из различных звеньев цепочки ценности, от поставщиков до потребителей. Такой сбор данных должен производиться быстро и эффективно для как можно более быстрого использования на производствах. Сбор данных должен осуществляться с помощью систем, которые должны позволять получать, хранить, обрабатывать информацию и обмениваться ею с устройствами в киберфизическом пространстве.

Блокчейн — одна из наиболее многообещающих технологий для подобного обмена информацией, позволяющая создавать децентрализованные приложения, способные отслеживать и хранить транзакции, выполняемые одновременно

большим количеством пользователей и устройств. В 2017 г. Gartner прогнозировал, что добавленная стоимость технологий блокчейн для бизнеса вырастет до чуть более 176 млрд дол. к 2025 г., а к 2030 г. превысит 3,1 триллиона дол. и 10—20 % глобальной инфраструктуры будет работать на технологии блокчейн. Блокчейн может повысить ценность различных областей и развить существующий Интернет, обеспечивая трансформацию от Интернета информации до Интернета ценностей (концепция, в которой стоимость передается так же легко, дешево и надежно, как сейчас передается информация).

Данная работа посвящена анализу способности блокчейна в рамках технологий Индустрии 4.0 решать некоторые из наиболее актуальных проблем, с которыми сталкиваются промышленные сценарии. Для начала открытая структура и абсолютное доверие наряду с уже существующей инфраструктурой использования в платежных системах, таких, как Bitcoin и Ethereum, предполагают беспрепятственное использование блокчейна как способа оплаты закупок и финансового управления проектом.

Скорость обновления, одновременность и сложность подделки позволяют использовать блокчейн как технологию отслеживания и управления цепочкой поставок. Некоторые исследователи утверждают, что принципиальная особенность четвертой промышленной революции — использование возможности подключения и связи между миллиардами устройств. Блокчейн — ключевая технология для достижения преобразования производственных и сервисных операций в глобальной цепочке поставок и изменения взаимодействия между людьми (потребителями и партнерами по цепочке поставок) и машинами.

Комбинацией логистики и платежного метода можно назвать технологию умных контрактов. По сути, это цифровой контракт, который может автоматически выполнять свои условия при выполнении заранее определенных условий. Одно из первых связанных с блокчейном приложений на платформе Ethereum имело возможность выполнять компьютерные коды и сценарии на блокчейне. Поскольку входные условия поступали из цепочки блоков как неизменяемые данные, а сам код также был защищен в цепочке блоков, такие условные функции действовали как контракты с цифровой привязкой.

Наконец, очень перспективное использование блокчейна заключается в процессе информационного моделирования. Это процесс, который имеет дело с цифровым представлением реальных активов. В его центре находится компьютерная модель, которая содержит широкий спектр информации о физическом устройстве, такой, как трехмерная геометрия, информация об управлении производством, показатели эксплуатации и технического обслуживания. Важно отметить, что информационное моделирова-

ние намного шире, чем просто компьютерная модель. Оно также включает в себя цифровой метод работы, который описывает, как модель вписывается в общую систему управления проектом, как обрабатывается входящая и исходящая информация и как участники проекта создают, используют модели и управляют ими.

Авторами рассмотрены основные преимущества и недостатки технологии блокчейн, особенности парадигмы Индустрии 4.0 [4], и предложены самые перспективные варианты инновационного использования технологии блокчейн, в том числе в умных контрактах.

Анализ областей применения технологий блокчейн

Для всех способов передачи данных или информации требуются устройства передачи и язык, на котором они могут общаться. Блокчейн — это нескончаемый перечень переводов, или транзакций, где записываются все переводы, производимые с использованием данной технологии. Есть мнение, согласно которому блокчейн всего один. Однако это не так. Блокчейн можно сравнить с автомобилем, а точнее, с его двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Все ДВС работают по одному и тому же принципу, но реализация различается разительным образом: электропоезд использует электричество, спорт-кары "Формулы 1" — высокооктановый бензин. Правила, по которым в дальнейшем ведется блокчейн, задаются заранее, создается клиент с заранее известным набором функций, через который происходит обмен данными о транзакциях. Если решено использовать какую-либо из существующих версий клиентов, сначала необходимо скачать существующий блокчейн либо только самую новую часть реестра всех существующих транзакций (к примеру, блокчейн "эфириума" (ETH) на данный момент занимает более 1 терабайта), каждая строка в котором является информацией об уже существующих транзакциях. Основное и самое главное правило неизменно: при совершении транзакции от А к Б требуется доказать способ получения монеты. Порядок функционирования технологии блокчейн показан на рис. 1.

