ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 121 за 2016 г.

ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Карташев В.А., Павловский В.Е., Платонов А.К., Сазонов В.В., Соколов С.М., Ярошевский В.С.

Опыт создания алгоритмов и программ для управления роботами (организация работ и пути повышения надежности роботов)

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Опыт создания алгоритмов и программ для управления роботами
(организация работ и пути повышения надежности роботов) / В.А.Карташев [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2016. № 121. 32 с. doi:10.20948/prepr-2016-121
URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-121

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша
Р о с с и й с к о й а к а д е м и и н а у к

В.А. Карташов, В.Е. Павловский, А.К. Платонов, В.В. Сазонов,
С.М. Соколов, В.С. Ярошевский

ОПЫТ СОЗДАНИЯ АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ

(*организация работ и пути повышения надежности роботов*)

Москва — 2016

В.А. Карташов, В.Е. Павловский, А.К. Платонов, В.В. Сазонов, С.М. Соколов, В.С. Ярошевский. Опыт создания алгоритмов и программ для управления роботами (*организация работ и способы повышения надежности роботов)*

С позиций системного анализа рассматриваются пути сокращения сроков успешной разработки алгоритмического и программного обеспечения роботов с учетом особенностей их механики, электроники и технологических обстоятельств применения. Вместе с этим описываются и способы увеличения надежности робототехнических систем. Работа построена на базе опыта создания большого числа систем управления и их модельного, математического, алгоритмического и программного обеспечения для широкого ряда роботов, отличающихся назначением и конструктивным устройством.

Ключевые слова: мобильные роботы, манипуляторы, шагающие машины, робототехника, PERT, программное обеспечение робота, надежность робота.

V.A. Kartashev. V.E. Pavlovsky, A.K. Platonov, V.V. Sazonov, S.M. Sokolov, V.S. Yaroshevsky. Experience of the Robot's Control Algorithms and Software Building (*working management & methods of the robot's reliability increasing)*

This paper introduces positions of system analysis concept on shortening of time needed for robot's algorithms and software successful development with taking into consideration the mechanic, electronic and technological circumstances. The means of the increasing of the robot's work reliability are also considered. The work is based on the experience of creation of great number of control systems and software for a wide number of the robots, different by appointment and the constructive scheme.

Keywords: mobile robot, manipulators, walking machines, robotics, PERT, robot's software.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 3
АНАЛИЗ ОПЫТА РАЗРАБОТОК ПО ДЛЯ РОБОТОВ 14
Сроки создания робота и особенности последнего этапа работ 144
Оптимальная организация работ 18
ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ РТС 19
Обеспечение правильности программного обеспечения робота 19
Проблема обеспечения надежности программного обеспечения робота 255
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 30
ЛИТЕРАТУРА 31

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 16-19-10705 и гранта РФФИ № 15-08-06431

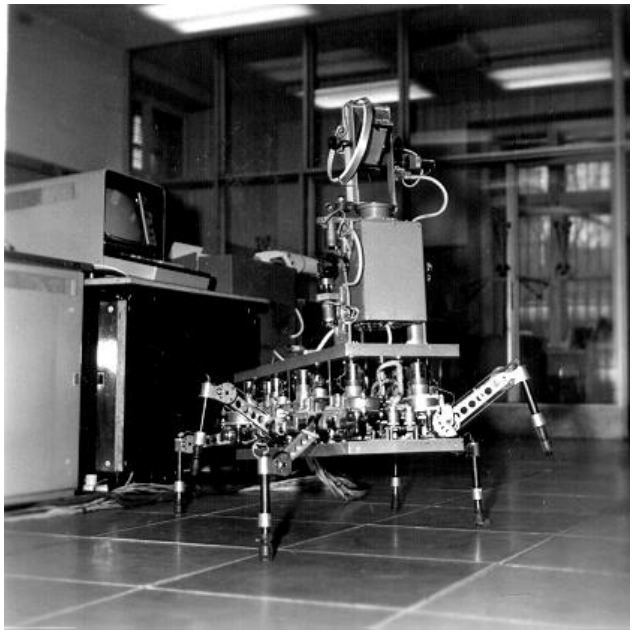
ВВЕДЕНИЕ

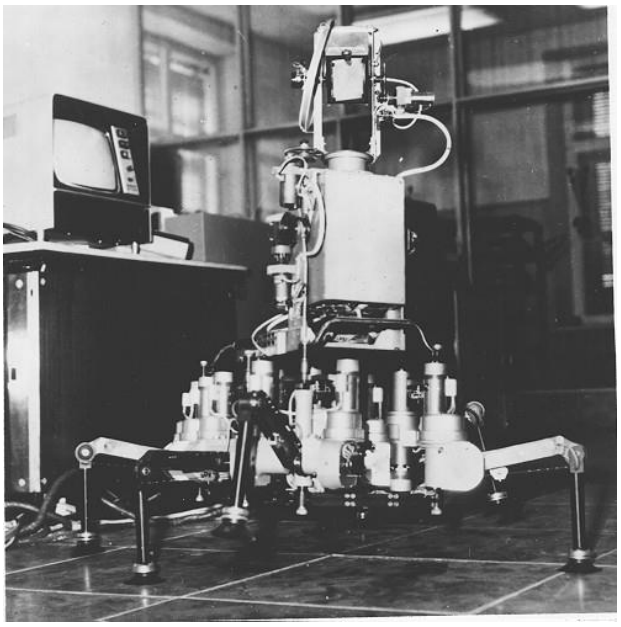
Хорошо известно, что заметные трудности создания нового образца робота, и тем более – робототехнической системы (РТС), связаны с организацией взаимодействия его четырех взаимозависимых функциональных составляющих, которые могут быть обозначены как: *механизмы, энергетика, электроника, программы (алгоритмы).* Основные проблемы взаимодействия таких разнородных элементов связаны с созданием требуемого алгоритмического и программного обеспечения системы управления роботом. Ниже показываются причины возникновения этих проблем и предлагаются способы их решения. При этом делается попытка системного анализа проблемы создания ПО РТС.

Работа построена на базе опыта создания систем управления и их модельного, математического, алгоритмического и программного обеспечения для широкого ряда роботов (некоторые из них показаны на рис. 1 – 10), отличающихся назначением и конструктивным устройством [1]-[39]:

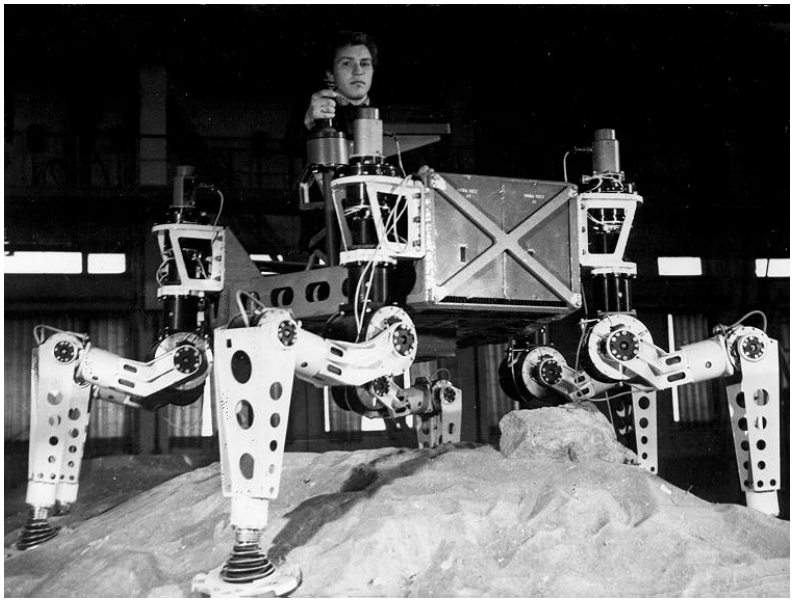
1. шагающих статически устойчивых шестиногих и четырехногих машин, управляемых лазерным дальномером;
2. бегающей двуногой машины;
3. прыгающей четырехногой машины;
4. четырехколесного мобильного автономного робота с автомобильным типом движителя и лазерным дальномером;
5. трехколесных автономных мобильных роботов с дифференциальным и всенаправленным приводами колес;
6. малогабаритного гусеничного транспортного робота;
7. одноруких манипуляционных сварочных роботов трех типов;
8. одноруких роботов для автоматической сборки изделий машиностроения;
9. двурукого манипуляционного робота для автоматической сборки изделий машиностроения под контролем технического зрения с созданием необходимой технологической оснастки;
10. однорукого и двурукого промышленных роботов для автоматической сборки изделий машиностроения;
11. роботов для выполнения высокоточных измерений в машиностроении;
12. робота для высокоточной лазерной резки с линейным двигателем привода;
13. роботизированного вагона-лаборатории для контроля путевого хозяйства Забайкальской железной дороги;
14. роботизированных систем метрологии для контроля продукции и проверки образцовых приборов;
15. манипуляционного робота со зрительной обратной связью в контуре управления для функционирования в динамически изменчивой среде;
16. манипуляционных и подвижных роботов, управляемых через сеть интернет с большими задержками в цепях зрительной обратной связи;
17. биомехатронного тренажера для реабилитации мышечной активности спинальных больных.

Для всех перечисленных работ в ИПМ им. М.В. Келдыша были разработаны *математические модели*, используемые в контуре управления движением, и *алгоритмы построения требуемых движений*.





Два шестиногих робота, управляемых лазерным дальномеров от ЦВМ М-6000.
(ИПМ им.М. В.Келдыша, ЛМИ «Военмех» и ВНИИТрансмаш (1970-1975 гг.) [1,2]



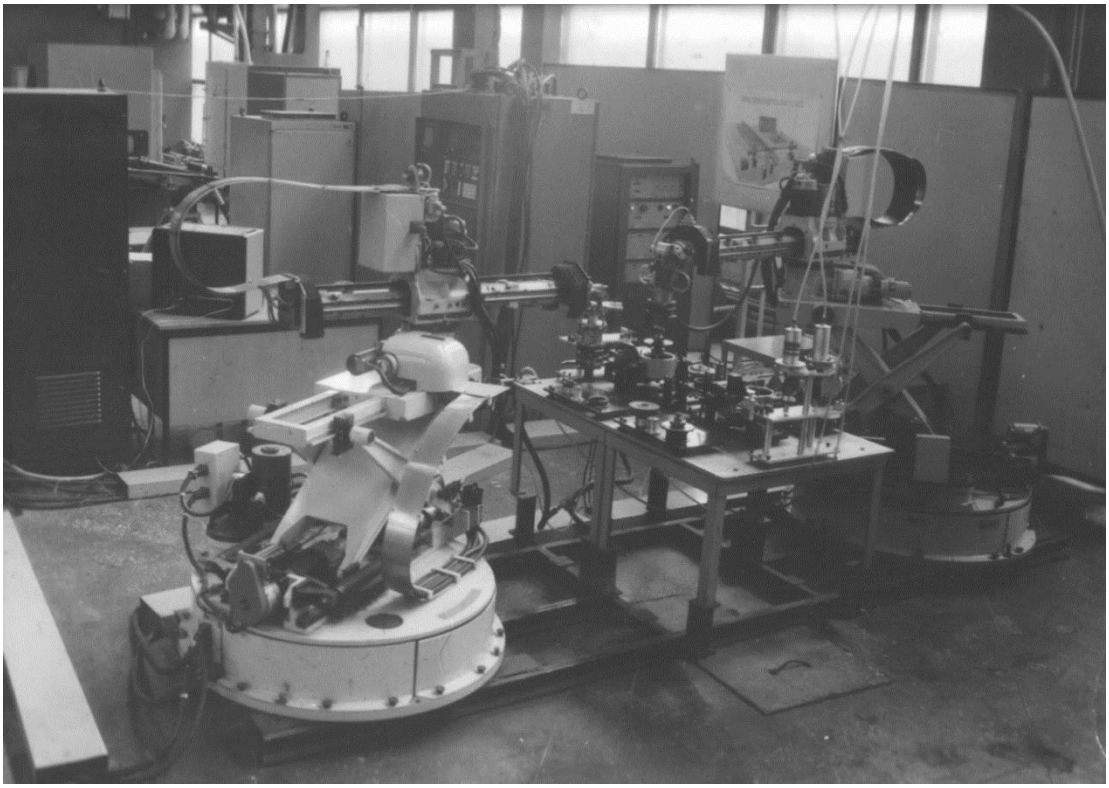
НМША – натурный макет шагающего аппарата (1975-1990 гг.)
(ИПМ им.М. В.Келдыша, ВНИИТрансмаш, ИМехМГУ, ЛМИ «Военмех» [3])

