

На правах рукописи

Романцова Наталия Владимировна

**СОСТАВЛЕНИЕ РАСПИСАНИЯ РАБОТЫ МНОГОКАНАЛЬНОЙ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С МИНИМИЗАЦИЕЙ ПОГРЕШНОСТИ  
ДАТИРОВАНИЯ**

Специальность: 05.11.16 – Информационно-измерительные и  
управляющие системы (приборостроение)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) СПбГЭТУ» на кафедре информационно-измерительных систем и технологий (ИИСТ)

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Королёв Павел Геннадьевич

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», профессор кафедры измерительных информационных технологий (ИИТ)

*Малыхина Галина Федоровна*

Кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер ЗАО «Фортэкс»

*Брусаков Игорь Юрьевич*

Ведущая организация

Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации.

Защита диссертации состоится «23» декабря 2015 г. в 17 00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.06 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, ауд. 5108

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) и на сайте СПбГЭТУ: [www.eltech.ru](http://www.eltech.ru).

Автореферат разослан «22» октября 2015 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.238.06

д.т.н., доцент

\_\_\_\_\_/А.М.Боронахин/

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность.**

В промышленности и научных исследованиях существуют быстропротекающие процессы (баллистический процесс: взаимодействие при выстреле частей стрелкового оружия, ускорения снаряда, распределение пороховых газов; встреча пули с преградой, процесс кавитации; процесс детонации взрывчатого вещества; взрыв тонких проволок и фольг (в том числе измерение уплотнения в газах и жидкостях), измерение коротких импульсов времени; измерение аэробаллистических и др. скоростей), а также в измерительных системах промышленной автоматики, для изучения и мониторинга которых необходимо проводить совместные измерения с датированием. Несмотря на значительный прогресс современной элементной базы требования к погрешности датирования вызывают необходимость составления расписаний работы измерительных и вычислительных модулей. Задача составления расписания в постановке М. Гэри и Д. Джонсона является NP-полной в сильном смысле, т.е. решается с помощью алгоритма полного перебора, которая даже при размерности задачи порядка 100 из-за экспоненциальной вычислительной сложности будет решаться от нескольких дней до десятков лет. В настоящей работе рассматриваются условия, при которых составление расписаний становится необходимым, разрабатываются критерии эффективности, определяются требования к пространству поиска, имеющих полиномиальную вычислительную сложность, разрабатываются алгоритмы составления расписания, определяются условия, при которых алгоритм находит оптимальное решение, оценивается погрешность отклонения от оптимального решения.

**Целью** данной работы является исследование и разработка алгоритмического обеспечения, применимого для решения задачи составления расписания работы информационно-измерительной системы (ИИС), минимизирующего погрешность датирования отсчетов.

В соответствии с поставленной целью сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Исследование методов решения дискретных оптимизационных задач и задач теории расписаний;
2. Формулирование задачи и выбор критерия эффективности при составлении расписания измерительного эксперимента;
3. Разработка алгоритма составления расписания работы измерительной системы;
4. Оценка вычислительной сложности алгоритма;

5. Практическая реализация разработанного алгоритма;
6. Сравнение решений, полученных с помощью разработанного алгоритма с решениями, полученными посредством переборного алгоритма по выбранному критерию эффективности.
7. Оценка точности решения, формируемого разработанным алгоритмом.

**Объект исследований.** Информационно-измерительные и управляющие системы (ИИУС), работающие в реальном времени, и их алгоритмическое обеспечение.

**Предмет исследований.** Возможность использования существующих многоканальных ИИС для проведения исследований быстропротекающих технологических процессов с заданной погрешностью датирования.

**Методы исследования.** В диссертационной работе использован математический аппарат комбинаторики, дискретной математики, теории оптимизации, теории расписаний, теории вычислительной сложности.

Достоверность и обоснованность научных положений подтверждается результатами математического моделирования и экспериментальных исследований.

**Научная новизна:** В процессе проведения работы получены новые научные результаты:

1. Впервые разработаны критерии эффективности в виде функций штрафов, позволяющие решить задачу минимизации погрешности датирования.
2. Разработаны алгоритмы составления расписания работы измерительной системы, минимизирующие погрешность датирования.
3. Разработана методика подготовки задания на испытания сложных технических объектов при выполнении измерений с датированием параметров быстропротекающих технологических процессов, позволяющая использовать алгоритмы неполного перебора.

**Практическая значимость:** Применение результатов работы позволяет сократить погрешность датирования при измерении высокочастотных сигналов из задания на измерительный эксперимент до 50%. Результаты работы были использованы при выполнении проекта «Разработка принципов построения и создание интеллектуальной системы обеспечения безопасности и энергетической эффективности автомобильных газонаполнительных компрессорных станций» при поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57414X0023), а также внедрены в «ООО «НПК Ленпромавтоматика».