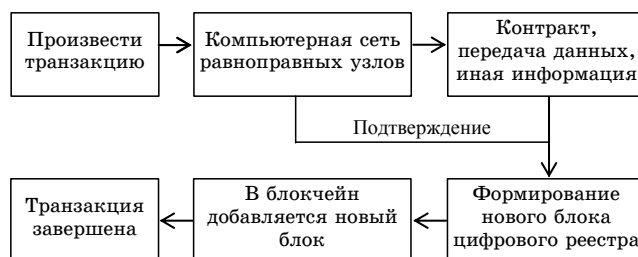


Рис. 1. Функционирование технологии блокчейн [5]

Децентрализованная система хранения данных блокчейн изначально использовалась для

проведения финансовых операций. В данное время эта технология переходит и в такие области, как недвижимость, юриспруденция, образование, медицина, логистика, авторское право, Интернет вещей и т. д. (рис. 2).

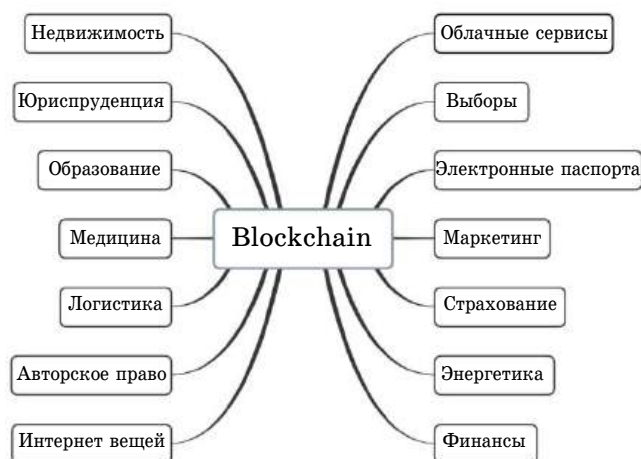


Рис. 2. Области применения технологии блокчейн

Распределенные информационные системы — набор информационных систем, физически распределенных по множеству сайтов, которые связаны некоторой коммуникационной сетью.

Сама природа приложения может потребовать использования сети связи, соединяющей несколько компьютеров. Во многих случаях использование одного компьютера в принципе возможно, но использование распределенной системы выгодно по практическим соображениям. Например, оно может быть дешевле. Также система эффективна для получения желаемого уровня производительности за счет использования кластера из нескольких компьютеров младшего класса по сравнению с одним компьютером высокого класса. Распределенная система может обеспечить большую надежность, чем нераспределенная, поскольку здесь нет единой точки отказа. Кроме того, распределенную систему легче расширять, чем монолитную однопроцессорную систему, и легче управлять ею.

Рассмотрим области применения технологии блокчейн.

Недвижимость. Благодаря применению этой технологии в любой момент можно доказать право на собственность (например, при создании распределенного журнала сведений о недвижимости и о ее владельцах). В любой момент можно исключить все мошеннические операции, к примеру операции незаконной или двойной продажи.

Юриспруденция. Юридическая отрасль благодаря технологии блокчейн второго поколения (смарт-контрактам) может претерпеть серьезные изменения. Используя только их, пользователь сможет вступить в брак, защитить свои права, оформить документы и т. д.

Образование. Необходимость в управлении каким-либо центральным органом власти сведется практически к нулю, информация о любом дипломе и сертификате будет доступна всем желающим, а следовательно, проверка информации о студентах и учениках также станет намного доступнее.

Медицина. Так как блокчейн является универсальным хранилищем данных, медицинские центры смогут использовать его для хранения данных о пациентах, но при этом доступ к ним сможет получить только человек, владеющий соответствующими правами.

Выборы. В феврале 2015 г. Bitcoin Foundation представил новый проект, посвященный системе голосования на основе блокчейна, которая "обеспечивает еще большую прозрачность процесса голосования, при этом каждый голос записывается в блокчейне". Основываясь на неизменности, прозрачности и консенсусе, присущих технологии блокчейн, системы голосования, в которых каждый голос записывается под безопасным криптографическим хешем, могут стать крупным технологическим прорывом. Этот тип системы голосования впервые был реализован датской политической партией для внутренних выборов.