СУША – система управления НМША

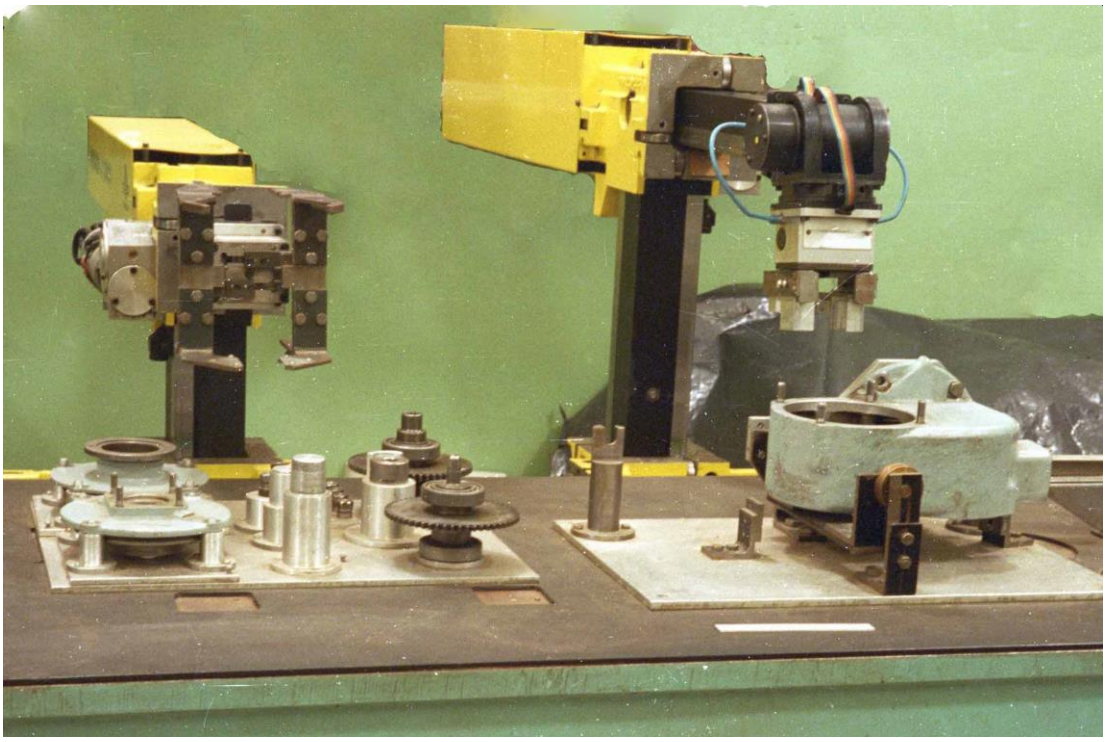
(по каналу и через общую память,
связка из шести Электроник 60)
ИПМ им. М.В. Келдыша,
ВНИИТрансмаш

Рис. 1. Разработки алгоритмов и систем управления для шагающих роботов

Решение проблемы роботизации сборочных процессов в машиностроении

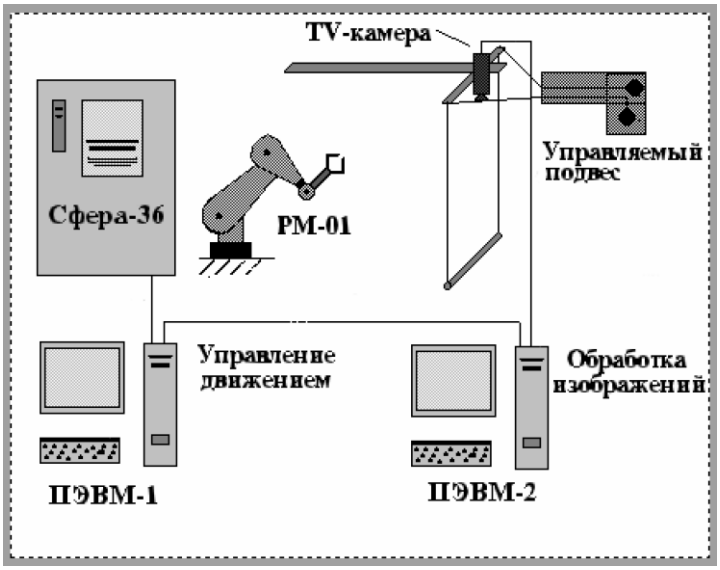


РТС сборки редуктора роботом Универсал-5 (*ИПМ им. М.В. Келдыша, ЦНИТИ* [4])

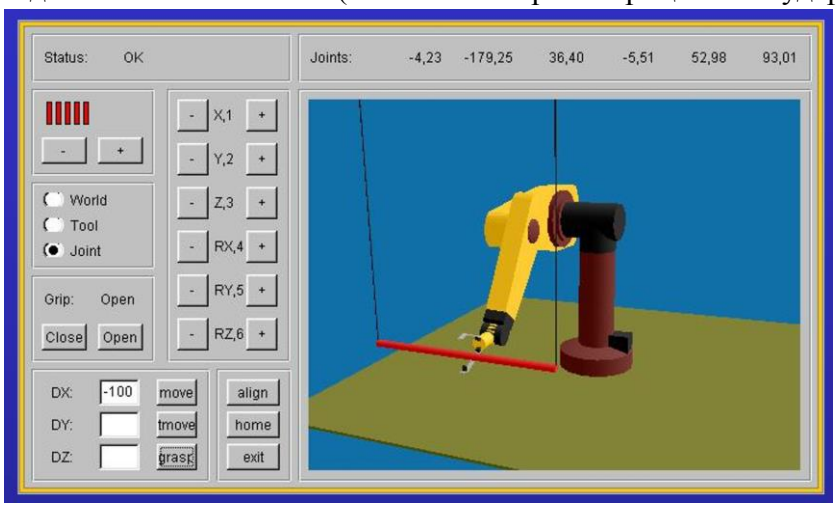


РТС сборки редуктора двуруким роботом Прагма (*ИПМ им. М.В.Келдыша* [5])

Рис. 2. Системы управления, их алгоритмы и программы для сборочных РТС

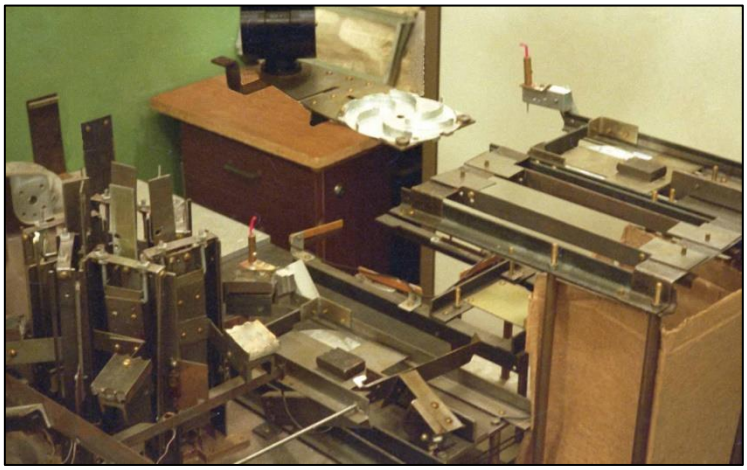


Система «Глаз-рука» ИПМ им. М.В. Келдыша с алгоритмами работы манипулятора с подвижными объектами (захват и бинарные прицельные удары [6,7])

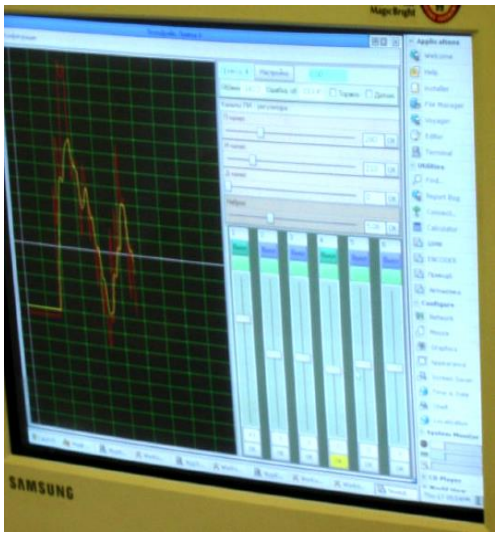


Пульт управления этим процессом через Интернет (*ИПМ им. М.В. Келдыша* [8])

Рис. 3. Алгоритмы и программное обеспечение зрительной обратной связи для робота-манипулятора

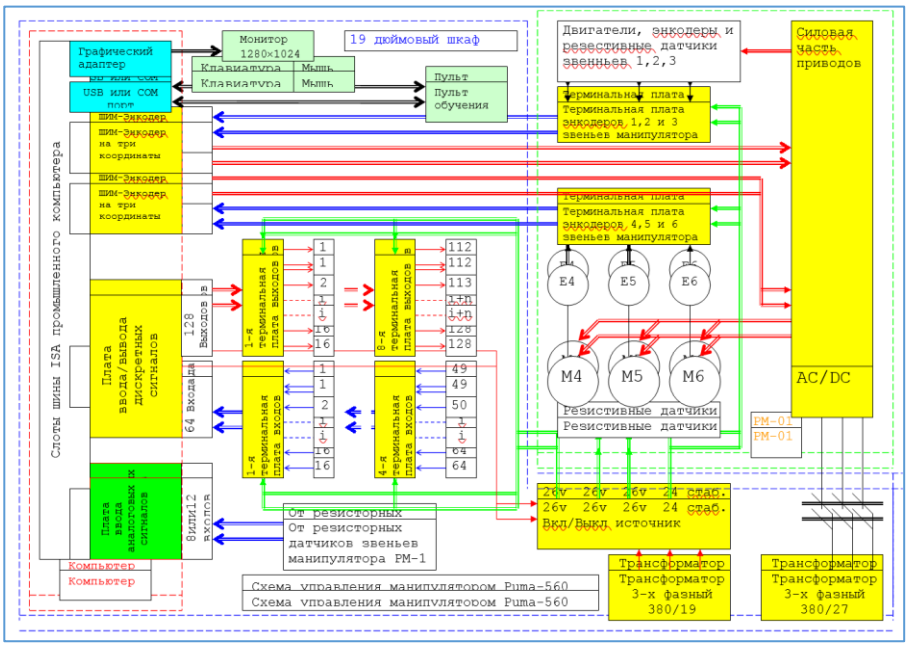


Разработка технологии и требуемой технологической оснастки для системы роботизированной сборки лопаток турбинки пылесоса (*ИПМ им. М.В. Келдыша* [9])