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Критерии эффективности на основе функции штрафов позволяют оценивать отклонения решений, получаемых алгоритмом неполного перебора, от оптимального;
2. Алгоритмы составления расписания работы измерительной системы минимизируют погрешность датирования и дрожание частот опроса;
3. Разработанная методика подготовки испытаний сложных технических объектов позволяет при выполнении синхронных измерений параметров быстропротекающих технологических процессов получить минимальную погрешность датирования отсчетов;
4. Способ подготовки заданий на измерительный эксперимент позволяет применить алгоритмы, находящие оптимальные решения или близкие к оптимальным решения за полиномиальное время.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня: Международной научно-технической конференции «Проблемы автоматизации и управления в технических системах» (Пенза, 2011 г), Международном конгрессе «Цели развития тысячелетия» инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов» научно-практической конференции «Наукоёмкие и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий» (Санкт-Петербург, 2010 и 2011 г), Международный конгресс «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов России», научно-практическая конференция «Транспортно-коммуникационная система Арктики в геополитическом взаимодействии и управлении регионами в условиях чрезвычайных ситуаций» (Санкт-Петербург, 2009 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 4 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 6 публикаций в сборниках трудов конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 63 наименований. Основная часть работы изложена на 118 страницах машинописного текста, содержит 33 рисунка, 19 таблиц.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты новизна и практическая значимость работы, приведены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ метрологических характеристик современных ИИС. Рассмотрены существующие аппаратные и программные способы повышения точности измерений, в том числе, уменьшением погрешности датирования при составлении расписания измерительного эксперимента. Проанализированы классификация измерительных сигналов и комбинаторные задачи, применявшиеся для оптимизации состава ИИС.

Величина погрешности датирования при одинаковом времени сдвига  $\Delta t_{\text{сд}}$  зависит от первой производной функции, описывающей сигнал, и нарастает при ее увеличении  $\Delta t_{\text{сд1}} = \Delta t_{\text{сд2}} = \Delta t_{\text{сд3}}$  при  $\Delta U_1 > \Delta U_2 > \Delta U_3$ .

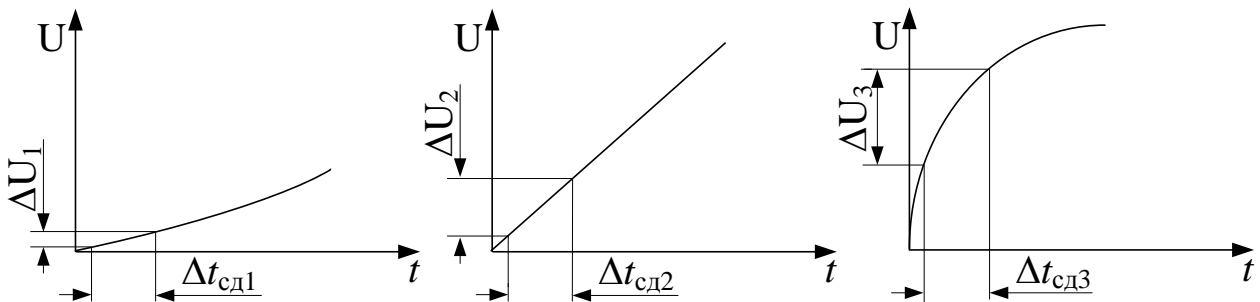


Рисунок 1– Погрешности датирования

Восстановление входного сигнала без потерь информации происходит при выполнении теоремы Котельникова, следовательно, сумма времени установления напряжения на устройстве выборки хранения (УВХ), времени работы аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и времени считывания результата из АЦП в процессор должна быть меньше  $1/2f_{\text{max}}$ , где  $f_{\text{max}}$  – максимальная частота в спектре сигнала. При выборе измерительного канала по статической погрешности придерживаясь требований задания на эксперимент, динамическая составляющая не должна её превосходить.

Предположим, что входной сигнал состоит из суммы гармонических колебаний, с наиболее высокочастотной составляющей  $s(t) = U \sin(\omega_{\text{max}}t + \varphi_0)$ .

Амплитудная погрешность составит:

$$\Delta U = U_{\text{max}} \omega_{\text{max}} \Delta t_{\text{сд}}, \text{ где } \Delta t_{\text{сд}} = t_{\text{УВХ}} + t_{\text{АЦП}} + t_{\text{чт}}.$$

Ограничение на погрешность сдвига рассчитывается следующим образом:

$$\Delta t_{\text{сд}} < \frac{\Delta U}{\frac{1}{2} U_{\text{max}} \omega_{\text{max}}} \quad (1)$$

Выполнение минимизации погрешности датирования при использовании в качестве критерия эффективности её вероятностные характеристики

ресурсоемкая задача. Уменьшение погрешности датирования достигается уменьшением погрешности сдвига.