Маркетинг. Маркетологи часто пытаются получить доступ к данным клиентов, платя третьим сторонам (например, Google) за обмен информацией. Блокчейн может позволить продавцам использовать микроплатежи для мотивации потребителей делиться личной информацией напрямую, без посредников. Индивидуализированные сделки открывают механизм для предоставления персонализированного контента. Такой подход может снизить вероятность мошенничества и минимизировать неточную или неполную информацию от клиентов, которые в настоящее время мешают работе этих программ, и элиминировать посредников.

Страхование. Страховой сектор, как и многие другие, начал исследовать применение технологии блокчейн посредством значительных инвестиций как больших, так и малых компаний, исследований консалтинговых фирм.

Анализ возможностей технологии блокчейн при построении распределенных конструкторских систем в условиях внедрения концепции Индустрия 4.0

Блокчейн может улучшить деятельность многих отраслей промышленности, а также стать очень полезным инструментом для систем в Индустрии 4.0. Однако блокчейн не всегда является оптимальным выбором для решения каждой проблемы. Например, в частных сетях без связи с внешними системами традиционные базы данных обычно предоставляют достаточно быстрый и мощный инструмент для решения большинства задач. Более того, уже существуют

другие технологии, которые служат тем же целям, что и блокчейн (создание надежной децентрализованной сети), которые могут быть удобны для многих приложений Индустрии 4.0.

Поэтому прежде, чем принять решение о том, следует ли использовать блокчейн вместо альтернативных технологий в приложении Индустрии 4.0, необходимо распознать определенные функции. Имеются предложенные общие рамки для определения того, когда использовать блокчейн [6], однако есть и некоторые специфические особенности конструкторских систем в Индустрии 4.0, которые требуют детального анализа.

Во-первых, блокчейн может быть полезен, когда в приложении требуется децентрализация.

Не каждая технология Индустрии 4.0 требует децентрализации, но некоторые могут извлечь из нее выгоду, особенно когда существует недоверяемая централизованная система [7]. Это происходит в определенных отраслях, где в определенный момент нет доверия к конкретным поставщикам, банкам и даже государственным учреждениям. Вместе с тем если между различными объектами существует доверие, блокчейн не нужен.

Когда необходимо произвести платежи, необходимо доверие. Более того, наличие платежной системы может использоваться для автоматизации многих систематических задач и, таким образом, ускорения транзакций между сторонами. Можно проводить платежи через традиционные платежные системы, но они часто имеют два недостатка: они обычно требуют более высоких комиссий за транзакции, чем публичные блокчейны, и им нужно почти вслепую доверять, не подвергая сомнению их безопасность, этику или внутреннюю политику.

Доверие и прозрачность также являются причинами для создания общедоступных журналов транзакций. Такие журналы включают определенную информацию с отметками времени, которая может быть опубликована. Вся информация может быть подвергнута тщательной проверке всеми объектами, которые взаимодействуют с цепочкой блокчейна. Это дает возможность проводить аудит, вести точные записи отслеживания или использовать методы big data и предсказательной аналитики [8, 9]. Отметим, что такие функции традиционно предоставлялись базами данных, безопасность которых имеет важное значение, особенно когда они доступны через Интернет и подвергаются атакам.

Еще одна важная функция, которая может потребоваться для приложения Индустрии 4.0, — это необходимость использования P2P-коммуникаций для обмена данными между различными сторонами, участвующими в производственных процессах. Она очень часто встречается в определенных архитектурах PoT, узлы которых взаимодействуют между собой для обнаружения определенных событий или выполнения задач [10].

Важно подчеркнуть, что P2P-коммуникации не всегда являются лучшим вариантом обеспечения коммуникаций. Существуют альтернативные коммуникационные подходы, которые разработчику следует проанализировать. Например, в случае узлов PoT с ограниченными ресурсами связь P2P обычно не может быть реализована эффективно. По этой причине такие узлы обычно направляют свои данные через шлюзы, используя протоколы, отличные от P2P, такие, как MQTT [11].

Наконец, еще одна необходимая особенность — надежность распределенной системы. Поскольку есть хорошие альтернативы, предоставляемые серверными фермами или облаками, должны быть другие факторы, оправдывающие использование блокчейна. Наиболее частая причина — отсутствие доверия к организации, которая управляет инфраструктурой, или некоторые требования к конфиденциальности, указанные клиентом [12]. Это важно в случае критически важных инфраструктур [13, 14] и оборонной промышленности [15], данные которых из-за проблем с конфиденциальностью (например, некоторые данные оборонной промышленности считаются секретными) должны храниться с помощью надежных поставщиков услуг [16].