Интерфейс оператора настройки привода на 6 приводов (выполняются предварительная настройка параметров на имитаторе и затем на реальном двигателе — окончательная корректировка предварительной настройки) в операционной системе реального времени QNX v6.1

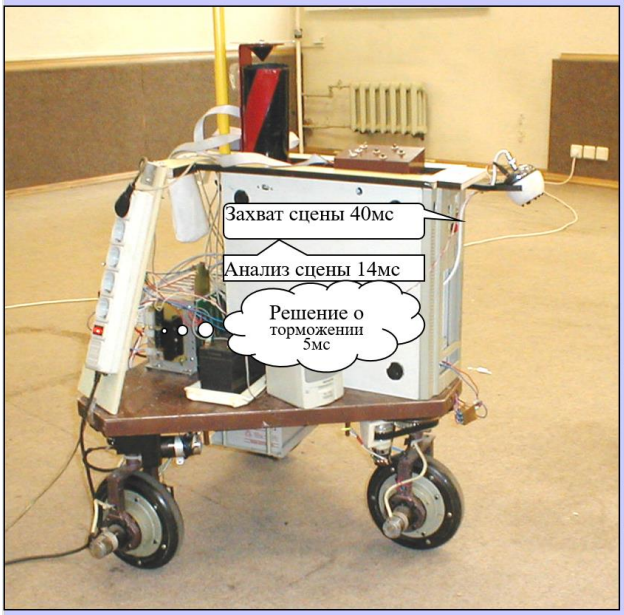
Общий вид совместной с Украиной разработки системы управления манипулятором РМ-01 (*Киевский филиал Украинско-российского акционерного общества «Системы реального времени – Украина» и ИПМ им. М.В. Келдыша 2003 г.* [10])



Реализованная схема системы управления промышленного типа

Рис. 4. Разработки промышленных РТС и их систем управления

Рис. 5. Неоднократный победитель соревнований роботов "Аргонавт-3" с дифференциальным приводом и круговым зрением [11]



В режиме реального времени с разрешением ТВ-сцены (640px)×(480строк) удалось получить время простой двигательной реакции робота 60мс, соизмеримое с таким временем у человека

Мобильный робот Трикол и архитектура системы управления его зрительным поведением

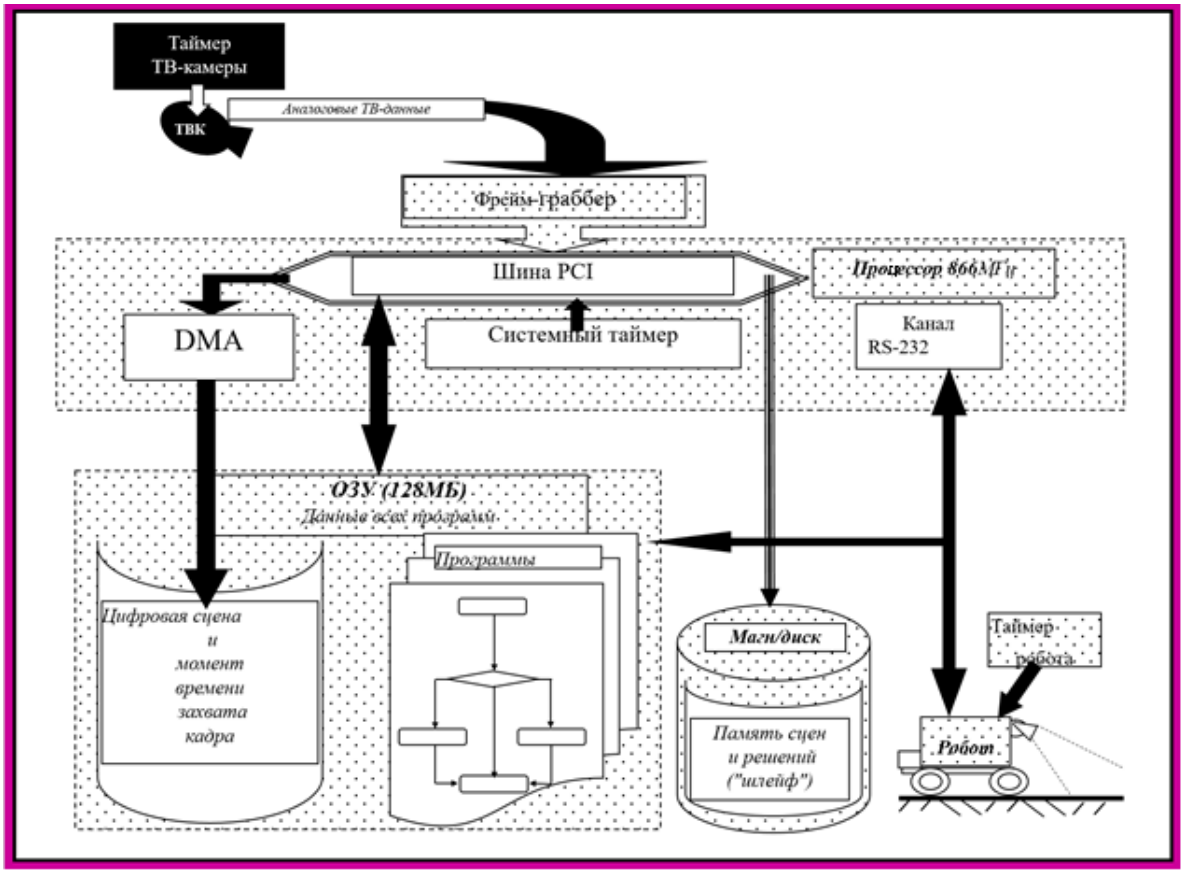


Рис. 6. Зрительный канал мобильного робота [12]

Система управления всенаправленным движением робота Трикол (*1998-2009*)

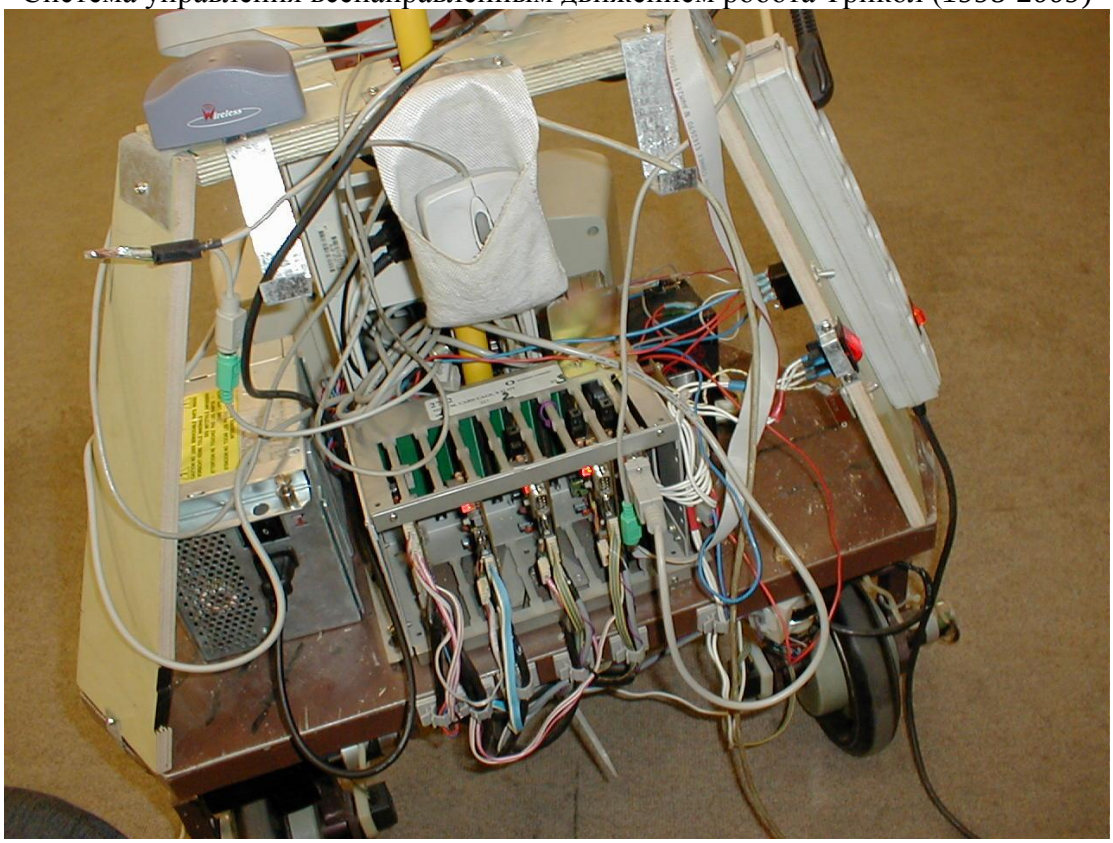
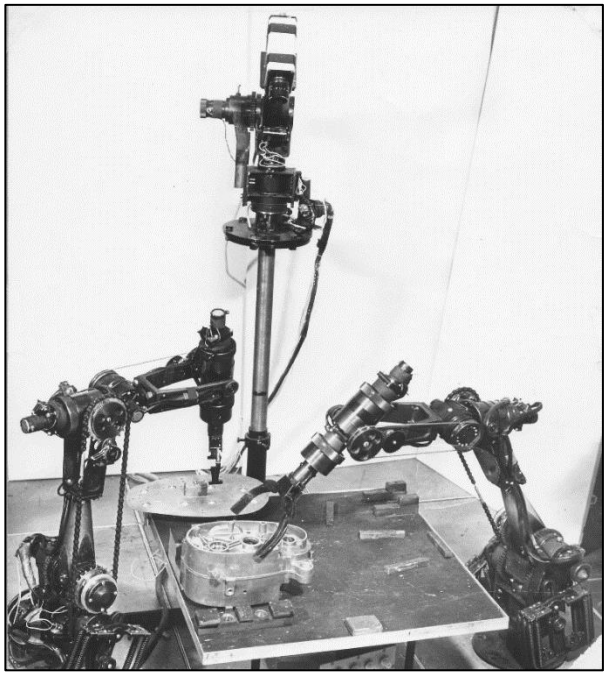
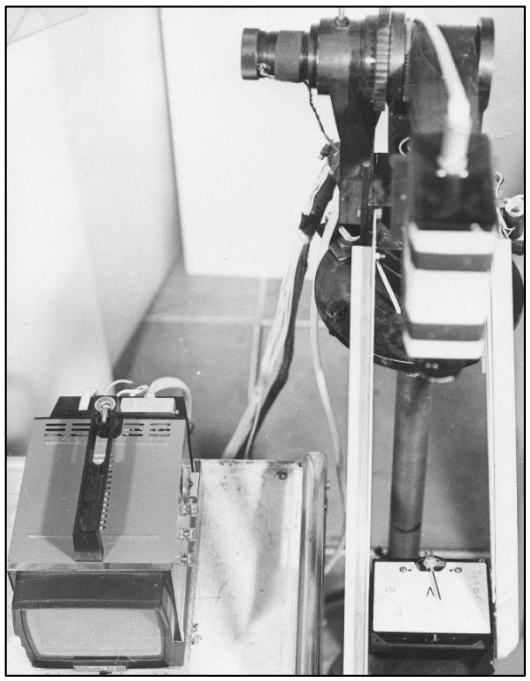