Тенденции блокчейн-технологий

Блокчейн предоставляет возможность разработки приложений. Самое распространенное из них — криптовалюта [17]. Информация, передаваемая через цепочку блоков, может находить самые различные применения: криптовалюта, цифровая подпись или любой другой вид ценной информации. Например, после оцифровки своих работ и загрузки в блокчейн Blinded дает возможность продавать права на них, а Fresco позволяет художникам защитить свои работы. Если журнал захочет напечатать работу, пользователь сможет договориться с ним напрямую через блокчейн. В таком случае пользователю оплатят работу криптовалютой, и только после этого будет представлена копия работы. Все это нужно для приватного ключа от перевода, благодаря которому журнал сможет доказать законность публикации работы.

В другом проекте информацией в блокчейне является документ драгоценности, в котором зашифрованы ее параметры. В момент продажи владельцы отправляют документ драгоценности, зашифрованный в блокчейне. У любого человека, воспользовавшегося данной системой, останется приватный ключ от последней транзакции паспорта. После этого каждый сможет узнать подлинность камня, введя его параметры в систему. Эстония начала внедрять технологию блокчейн в здравоохранение. Такая компания, как Guardtime, оцифровывает медкарты сотен тысяч граждан в блокчейне [18].

Главная особенность данной технологии заключается в том, что любая ценность в блокчейне отправляется непосредственно нужному человеку, на любое расстояние. Третье лицо-посредник в таком случае не требуется. Криптоключ от данных, имеющих в собственности, можно отправить по e-mail. К примеру, Газпром имеет 10 тыс. водителей, занимающихся перевозкой вещей. В результате приходится подписывать десятки тысяч доверенностей каждый день. Для этого их приходится носить на подпись от одного ответственного лица ко второму и третьему. Последнего можно избежать, создав цепочку данных — блокчейн "директор передал объект логисту". Так компанию можно избавить от лишней бюрократии. Документы в данном случае подделать невозможно. Таким образом можно сильно упростить госаппарат.

Анализ технологии "умный контракт"

Смарт-контракт ("умный контракт") — это компьютерная программа, которая отслеживает и обеспечивает исполнение договора, заключенного между сторонами. Умный контракт действует аналогично традиционному соглашению, но исключает необходимость привлечения третьей стороны. Смарт-контракты могут инициировать свои команды автоматически, что исключает участие регулирующего органа. После развертывания в блокчейне смарт-контракт не может быть изменен или обновлен для исправлений по безопасности, что побуждает разработчиков внедрять надежные стратегии безопасности перед развертыванием, чтобы избежать потенциальной эксплуатации в более позднее время. На рис. 3 приведено сравнение смарт-контрактов с обычными контрактами.

СМАРТ-КОНТРАКТЫ	ОБЫЧНЫЕ КОНТРАКТЫ
Виртуальный документ	Бумажная версия документов
Хранится в блокчейне	Основан на праве
Компьютерный язык	Юридический язык
Безопасно и без посредников	Посредники, риск обмана
Криптовалюты	Обычные деньги

Рис. 3. Сравнение смарт-контрактов с обычными контрактами

Если смарт-контракту нужно взаимодействовать с внешним миром (банками, реестрами и т. д.), используют оракулы — сервисы, которые отвечают за подключение к источнику данных. С помощью оракула умный контракт получает доступ к информации в онлайн-режиме и может узнать текущий курс валют, изменение цен, статус платежа.

С помощью умных контрактов два человека могут заключить между собой договор и заверить его полностью автономно: средства в криптовалюте обычно хранятся в промежуточном владении, а после выполнения условий контракта и завершения оговоренных событий автоматически доставляются продавцу. Все исключительно просто и эффективно.

Применение умных контрактов

Производители работают с большим количеством контрагентов (поставщики, дистрибьюторы, прямые покупатели). При этом контракты не защищены от подмены или фальсификации. Смарт-контракты и блокчейн могут стать эффективными инструментами для обеспечения безопасности работы с контрагентами [5, 19, 20].

Применение смарт-контрактов сокращает время на транзакцию и стоимость, создает гибкий, быстрый, прозрачный и безопасный алгоритм взаимодействия и сотрудничества между производителями и контрагентами. Пример работы умных контрактов приведен на рис. 4.