Рисунок показывает, что система управления содержит пять процессоров на трёх уровнях управления [13]

Рис.7. Программное обеспечение многопроцессорной системы управления



СТЗ в системе сборки картера мопеда

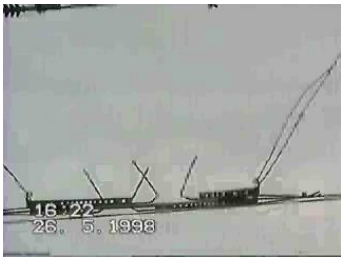


СТЗ контроля стрелочных приборов

СТЗ для контроля чистоты и грансостава металлического порошка (*ИПМ им. М.В. Келдыша – ВИЛС*)

СТЗ для контроля чистоты жидкости в емкостях на конвейере (*ИПМ им. М.В. Келдыша – «Кристалл»*)

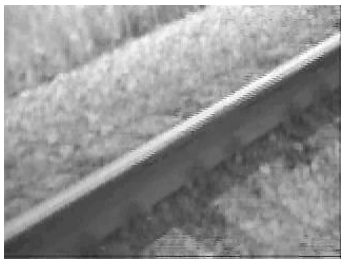
Рис. 8. Разработка зрительного очувствления промышленных систем [14-17]



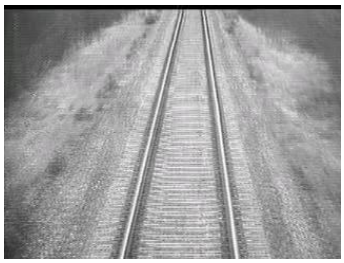
Контроль возникновения и продолжительности электрической дуги

Определение положения контактного провода по высоте и в плане *(над пантографом электровоза – реальные условия эксплуатации)*

Верификация моделей колебательных процессов контактной сети на скоростных участках



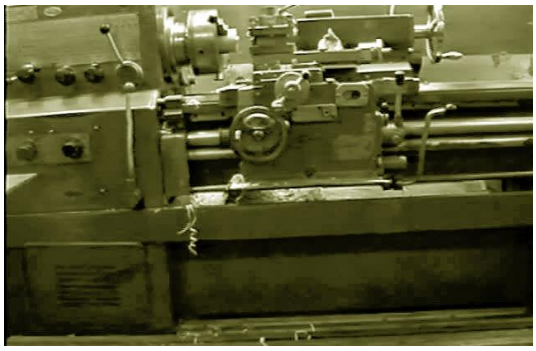
Считывание технологических меток с шейки рельса

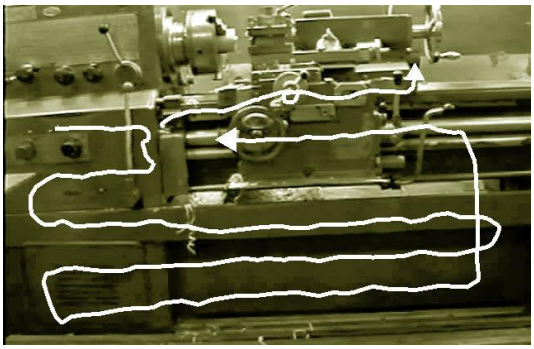


Контроль *плеча балластной призмы* — размера от внешнего края шпал до границы щебня

Контроль надернутых костылей, шпал и шпальных ящиков

Системы зрительного контроля объектов инфраструктуры железной дороги



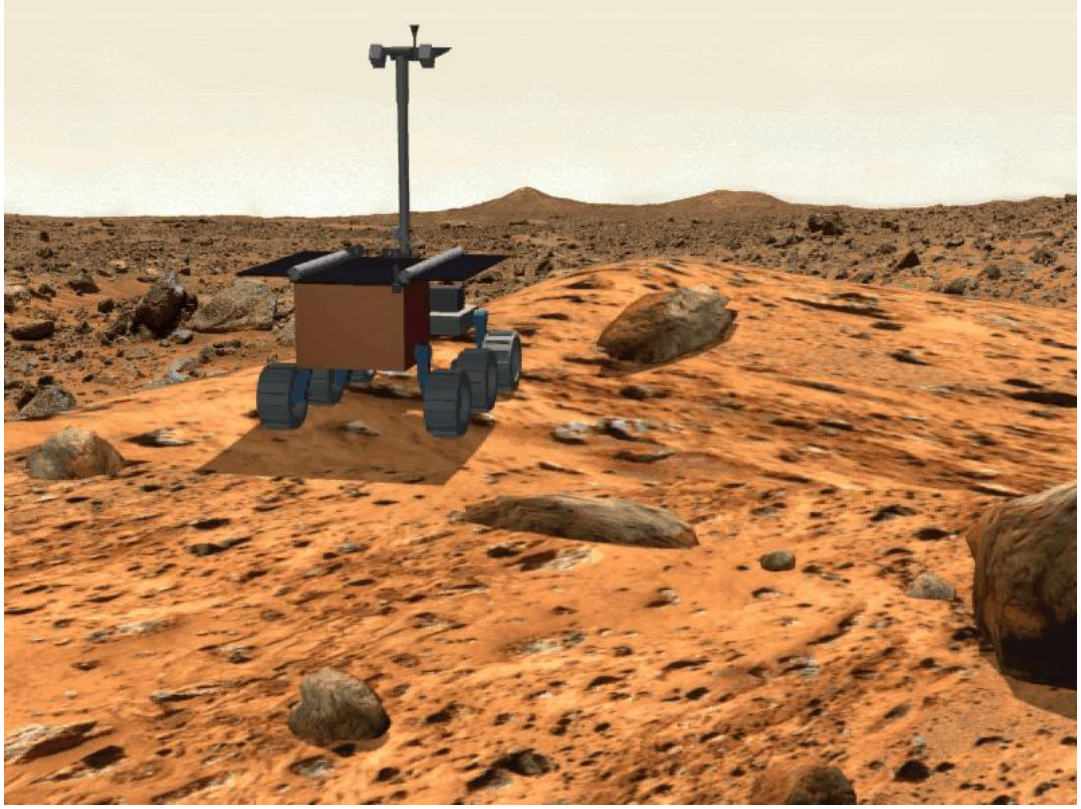


Зрительный смотр токарного станка

Зрительный осмотр помещения

Рис.9. Программное обеспечение систем технического видения [14-17]

Опытный образец гусеничной платформы мобильного робота



Моделирование динамики и управления движением европейского марсохода, *ВНИИТрансмаш, ИПМ Келдыша, ИМехМГУ (2004 г.)*

Рис.10. Макетирование и моделирование конструкции мобильных роботов [18]

В работах [1] и [4-12] было разработано ***программное обеспечение*** *систем управления* макетами и 5 конкретными образцами разрабатываемых в промышленности и выпускаемых промышленных роботов.

В работах [1, 4, 5, 7, 8, 9, 13 и 14] были разработаны ***макеты*** и устройства ***мехатронных систем управления*** роботами с их *системным* программным обеспечением и *инструментальными средствами* для создания программного обеспечения и выпуска сопутствующей документации.

В работе [5] в процессе молодежных фестивалей с соревнованиями студенческих роботов по теме «Интеграция» были получены первые результаты разработок алгоритмов и программных систем *построения* **поведения** роботов. Один из авторов данной работы (В.Е. Павловский) на протяжении ряда лет является заслуженным победителем отечественных и зарубежных соревнований мобильных роботов.

Работы [1] и [4] выполнялись в содружестве с ИМехМГУ, ЛМИ «Военмех», Волгоградским политехническим университетом, ВНИИТрансмаш, ОКБ «Баррикады», ОКБ «Родина» и ОКБ МинРыбопрома.

Работы [6-12] выполнялись совместно с головными институтами отечественной промышленности (МОП, МинПрибор и МинЭлектротехпром) и в тесном сотрудничестве с Ленинградским вычислительным центром АН СССР.

Работа [13] выполнялась совместно с Госстандартом (дополнительно было подготовлено 3 ГОСТа по программному обеспечению роботов).

Один из авторов настоящей работы (А.К. Платонов) на протяжении десятилетия возглавлял Рабочую группу (РГПО) ГКНТ по созданию программного обеспечения промышленных роботов, состоящую в основном из программистов роботов в технологических институтах промышленности. Другой автор (С.М. Соколов) возглавлял аналогичную Рабочую группу ГКНТ по промышленным системам технического зрения. Опыт этих работ также изложен ниже.

Работы по созданию роботов в России были приостановлены в связи с политическими и экономическими преобразованиями 1990–1991 гг. В течение этого периода и вплоть до настоящего времени в основном развивались студенческие исследования и кое-где приобретались роботы, разработанные за рубежом, где развитие робототехники активно продолжается. Эта работа написана в надежде на возрождение отечественной робототехнической промышленности.

АНАЛИЗ ОПЫТА РАЗРАБОТОК ПО ДЛЯ РОБОТОВ

Опыт перечисленных работ показывает, что фундаментальное значение для построения эффективных алгоритмов имеют два обстоятельства, связанные с организацией разработки робота и с особенностями работы его мехатроники.

Сроки создания робота и особенности последнего этапа работ

Эти особенности связаны с необходимостью разделения труда и моментов времени работы специалистов разного профиля при создании средств

нужного робототехнического комплекса (РТС). Если не учитывать особенности интегрального характера устройств мехатроники робототехнических комплексов и широты областей их использования, то успеха в создании нового робота не будет, хотя, возможно, сам робот и будет создан. И если он будет создан, то затем непременно возникнут проблемы с его программным обеспечением (ПО), а далее – с обстоятельствами внедрения робота в технологию процессов области его применения. По этим причинам погибло много отечественных разработок.