Рис. 4. Пример работы умных контрактов [20]

Наряду с автоматизацией процессов выставления и отслеживания оплаты счетов смарт-контракты могут стать инструментом взаимодействия с конечным пользователем [20—22]. Например, индивидуальные смарт-контракты могут присваиваться конкретным устройствам, что позволит пользователю и производителю следить за техническим состоянием устройства и вовремя обеспечивать обслуживание и замену узлов и запчастей, быстро обрабатывать запросы пользователей и снизить затраты на сервисное обслуживание.

Заключение

Рассмотрены основные преимущества и недостатки технологии блокчейн, принцип ее работы. Приведен пример ее использования. Блокчейн — новый способ ответить на вопрос о том, как можно быть достаточно уверенным в другом человеке для безопасного, а главное, спокойного обмена ресурсами. Появление правительств и банков на блокчейн создало бы центральные органы, которым можно — было бы передать на аутсорсинг доверие со стороны участников, пока они его не потеряют. Блокчейн, распределенный на десятках тысяч компьютеров, может механизировать доверие, создавая возможности для новых способов организации децентрализованных предприятий и учреждений.

Главным недостатком данной технологии является ее нерегламентированность на уровне закона, что тормозит ее развитие. Это связано с нежеланием передачи функции эмиссии денег независимому кругу лиц, не подконтрольных государству. С увеличением количества пользователей возрастут транзакции, а дублирование, проверка и запись на множества серверов делают эту систему небыстро действенной.

Литература

1. Власов А. И., Карпунин А. А., Новиков И. П. Системный анализ технологии обмена и хранения данных BLOCKCHAIN // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 3(55). С. 75—83.
2. Осмысление Биткойн через призму цитат его загадочного создателя [Электронный ресурс]. URL: <https://coinspot.io/analysis/chto-skazal-satoshi-osmyslenie-bitkojna-cherez-prizmu-ego-zagadochnogo-sozdatelya> (дата обращения: 12.04.2021).
3. Что такое блокчейн [Электронный ресурс]. URL: <https://www.the-village.ru/village/city/city-guide/296790-blokcheyn-prostym-yazykom> (дата обращения: 12.04.2021).
4. Обработка данных с распределенным реестром в концепции "Индустрия 4.0": мат. V Междунар. науч.-техн. конф студентов, молодых учёных и специалистов "Энергосбережение и эффективность в технических системах". 2018. С. 120—121.
5. Поннер Н. Цифровое Золото. Невероятная история биткойна или о том, как идеалисты и бизнесмены изобретают деньги заново. — М.: Диалектика, 2016. — 350 с.
6. Что такое Blockchain (блокчейн)? Технология, платформа, транзакции [Электронный ресурс]. URL: <https://mining-cryptocurrency.ru/blockchain/> (дата обращения: 12.04.2021).
7. Lo S. K., Xu X., Chiam Y. K., Lu Q. Evaluating Suitability of Applying Blockchain: Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering of Complex Computer Systems (ICECCS), Fukuoka, Japan, 5—8 Nov. 2017. P. 158—161.
8. Карпунин А. А., Козлов А. А. Анализ методов реализации децентрализованных приложений в конструкторско-технологической информатике // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2017. № 4(168). С. 39—44.
9. Cai H., Xu B., Jiang L., Vasilakos A. V. IoT-Based Big Data Storage Systems in Cloud Computing: Perspectives and Challenges // IEEE Internet of Things J. 2017. V. 4. № 1. P. 75—87.
10. Marjani M., Nasaruddin F., Gani A., Karim A., Hashem I. A. T., Siddiqua S., Yaqoob I. Big IoT Data Analytics: Architecture, Opportunities, and Open Research Challenges // IEEE Access. 2017. V. 5. P. 5247—5261.
11. Preden J. S., Tammemäe K., Jantsch A., Leier M., Riid A., Calis E. The Benefits of Self-Awareness and Attention in Fog and Mist Computing // Computer. 2015. V. 48. № 7. P. 37—45.
12. MQTT.org official webpage. Available online: <http://mqtt.org/> (дата обращения: 12.04.2021).
13. Barhamgi M., Perera C., Ghedira C., Benslimane D. User-centric Privacy Engineering for the Internet of Things // IEEE Cloud Computing. 2018. V. 5. № 5. P. 47—57.
14. Fraga-Lamas P., Fernández-Caramüs T. M., Castedo L. Towards the Internet of Smart Trains: A Review on Industrial IoT-Connected Railways // Sensors. 2017. V. 17(6). № 1457. P. 1—44.
15. Fraga-Lamas P. Enabling technologies and cyber-physical systems for mission-critical scenarios. Ph. D. dissertation, Dept. Electrynica y Sistemas, Univ. Coruca, Galicia, Spain, May 2017. <http://hdl.handle.net/2183/19143>
16. Fraga-Lamas P., Fernández-Caramüs T. M., Subrez-Albela M., Castedo L., González-López M. A Review on Internet of Things for Defense and Public Safety // Sensors. 2016. V. 16(10). P. 1644.
17. Landau S. Making Sense from Snowden: What's Significant in the NSA Surveillance Revelations // IEEE Security and Privacy. 2013. V. 11. № 4. P. 54—63.
18. Стадные вопросы о биткойнах [Электронный ресурс]. URL: <https://blog.sibirix.ru/2017/07/10/bitcoin/#1> (дата обращения: 12.04.2021).
19. Акст Р. Что такое Смарт-контракт. или Ethereum за час. — ЛитагентРидеро, 2017. — 39 с.
20. Как умные контракты изменят нашу жизнь [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/company/exante/blog/321548/> (дата обращения: 12.04.2021).
21. Shakhnov V. A., Kurnosenko A. E., Demin A. A., Vlasov A. I. Industry 4.0 Visual Tools for Digital Twin System Design // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. V. 1295. P. 864—875.
22. Prudius A. A., Karpunin A. A., Vlasov A. I. Analysis of machine learning methods to improve efficiency of BIG DATA processing in industry 4.0 // J. Physics: Conference Series. 2019. V. 1333, Is. 3. № 032065.