Следует учитывать, что полный процесс разработки нового робота состоит из следующих наименований работ (их сетевой PERT-график с возможными сроками показан ниже):

a. *Выполнение эскизного проекта РТС.*
b. *Выполнение рабочего проекта робота.*
c. *Изготовление элементов механики, приводов, электроники и сенсорики.*
d. *Выполнение рабочего проекта системы управления (СУ) роботом.*
e. *Изготовление электроники системы управления роботом вместе с системным программным обеспечением нижнего уровня.*
f. *Изготовление простейшего тестового программного обеспечения робота.*
g. *Соединение результатов работ пп. c, e, f в конструкции робота с его СУ.*
h. *Проведение испытаний робота на тестовых примерах тестового ПО.*
i. *Разработка функционального программного обеспечения робота (ФПОР).*
j. *Разработка диагностического программного обеспечения робота (ДПОР).*
k. *Проведение испытаний ФПОР и ДПОР с участием программистов и разработчиков робота.*
l. *Разработка документации для серийного изготовления робота.*
m. *Разработка технической документации робота.*
n. *Разработка операционной документации для пользователей робота.*
o. *Разработка учебных примеров для средств диагностики робота.*
p. *Разработка рабочего проекта использования робота в предметной области.*
q. *Разработка проекта технологической оснастки в составе РТС (ТО РТС).*
r. *Изготовление образцов ТО РТС.*
s. *Разработка технологического программного обеспечения (ТПО) РТС.*
t. *Разработка диагностического программного обеспечения РТС (ДПОРТС).*
u. *Разработка инструментального программного обеспечения (ИПО), необходимого для изготовления управляющих программ (УП) для работ РТС.*

v. *Разработка учебного программного обеспечения (УчПО) для подготовки специалистов-операторов РТС.*
w. *Проведение испытаний ФПО, ТПО, ДПОРТС, ИПО и УчПО.*
x. *Изготовление образцов УП для конкретного применения РТС.*
y. *Проведение испытаний робота, ТО РТС и УП на примерах применения РТС с участием разработчиков РТС и специалистов из области его применения.*
z. *Разработка документации для серийного изготовления РТС.*
aa. *Разработка технической документации РТС.*
bb. *Разработка операционной документации для пользователей РТС.*
cc. *Разработка учебных примеров УП РТС.*
dd. *Разработка учебных примеров для средств диагностики РТС.*

- Видно, что серьезный проект по созданию РТС содержит количество работ больше числа букв латинского алфавита. В реальной истории отечественной робототехники не все перечисленные работы выполнялись. Наиболее часто при разработке отечественных роботов пропускались пп. a, d, i, j, k, а работы по изготовлению документации обычно исполнялись формально и не полностью.
- Отечественные РТС чаще всего исполнялись *без проекта* – «по месту».
- Как правило, робот, его программное обеспечение и технология применения разрабатываются в разных организациях и иногда – с задержкой конца их работ.
- Серьезным обстоятельством является необходимость *иметь работающий* робот для выполнения работ по созданию его целевого программного обеспечения и, в свою очередь, необходимость иметь робот *с полноценным функциональным программным обеспечением* для разработки технологии его применения в составе РТС. Задержки этих работ приводят к сдвигу конца всех работ.
- Способы реализации технических решений и качество получаемых результатов работ, как правило, *поэтапно противоречивы* — простые решения на предыдущих этапах обычно приводят к усложнению содержания работ на последующих этапах или к падению качества конечного продукта.
- Важным обстоятельством многоэтапных работ является обычно необходимые при новых разработках *частые изменения* принятых ранее решений.
- Следует отличать содержание упомянутых работ при создании РТС для эксплуатации его силами разработчиков и для передачи его заказчикам с обеспечением надежной работы в пределах гарантийного срока и поддержанием ремонтных работ в последующее время.
- Если РТС создается на базе покупного робота, то из этого списка выпадают пп. b, c и, возможно, d, e. Остальные этапы остаются необходимыми для самостоятельного выполнения, и, возможно, это оказывается более тяжелым для исполнения вариантом (из-за непонимания в момент покупки

имеющихся ограничений параметров и условий использования оборудования).

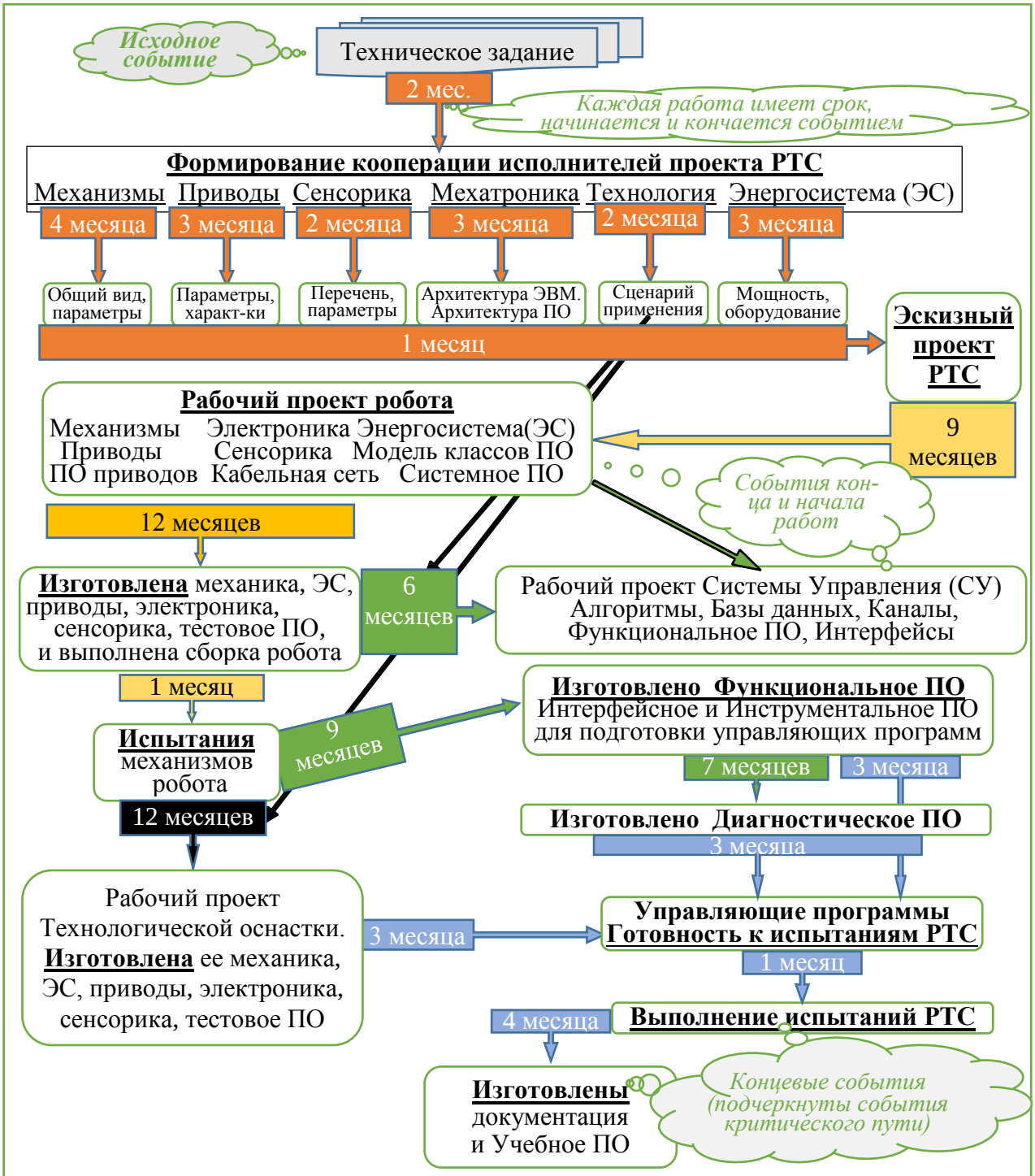


Рис.11. Сетевой PERT-Time график работ по созданию РТС с необходимыми программами

График показывает, что работы по созданию ПО робота могут начаться не ранее подготовки рабочего проекта мехатроники робота, могут развернуться после изготовления мехатроники робота и закончиться лишь после испытаний робота.

Минимальные сроки завершения работ: ~3,5 года – робот с ПО, ~4,5 года – для РТС, и около полугода требуется для разработки требуемой документации и учебного ПО.

Упомянутые противоречивые технические решения, снижающие качество конечного продукта (а иногда и убивающие его) обычно возникают *на трех важных границах* последовательности этапов: границах этапов создания робота, его программного обеспечения, создания РТС и внедрения робота в область применения. Причины этих противоречий – в несовпадении интересов и профессиональных знаний конструкторов механики, электроники, программистов и специалистов предметной области (технологов, врачей, военных и др.), что особенно проявляется, когда это – люди разных организаций с разными функционалами оптимизации своих решений и временными приоритетами.

Такой состав и причинно-следственные взаимосвязи приведенных обстоятельств присущи любым многоэтапным работам со сложным составом исполнителей. Они формально хорошо описываются графами систем Сущность-Атрибуты-Связи («EAR-диаграммы») объектно-ориентированного проектирования и системами сетевого управления PERT-TIME или PERT-COST. Системы PERT эффективно используют механизмы «планирования снизу», которые в отечественной практике по ряду причин, увы, не прижились. Эти системы опираются на компьютерные механизмы *регулярного прямого общения* высшего уровня руководства проекта с руководителями низшего звена в смежных организациях, собираемых в самом начале работ в коллектив «ответственных исполнителей» (по определению: «*ответственный исполнитель — это человек, владеющий полной информацией о состоянии работ в подчиненном ему коллективе*»).

Оптимальная организация работ

Опыт выполнения упомянутых работ показал крайнюю важность следующих моментов для успешной реализации такого многоэтапного проекта:

1. Особенности интегрального характера разработки робота и/или РТС настоятельно требуют реализации ***системного*** подхода к управлению с *общим* руководством и курированием разработок на всех этапах.
2. Функционалами технической политики руководства проекта должны быть принятые *критерии **терминальных** качеств* получаемого продукта (цены, времени разработки, скорости, точности, уровня интеллекта и т.п.), вместо отдельных и взаимно противоречивых оптимизаций конструкции, программ и технологических обстоятельств на этапах.
3. Неминуемая противоречивость важных частных критериев ***неизбежно приводит** к существованию критериального множества Парето*, что в соответствии с теорией многокритериальной оптимизации [19] означает необходимость иметь *единое лицо, принимающее решение* (ЛПР).
4. Опыт показывает, что функции технического руководителя по разработке робота или РТС, имеющего в своем подчинении технических руководителей

этапов конструкции, электроники, сенсорики, программного обеспечения и технологической оснастки РТС, лучше всего исполняет руководитель **конечного** *этапа работ*, поскольку именно здесь вскрываются ранние ошибки. При этом обеспечивается профессиональное понимание значимости *терминальных* критериев с возможностью их разумного выбора на множестве Парето по главным критериям *цена-качество-срок*.

5. С этой позиции ***системно*** (с точки зрения *влияния на работы последующих этапов*) на уровне этого руководства **с обязательным участием** руководителей разработок механики, электроники, сенсорики, программного обеспечения и технологической оснастки РТС должны рассматриваться и документально оформляться все предлагаемые в процессе выполнения проекта ***изменения*** *принятых ранее* технических решений.
6. Договорные *начала работ* последующих этапов должны быть привязаны не к абсолютным срокам, а ***к концу работ*** *предыдущего этапа*. Задача руководства проекта – **курировать** промежуточные сроки выполнения работ, не допуская изменения длительности со сдвигом конечных сроков, не забывая, при этом, о законе Брукса, т.е. о том, что "*добавление новых людей в процесс разработки программ лишь отодвигает сроки проекта*" [20].

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ РТС

Этот раздел работы построен на опыте наблюдений отечественной промышленной робототехники конца пошлого века и сравнения методов обеспечения правильной и надежной работы станочного и роботизированного оборудования заводами, выпускающими это оборудование.

Даже простое сравнение как себестоимости отечественных устройств ЧПУ станков или роботов, так и цен импортных (Тайвань) компьютеров того времени, *выпускаемых с гарантией и без гарантии качества*, показывало отношение 6:1. Еще большее отставание наблюдается при сравнеии объявляемых параметров «наработки на отказ» *роботов Японии (>1000 часов) и отечественных роботов (24 часа)* – без учета их трудно доказуемой верности для нового типа робота[1]. Вместе с этим было также известно, что в цену бытовой продукции Минрадиопрома закладывалось пятикратное обращение в гарантийный ремонт.

Обеспечение правильности программного обеспечения робота

Будем разделять «правильность» и «надежность» работы объектов техники.

---

[1] По определению: «*наработка на отказ является среднестатистическим параметром, определяемым на большом временном интервале работ в установившемся характере производственного процесса на большом количестве одинакового оборудования*».