ANALYSIS OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY DEVELOPMENT TRENDS IN THE IMPLEMENTATION OF THE INDUSTRY 4.0 CONCEPT

A. A. Karpunin, V. D. Kirilin, P. O. Repnikov, M. A. Usyukin
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The article analyzes the main advantages of blockchain technology and features of their application. It is shown that considering blockchain technologies from the point of view of a mathematical structure for storing data with a high level of security, a wide area of innovative application in various fields is possible. The features of the "smart contract" technology implementation are briefly considered from the point of view of its use to ensure security and automate transactions. The main attention is paid to distributed information and design systems. New use cases for blockchain have been proposed that differ from their non-blockchain counterparts and provide transparency, security and ease of use. This article is devoted to the analysis of the advantages and problems that arise when using blockchain for developing Industry 4.0 applications. In addition, this article provides a detailed overview of the most relevant blockchain applications for Industry 4.0 technologies. The article proposes a methodology for Industry 4.0 application developers, which allows the use of blockchain tools to improve cybersecurity industrial applications.

Keywords: Industry 4.0, blockchain, Internet of things, cyber-physical systems, BigData.

Карпунин Алексей Александрович, старший преподаватель.

E-mail: AlexK811@yandex.ru

Кирилин Вадим Дмитриевич, бакалавр.

E-mail: neytrino450@gmail.com

Репников Павел Олегович, бакалавр.

E-mail: rtfiof@gmail.com

Усюкин Михаил Александрович, бакалавр.

E-mail: miguelus@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 12 апреля 2021 г.

**БЛАНК-ЗАКАЗ НА ПОДПИСКУ 2021 г.
на издания ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»**

Наименование издания	Периодичность в год	Цена 1 экз., руб.	Кол-во выпусков в год	Общая сумма, руб.
Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России	4	1550,00		
Конструкции из композиционных материалов	4	1700,00		
Экология промышленного производства	4	1500,00		
Информационные технологии в проектировании и производстве	4	1750,00		
Вопросы защиты информации	4	1750,00		
<i>В цену включены: НДС — 10 % и стоимость почтовой доставки.</i>				

Поставка журналов подписчикам через издательство осуществляется почтовыми бандеролями с приложением всех необходимых бухгалтерских документов.

Наши реквизиты:

Полное наименование организации: _____

Сокращенное наименование организации: _____

ИНН/КПП _____

ОКПО _____

Расчётный счёт № _____ в _____

к/с _____ БИК _____

Юридический адрес: _____

Почтовый адрес: _____

Контактное лицо _____ тел. _____

E-mail: _____

(Для оформления счёта и бухгалтерских документов просьба заполнить все строчки).

Справочно:

Заполненный бланк-заказ просьба отправить по факсу: 8(495) 491-44-80 или

E-mail: secretariat@ntckompas.ru

Более подробную информацию об изданиях и подписке можно получить по телефону:

8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-20.

E-mail: ivleva@ntckompas.ru

Адрес редакции: 125424, Москва, Волоколамское шоссе, д.77.

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».