Правильность работы, как известно, связывается *с отсутствием ошибок проектирования и брака при изготовлении* рассматриваемого объекта. **Надежность** работы здесь определяется шире понятия «отказобезопасности», это – способность к непричинению вреда (появлению брака) *при работе в обстоятельствах, не предусмотренных спецификацией условий* работы объекта.

Правильность работы объекта техники в заметной мере **зависит от проектного выбора** конструктивных материалов механики, элементной базы электроники, типа контактов, энергетической напряженности в силовых цепях, тепловых режимов, отношений сигнал-шум в элементной базе, защиты от внешних помех по питанию и по эфиру и от многих других проектных решений. От этих параметров в значительной мере зависит себестоимость объекта техники и его гарантийного обслуживания. Выбор этих параметров регулируется вероятностными расчетами.

Однако следует заметить, что наивысший уровень качества проектирования с точки зрения пользователя определяется тезисом: *«При проектировании надо думать не о том, как легче или дешевле сделать нужное, а о том, как легче и дешевле будет эксплуатировать и ремонтировать сделанное»*.

Иными словами, проектные решения с очевидностью требуют моделирования их последствий на этапе эксплуатации проектируемых изделий и, прежде всего, — их ремонтопригодности (не только для людей, но и, в будущем, – для роботов).

По этой причине правильный выбор проектных параметров робота ныне невозможен без использования в процессах проектирования современных средств САПР и стандартов концепции FMEA, FTA и DFX[2*)] [21-25] с их моделями износоустойчивости деталей и будущих ремонтов робота. Эти хорошо отработанные в США (начиная с 1949 г.) методики доказали свою эффективность как средства именно *профилактики отказов, а не реакции на них*. В связи с этим следует помнить, что при разработке и производстве любого изделия неизбежно действует **правило десятикратных затрат** фирмы «Дженерал Моторс» [22].

Острая необходимость обращения к комбинации широко используемых за рубежом методов проектного анализа FMEA, FTA и DFX ныне важна не только в связи с воспоминаниями о частых отказах роботов в советские годы, но и особенно в связи с тем, что уже и в 2014 г. на совещании руководителей радиоэлектронной промышленности было озвучено следующее: *«20% производимой электронно-компонентной базы не соответствуют требованиям надежности. До 40% выходов из строя входящей в состав военной техники*

---

*) **FMEA** (аббревиатура от **Failure Mode and Effects Analysis**, *анализ видов и последствий отказов*), FTA (от **Failure Tree Analysis,** *анализ дерева неисправностей*) и **DFX** (от **Design for X,** *Конструирование для …*) — стандартные способы, отчасти отраженные в ГОСТ 27.310-95, выполнения проектного анализа с целью выявления критических мест как проекта, так и процессов его реализации и эксплуатации.

радиоэлектронной аппаратуры происходит по причине отказов элементной базы» [25].

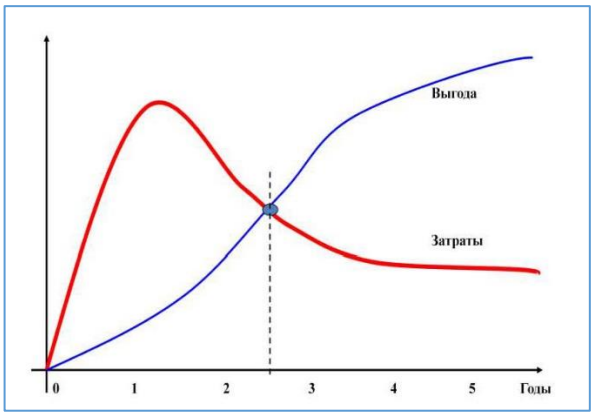


Рис. 12. Затраты и выгода от внедрения концепции и стандарта FMEA [22]

Но в наибольшей мере ***правильность*** работы используемого объекта техники **зависит от технологии** его изготовления. Такие технологические процессы, как борьба с детской смертностью элементной базы, контроль производства, а затем – набивки и пайки многослойных печатных плат, процессы вибрационных и температурных испытаний готовой продукции с петлями возврата и ремонта, контроль цеховой статистики брака с поиском его причин и многие другие способы поддержания качества изготовления, заметно усложняют и удорожают производство электронных составляющих робота и по этой причине часто отвергаются.

Применительно к технологии *правильного изготовления* элементов механики роботов важно упомянуть используемые для этого процессы литья под давлением металлических и пластиковых деталей, процессы порошковой металлургии, процессы композитной намотки изделий сложной формы, процедуры высокоточной механообработки на многокоординатном оборудовании с наименьшим числом смен станочных установок и крепежа обрабатываемых деталей, процессы их термо- и гальвано обработки, процессы изготовления деталей сложной формы на 3D-принтерах, высокоточной газовой, электродуговой и лазерной сварки и резки, процессы операционного и конечного контроля деталей гранитными измерительными системами, процессы притирки скользящих пар и процессы селективной и/или заказной сборки изделий в совокупности с формированием электропроводки, электро- и гидромеханики приводов и средств сенсорного очувствления.

Это подробное и, возможно, неполное перечисление технологических процессов понадобилось здесь для того, чтобы показать громадную сложность современного производства, которая *по необходимости* ***диктует ее косность***

и сопротивление изменениям *установившегося процесса*, даже если это и необходимо для улучшения выпускаемой продукции.

Однако в современном мире конкурентной борьбы *остро требуется умение* ***быстро перестраивать производство*** *на выпуск новых изделий*. И особенно важно это умение в интересах обороноспособности страны.

Очевидно, что это обстоятельство настоятельно диктует смену характера настройки, наладки и управления технологией производства, с внедрением управляемых компьютером гибких роботизированных систем станочного, инструментального и складского оборудования. При этом правильное изготовление выпускаемой таким производством продукции невозможно без непрерывного надзора и управления перенастройкой процессов такого производства.

Рис. 13. Автоматический завод по выпуску часов Swatch Sistem51 (2013 год)
«Полностью автоматическое производство не только удешевляет стоимость часов, но позволяет достичь непревзойденного швейцарского качества и «чистоты» сборки» [26].

Достаточно побывать на ВАЗе, чтобы увидеть и понять, что даже этот старый уже завод представляет собой большую компьютеризированную машину, налаженную на выпуск массовой продукции с заказной вариацией ее параметров и типов агрегатов. А наиболее ярким примером современного роботизированного производства является показанный на рисунке выше единственный в мире полностью автоматический швейцарский часовой завод по сборке уникальных по конструкции и по стоимости механических часов системы Sistem51 Irony [26].

Заметим, что известная формула «Спроектировано компьютером, изготовлено роботом» не исключает присутствие человека, а перемещает его (и его ошибки) из внутренности процесса производства *на верхний административный уровень* с задачами оперативного формирования и управления этим процессом с коррекцией ошибок.

Таким образом, нужно констатировать важное обстоятельство задачи обеспечения достаточно долгой правильной работы отечественного робота: лучше всего это можно обеспечить путем *изготовления роботов самими роботами*. В связи с этим обстоятельством становится ясной назревшая *необходимость* развития отечественной робототехники первым типом задач применения роботов: **формирование отечественных роботизированных производств для выпуска мехатронных изделий высокого качества с возможностью быстрой переналадки техпроцесса для выпуска новой продукции**.

По этому пути давно пошла робототехника Японии, начиная с известного автоматического завода фирмы Фанук, которая своими роботами делала роботы для продажи. В Москве тоже был сделан такой полностью автоматический завод с роботами для производства роботов (филиал завода «Красный Пролетарий»), который теперь варварски ликвидирован [27]. По мнению специалистов, лучшего предприятия по оснащению, чем «Красный пролетарий», в стране не было. Опыт эксплуатации этого завода крайне полезен. Он указывает на трудности реализации как бесперебойного снабжения завода исходными материалами, так и распределения по предприятиям страны выпускаемой продукции (при посещении завода в середине 80-х годов в июне месяце было видно, как в совершенно пустом цехе активно крутились станки и ездили цеховые роботы с продукцией, выпускаемой в тот день июня, как стало известно, с большим опережением — уже по плану августа месяца). В рамках рыночных отношений эти проблемы легче решаются, хотя тут возможны и свои проблемы, связанные с колебаниями спроса на роботов в рамках кризисных ситуаций и, главное, – **более дешевого человеко-часа по сравнению со стоимостью робото-час**а. Заметим, однако, что эта более высокая стоимость робота является необходимой платой за качество выпускаемой продукции.

Рис.14 Памятная марка

Описанный опыт времени развития отечественной робототехники [27, 28], подтверждаемый опытом зарубежных разработок, говорит о трех не простых обстоятельствах, заметно тормозящих развитие робототехники.

а) Приходится признать целесообразность выполнения работ по проектированию роботов и созданию средств их математического, алгоритмического и программного обеспечения средствами САПР робота и технологии его производства — *непосредственно на самом роботизированном предприятии* («у себя и для себя»).

б) С другой стороны — проектирование и производство новых «интеллектуальных» роботов с высоким уровнем автоматизма легче организовать только на *крупном фирменном объединении* проектных и производственных средств электроники и механики сенсорных и приводных систем (типа Sony или

Bosch). Это утверждение связано с тем, что элементы механики, электроники и сенсорики робота правильней не покупать *и приспосабливать*, а проектировать и изготавливать *специально* – применительно к задачам робота.

в) Отечественный и зарубежный опыт создания роботизированных производств (заводов и шахт) говорит о том, что намного легче, эффективнее (и, возможно, даже дешевле) *заново спроектировать и построить такое производство*, чем перестраивать инфраструктуру существующего уже предприятия. Дело в том, что робот мало полезен без специально для него созданной инфраструктуры технологического окружения.

Одним из примеров этого, вообще-то и так понятного, утверждения является успешный опыт внедрения робототехники на «Заводе им. Дегтярева» в г. Коврове (эта работа заслужила единственную Государственную премию по робототехнике в нашей стране). После ряда неудачных попыток внедрения роботов в производство мотоциклов «Ковровец» дирекция завода поняла, что внедрение робота требует разработки его технологического окружения и полной перестройки технологического процесса. Эта работа была поручена подразделению подготовки технологической оснастки предприятия. В свете сказанного выше это было совершенно верное решение: в качестве ЛПР был выбран технолог!

Специалисты этого подразделения роботизировали ряд цехов завода следующим образом. Они в пустом стандартном для того времени большом «финском ангаре» ставили нужные станки с выделенными для этой работы роботами и начинали вокруг них своими силами создавать и отлаживать техпроцесс очередного цеха без его остановки. Когда результат достигался, рабочие основного цеха переводились в ангар, где продолжала выполняться программа цеха по выпуску нужной продукции, но уже в новом роботизированном варианте техпроцесса. Одновременно с этим в самом здании цеха начинались строительные работы, повторяющие планировку, оборудование и роботизированный техпроцесс ангара. После завершения этих работ плановый процесс возвращался в преобразованный цех, а ангар использовался для роботизации другого цеха завода с новыми станками и теми же роботами ангара.

Можно также упомянуть и отрицательный пример в опыте попытки разработки в ИПМ им. М.В. Келдыша совместно с Госстроем СССР роботизированной системы для строительства кирпичного дома. Эта работа оказалась непосильной для Госстроя в связи с необходимостью добавления к разработанным в ИПМ алгоритмам исполнения роботом работы укладки кирпичей иных и намного более дорогих средств его инфраструктуры: механизмов, обеспечивающих подачу кирпичей и цементного раствора с перемещением всего этого и робота вдоль стен и по этажам в процессе строительства.

Приведенные примеры показывают, что сам робот есть лишь малая часть стоимости и организации роботизированного технологического процесса.

Последним важным и болезненным вопросом правильности ПО робота, связанным с удорожанием технологии его производства и усложнением алгоритмов и программных средств, является обязательность первичной **паспортизации робота** и устройства в конструкции поверхностей метрологии для его **калибровок** [29]. Измеренные значения параметров конкретного экземпляра робота с подробностями измеренных погрешностей его изготовления крайне необходимы, как для использования в системах диагностики текущего фазового состояния робота, так и для определения текущего состояния операционной среды исполняемой им задачи. Точность паспорта робота – залог точности его работы.

Проблема обеспечения надежности программного обеспечения робота

Надежность работы робота, в отличие от ее *правильности,* здесь определяется прежде всего составом *дополнительных средств* алгоритмического и программного обеспечения в его системе управления, *выполняющих непрерывную диагностику* состояния системы с реакцией не только *на отказы* элементов его оборудования (это входит в понятие «отказобезопасности»), но и *на операционно-неправомерные изменения во внешней среде робота*.

Логически связь программных средств обеспечения надежности робота с описанными моментами его проектирования и изготовления заключается в четырех правилах, имеющих фундаментальное значение для реализации надежной работы машины. Рассмотрим их подробнее.

1. Опыт разбора причин многих аварийных случаев робототехники показывает, что в процессе проектирования робота и его системы управления крайне **важно предусмотреть и обеспечить возможность программного отключения энергии** силовых движений робота (силового электропитания в усилителях мощности электроприводных систем, давления в системах гидро- или пневмоприводов) *за короткое время операционно-безопасного* движения инструмента с обеспечением невозможности дальнейших движений в степенях подвижности робота из-за *гравитационных и инерционных* сил.

Это требование наряду с архитектурой механо-программного интерфейса определяет как частоту опроса датчиков в степенях подвижности робота (не более долей *дистанции его операционной безопасности* – тормозного пути мобильного робота или допустимой погрешности рабочих движений робота с манипулятором инструмента), так и механику тормозных систем в степенях подвижности.

Здесь очень важны задержки срабатывания электромеханики тормозных муфт и программный доступ к их силовым элементам. Это – один из наиболее болезненных вопросов организации качественного управления динамикой робота, который должен решаться на уровне ЛПР в присутствии проектантов механики робота, его сенсорики и программистов его рабочих движений.

Наиболее удачным решением здесь является применение необратимых (*например, червячных*) редукторов, но это, увы, не всегда удается.

2. Если условия программного отключения силы выполнены, то программное обеспечение робота имеет возможность и обязано *путем наблюдения за характером выполнения* предписываемых движений предотвратить аварийные ситуации, связанные с отказом любого элемента оборудования робота. А именно: при любом отклонении текущих сенсорных сигналов робота от их **ожидаемых значений** на величину выше допустимого порога или при отсутствии реакции на сигналы попыток аварийного торможения опасное движение должно быть надежно прекращено выключением энергетики силовых цепей механики с формированием информации о типе аварийного события и поиском возможностей автономного исправления наблюдаемой ситуации.

Но это (внимание!) означает, что надежное управление движением и поведением робота требует реализации вычислений **будущих сенсорных сигналов** о состоянии внешней среды и о его фазовом состоянии уже в процессе построения его движений и до их исполнения. Заметим, что в наиболее развитой форме такое *сенсорное предсказание* означает разработку алгоритмов хорошо известного в психологии механизма «ориентировочного рефлекса» (или – физиологического механизма «акцептора действия» П.К. Анохина [30]).

В ИПМ был положительный опыт построения и использования такого прогнозирования сенсорной ситуации в *алгоритме программируемой фильтрации* [31-34] приходящих сенсорных сигналов, заметно отличающемся от обычных алгоритмов сенсорных преобразования для регуляторов, замкнутых цепями обратной связи. Этот опыт привел к пониманию отличия способов предсказания значений будущих «внутренних» сенсорных сигналов (т.е. сигналов датчиков фазового состояния робота) от способов предсказания будущих значений «внешних» сигналов (т.е. сигналов датчиков операционной обстановки в окружении робота).

Если прогнозирование внутренних сигналов в связи с высокой частотой управления приводными механизмами и простотой интерпретации их фазового содержания можно выполнять простой (и даже линейной) *экстраполяцией*, то прогнозирование будущей операционной обстановки (как раз по противоположным причинам) требует *построения моделей внешней среды и фазовых границ безопасности* для предсказания значений сигналов в зависимости от параметров будущего конфигурационного и позиционного состояния робота. Эти модели требуются и для повышения интеллекта робота.

Тем не менее, иногда прогноз ожидаемых значений сенсорных сигналов выполнить легче заранее – в процессе приближения к ближайшему плановому состоянию робота (в пределах безопасности выполняемых движений), чем делать это потом – внутри очередного такта управления движениями машины.

На этапе движения к цели для вычислений имеются более длинные интервалы времени, чем позже – на этапе срочного формирования в цепях обратной связи содержательной интерпретации уже полученных сигналов зрения и других внешних сигналов для оценки уровня безопасности текущего состояния.

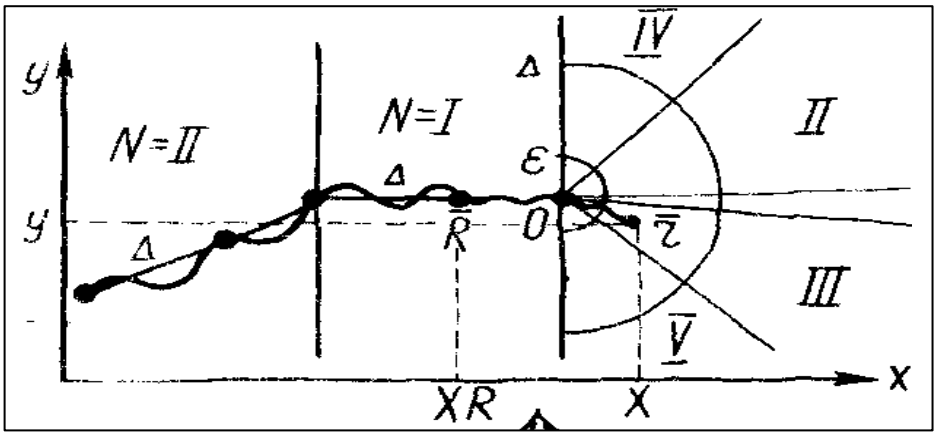


Рис. 15. Программируемый фильтр в системе управления робота, построенный на принципе акцептора действия [32].

Задача фильтра заключается в построении модели рельефа по измерениям наклонной дальности и угла луча дальномера, пересчитываемым в получаемые координаты измерений x и y в неподвижной системе координат рельефа.

Фильтр настраивается на один из возможных пяти классов рельефа: «ровно» (I), «подъем» (II), «спуск» (III), «стена» (IV), «обрыв» (V).

Ожидаемый (текущий) класс рельефа N сравнивается с классом измерения r(x, y) .

Это новое измерение не заносится в модель рельефа:

- *если оно лежит в ε-зоне нечувствительности;*
- *если оно принадлежит текущему классу рельефа;*
- *если оно не отстоит в горизонтальном направлении дальше порога A от предыдущей запомненной точки измерения A'.*

Если же новая точка г (x, y) выходит из зоны нечувствительности ε и из запомненного класса рельефа N, то в модель местности заносится предыдущая точка 0 (x, y) и фильтр настраивается на новый класс N'.

После обработки каждого измерения г(x, y) фильтр смещается в измеренную точку, если только не было выхода из запомненного класса рельефа в пределах зоны нечувствительности ε. Подобная точка считается случайным выбросом, и она игнорируется.

Такой алгоритм логической фильтрации сглаживает мелкие неровности рельефа и формирует модель местности шагом A в пределах одного класса и точками смены класса внутри шага A с точностью порядка е [31].

3. Вместе с тем следует учитывать **одну из серьезных причин** наблюдаемых случаев ненадежной работы машин, даже снабженных всеми возможными средствами обеспечения этой надежности. Принципиальная беда заключается в том, что все аппаратные средства обеспечения безопасности работы машины часто реализуются **на той же элементной базе** и с тем же уровнем ее вероятностных параметров отказоустойчивости, что и защищаемое ими оборудование. Возникающие с той же вероятностью отказы датчиков и оборудования систем безопасности могут приводить и приводят к «ошибкам второго рода» — к ложным сигналам прекращения *исправной* работы робота.

Отсюда следует требование обеспечения более высокого уровня аппаратной и программной надежности в системах диагностики и безопасности работы. Повышение уровня надежности и живучести их оборудования обычно достигается применением в их проекте *более дорогой элементной базы* и использованием функционального и/или тройного *аппаратного резервирования* с логикой голосования для выбора верного решения.

Вместе с этим представляется, что наиболее сильным средством борьбы с ложными сигналами являются *алгоритмы поиска логической противоречивости* в текущих обстоятельствах появления сенсорных сигналов опасности. Это означает, что в алгоритмах систем диагностики и обеспечения надежной работы роботов *на первое место выходят логические методы машинного интеллекта*.

Конечно, для их реализации тоже полезна избыточность сенсорной информации, но легко показать, что повышение уровня интеллектуальности ПО *путем использования алгоритмов программируемой фильтрации (акцептора действия)* может решить эту задачу и на существующем наборе сенсоров.

Действительно, отказ в работе двигателя или соответствующего датчика у какой-либо оси подвижности робота легко идентифицируется несовпадением сигнала этого датчика с ожидаемым сигналом на одном или допустимых нескольких (для надежности идентификации) текущих тактов управления в интеллектуальном контроллере этого двигателя с использованием алгоритма акцептора действия. Реакция на эту ситуацию, конечно, зависит от типа робота и типа его операции. Но эта реакция легко априори предусматривается в обычном «перечне штатных отказов» и закладывается в алгоритм «интеллектуального контроллера».

Таким образом, интеллектуальность робота и его контроллеров лежит в реализации сенсорного предсказания и логики реакций на ожидаемые отказы.

Приведем пример такой ситуации и соответствующего алгоритмического решения. В шагающих роботах (см. рис. 1 и [35-39]) отказ даже трех подвижностей подъема, переноса и колена одной ноги идентифицируется соответствующими сигналами датчиков. Этот отказ в зависимости от номера ноги алгоритмически парируется изменением походки и процедуры расчета статической устойчивости машины. Алгоритм такой реакции был создан и успешно

опробован на модельном примере построения движений ног шестиногой машины с одной неработающей ногой в режимах продолжения ходьбы или автоматического залезания на платформу эвакуирующего средства.

4. Вместе с описанными способами программного контроля и слежения за работой аппаратуры и механики робота необходима и *встречная аппаратная поддержка* надежности работы *программного обеспечения*. Ошибки, которые всегда возможны в работе сложных алгоритмов программного обеспечения, выражаются прежде всего в зависании или в зацикливании работы программ. В каждом из этих случаев, как следствие, возможно возникновение неконтролируемого движения механизмов робота. Чтобы исключить такое движение и продолжить по возможности правильную работу, *нужно суметь извне послать* на системный уровень программного обеспечения *сообщение* о замеченном событии отказа программных средств (предполагается, что вектор прерывания на системном уровне и/или обработчик этого события на программном уровне в проекте предусмотрены).

Возможный вариант защиты робота от сбоев программного обеспечения известен. Он заключается в использовании *аппаратного интегратора импульсов* – сигналов работоспособности программного обеспечения робота. Эти импульсы формируются в главном цикле программы системы управления с частотой ее нормальной работы. В случае зависания или зацикливания программ или при отказе системы питания бортовой ЭВМ прекращается поток импульсов и уровень сигнала интегратора падает *с подобранной постоянной времени не более десятой доли* специфицированного у каждого робота *допустимого времени его неуправляемого движения*. Аппаратная схема реакции на снижение уровня сигнала интегратора должна отправить сообщение о таком событии и включить *аппаратные схемы аварийного режима*, соответствующего данному типу робота (переход на ручной режим управления или на дублирующий комплект автономной системы управления либо полная остановка движения и т.п.).

Таким образом, с точки зрения задач построения алгоритмов программного обеспечения роботов упомянутые варианты означают такую *системную* разработку проекта архитектуры аппаратных и программных средств, которая тесно связывает конструктивные и программные решения в один *процесс взаимной поддержки живучести робота* – надежности его функционирования при возникновении отказа в любой из частей системы. Выполнить это возможно лишь на ранней стадии проекта робота и с учетом его функциональной роли в РТС. Это лишний раз напоминает о приведённом утверждении, что лучше всего начинать создание робота с пониманием его места в требуемом РТС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт разработок программного обеспечения для управления движением роботов разных типов и назначений говорит о следующем.

1. Приведенный сетевой PERT-график разработки нового робота и его использования показывает, что минимальные сроки создания нового роботизированного комплекса — не менее 3,5-4 лет, причем на изготовление ПО только робота следует отводить не менее 9 месяцев после выполнения первых тестовых испытаний его изготовленных механизмов.
2. Для успешности завершения 39 отдельных этапов работ по созданию роботизированной системы с универсальным роботом в ее составе необходимо общее руководство с курированием этапов работ, причем общим руководителем всей работы лучше быть руководителю последнего этапа.
3. Серьезное внимание по ходу проекта должно уделяться всем возникающим изменениям конструкции и мехатроники робота, влияющим на содержание алгоритмов программного обеспечения.
4. Одним из болезненных вопросов создания программного обеспечения робота является обязательность заводской паспортизации робота с устройством в его в конструкции метрологических поверхностей для выполнения калибровок связи электрических и механических параметров.
5. Для обеспечения правильности и, главное, надежности работы робота с программным обеспечением необходимо предусмотреть как аппаратную систему защиты от сбоев программного обеспечения, так и систему диагностики в составе программ для защиты от сбоев оборудования. Причем для сокращения возможных 10-кратных увеличений затрат на эксплуатацию ненадежного робота целесообразно использовать стандарты известных концепций FMEA, FTA и DFX, отраженные в ГОСТ 27.310-95.
6. В алгоритмах диагностики состояния систем робота необходимо использование метода программируемой фильтрации сенсорных сигналов с заблаговременным прогнозированием их ожидаемых значений, что обеспечивает возможность интеллектуально-логического способа операционного управления с диагностированием и преодолением отказов в работе элементов робота.
7. Если конструктивная надежность оборудования системы диагностики робота не выше надежности диагностируемых элементов оборудования и программ, то такую систему полезно исключить из контура управления.

Работа направлена на реализацию эффективных способов управления разработкой новых роботов в интересах создания промышленных автоматических робототехнических систем с программно реализуемой переналадкой технологических процессов. Такие системы обеспечивают требуемое повышение качества и конкурентоспособности отечественной продукции, благодаря возможностям робототехнических систем гибкого производства к эффективному сокращению сроков перестройки для выпуска новой продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К. и др. Управление интегральным локомоционным роботом. Изв. АН СССР, Технич.кибернетика, №6, 1974.
2. Платонов А.К. Определение характеристик методического макета шагающего робота. // В кн.: Управление робототехническими системами и их очувствление, М.: Наука, 1983.
3. Кудрявцев М.В., Сологуб П.С. Особенности конструкции и результаты исследования натурного макета шагающего аппарата. //I Вс. конф. по мех. и упр. движ. ШМ. Волгоград, 1988.
4. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Карташов В.А, Ярошевский В.С. и др. Математическое обеспечение сборочного комплекса на базе робототехнического манипуляторов "Универсал-5". // В кн.: Автоматизация проектирования и программирования роботов и ГПС. М.: Наука, 1988. 14 с.
5. Охоцимский Д.Е., Камынин С.С., Карташев В.А., Кугушев Е.И. Автоматическая многооперационная сборка с помощью промышленных роботов. // В кн.: Роботизация сборочных процессов. М.: Наука, 1985. 12 с.
6. Okhotsimsky D., Platonov A., Belousov I., et al. Real time hand-eye system: interaction with moving objects // Proc. IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation ICRA'98, Leuven, Belgium, May 15-20, 1998, p.1683-1688.
7. Белоусов И.Р., Сазонов В.В., Чебуков С.Ю. Захват подвижного объекта роботом-манипулятором, управляемым через Интернет. // ДАН, том 387, № 4, 2002.
8. Белоусов И.Р. Управление роботами через сеть Интернет // В кн.: Новое в управлении и автоматике. М.: Наука, 2002.
9. Карташев В.А. Управление движением схвата манипулятора по сложной траектории. // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 1999, № 4, 28 с.
10. Цыганков Ю.К. Программное обеспечение роботов для дуговой и электронно-лучевой сварки с прямоугольной системой координат и дискретным приводом движения. // В кн.: Программное обеспечение промышленных роботов. М.: Наука. 1986. 11 с.
11. Евграфов В. В., Павловский В. В., Павловский В. Е. Динамика, управление, моделирование роботов с дифференциальным приводом // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2007. № 5. 6 с.
12. Богуславский А.А., Платонов А.К., Сербенюк Н.С. Система машинного видения робота Трикол. // Труды школы-конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы», Москва, 2003, Институт механики МГУ. 15 с.
13. Емельянов С.Н., Платонов А.К., Ярошевский В.С. Система управления полноприводного трехколесного движителя. //Труды школы-конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы», Москва: Изд-во МГУ, 2000г., 11 с.
14. Соколов С.М., Трескунов А.С. Система технического зрения для контроля линейных размеров в ГПС фрезерной обработки. – В кн.: Системы технического зрения М.: Наука, 1991. 7с.

15. Соколов С.М. Система технического зрения для обеспечения автоматизации операций настройки, нанесения шкалы и контроля стрелочных измерительных приборов. // В кн: Проблемы создания гибких автоматизированных производств М.: Наука, 1987, 11 с.
16. Касаткин В.В., Соколов С.М., Трескунов А.С. Система технического зрения для контроля неметаллических включений и гранулометрического состава металлического порошка. // В кн.: Системы технического зрения. Ижевск: Полиграфия, 1991.
17. Соколов С.М. Проблемы машинного видения в робототехнике и автоматизации производства. //В кн.: Будущее прикладной математики. Лекции для молодых исследователей. М.: Эдиториал УРСС. 2005. 32 с. Электронный ресурс: http://spkurdyumov.ru/uploads/2013/08/sokolov120.pdf
18. Платонов А.К. Проблемы и перспективы робототехники. // В кн.: Будущее прикладной математики. Лекции для молодых исследователей. М.: Эдиториал УРСС. 2005. 29 с.
19. Соболь И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. //М.: Наука, 1981 200с.; М.:ДРОФА 2 изд. 2006. 176с.
20. Брукс мл., Фредерик П. Как проектируются и создаются программные комплексы: Мифич. человеко-месяц. Очерки по системе программирования. // М.: Наука, 1979, 151 с. Электронный ресурс: // http://www.r-5.org/files/books/computers/dev-teams/man-month/Frederick_Brooks-The_Mythical_Man-Month-RU-1995.pdf
21. Шаров В.Д., Макаров В.П. Методология применения комбинированного метода FMEA-FTA для анализа риска авиационного события. //Научный Вестник МГТУ ВА, № 174, 2011.
Электронный ресурс: http://b-c-group.ru/?page_id=454DFX
22. Глухов А.В., Павловский В.Е. Методика и технология разработки программно-технических комплексов СМ ЭВМ для АСУТП. // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2006, № 67, 28с.
23. ГОСТ 27.310-95, ГОСТ Р 51901.13-2005 «Анализ дерева неисправностей».
24. Алимова Э. К., Николаева Н. Г. Метод FMEA как путь повышения качества продукции. //Вестник Казанского технологического университета, Выпуск № 14, том 17. 2014.
25. Грановский Ю. Собрано железными руками. Электронный ресурс http://www.popmech.ru/technologies/292432-sobrano-zheleznymi-rukami/
26. Речменский В. Жизнь и смерть «красного пролетария». //«Аргументы Недели », № 2 (294) , 19 января 2012.
Электронный ресурс: http://argumenti.ru/toptheme/n323/15073
27. Баранов А.Б., Боровин Г.К., Павловский В.Е., Платонов А.К. Моделирование и оптимизация параметров робототехнологических комплексов гибкого производства // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 1983, № 90, 28 с.
28. Платонов А.К., Боровин Г.К., Дружченко В.Е., Чиганов В.А., Никифоров

В.В. Исследование структуры системы управления робота для дуговой сварки // В кн.: Исследование робототехнических систем. |М.: Наука, 1982. 16 с.
29. Емельянов С.Н., Платонов А.К. Метод согласования электрических сенсорных сигналов и геометрических характеристик мобильного робота. // В сб.: Мобильные роботы и мехатронные системы. М.: МГУ, 2001, с. 78-84.
30. Анохин П.К. Узловые вопросы теории функциональной системы. //М.: Наука. 1980г.
31. Платонов А.К. Геометрические преобразования в робототехнике. // М.: Знание (Новое в жизни, науке, технике. Сер."Математика, кибернетика"№4) 1988, 32с.
32. Платонов А.К., Карпов И.И. Информационное обеспечение шагающих аппаратов. Труды IV Всес.конференции по бионике. Том 6. М.1973.
33. Платонов А.К., Карпов И.И. Синтез и моделирование на ЦВМ информационной системы шагающего аппарата. // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 1974, № 124. 49 с.
34. Карпов И.И. Метод организации словаря ситуация-действие в информационной системе шагающего аппарата. // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 1974, № 73. 18 с.
35. Платонов А. К., Девянин Е. А. Разработка комплекса средств шагающего робота // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 1996, № 39. 28 с.
36. Боровин Г. К., Буданов В. М., Девянин Е. А., Лапшин В. В., Мирный В. М.,. Охоцимский Д. Е, Платонов А. К. Основные проблемы и особенности проектирования многоцелевого гидравлического шагающего шасси. // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 1995, № 72. 28 с.
37. Павловский В. Е. О разработках шагающих машин. // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2013, № 101, 32 с.
38. Богомолов Н.Е., Лазутин Ю.М., Старостин Е.Л., Ярошевский В.С. Программное обеспечение многомашинной системы управления шагающим роботом. // В сб.: Механика и управление движением шагающих машин. Волгоград, 1990.
39. Белецкий В.В., Кирсанова Т.С., Лавровский Э.К. Исследование комфортабельных режимов движения двуногого аппарата // В кн.: Исследование робототехнических систем. М.: Наука, 1982. 15 с.