Показано, что время автоматического выбора полярности и пределов измерения пропорционально длительности передачи командного слова и инвариантно параметрам измерительного сигнала, в то время как, время задержки запуска устанавливается при формировании расписания работы ИИС и оказывает неравноценное влияние на точность измерительных процедур с различной жесткостью требований (Таблица 1).

Таблица 1 Классификация сигналов в зависимости от параметров синхронной части системы и признака косвенных измерений

Признак совместных измерений	Временные характеристики для признака синхронизации			
	$\tau=0$		$\tau \neq 0$	
	$f \leq T^{-1}$	$f > T^{-1}$	$f \leq T^{-1}$	$f > T^{-1}$
$Kos=0$	$S^1$	$S^2$	$S^3$	$S^4$
$Kos \neq 0$	$S^5$	$S^6$	$S^7$	$S^8$

где  $\tau_j$  – параметр синхронизации;  $f_j$  – частота опроса сигнала – требуемая частота измерений;  $Kos_j$  – признак использования сигнала при проведении косвенных измерений.

С точки зрения проведения косвенных измерений, наиболее важным (сложным) является одновременное измерение значений величин, используемых для вычисления искомого значения, т.е. сигналов, имеющий признак  $Kos \neq 0$ . С точки зрения измерительного эксперимента наиболее важным параметром является признак синхронизации  $\tau \neq 0$ . Этот признак означает, что для данного сигнала измеряется временная или частотная характеристика, и нарушение этого требования приведёт к дополнительной динамической погрешности. Поэтому сигналы  $S^3$ ,  $S^4$ ,  $S^7$ ,  $S^8$  должны быть рассмотрены в первую очередь. Таким образом, наиболее приоритетным в процессе анализа сигналов являются сигналы  $S^7$  и  $S^8$ . Для сигналов, не имеющих временной привязки, интенсивность (частота опроса) измерений имеет важное значение, так как сигнал с большей интенсивностью имеет меньше степеней свободы при своем распределении, чем сигнал с малой интенсивностью.

При анализе комбинаторных задач, применяемых для оптимизации состава ИИС при неограниченном аппаратном ресурсе, выявлены отличия и сходства с поставленной задачей.

**Во второй главе** сформулированы способы определения существования решения задачи составления расписания работы многоканальной измерительной системы с целью уменьшения погрешности датирования,

разработаны критерии позволяющие вычислить штраф, связанный с запаздыванием начала измерения сигнала, и критерий эффективности для минимизации «дрожания частот опроса».

Расписание работы измерительной системы составляется для ИИС, структура которой приведена на рисунке 2,

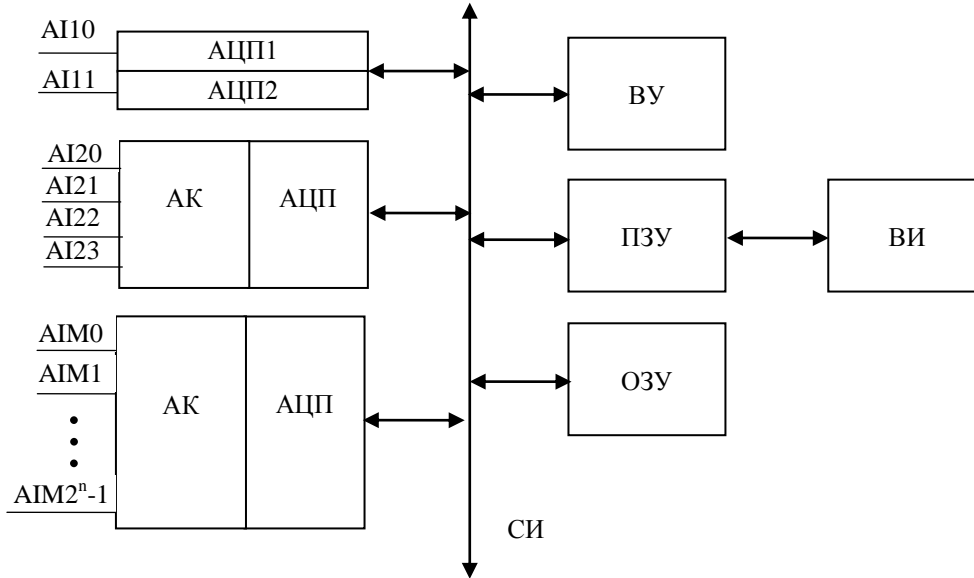


Рисунок 2 – Структура измерительной системы

где AI – аналоговый вход, M – число измерительных модулей ИС, АК – аналоговый коммутатор, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ВУ – вычислительное устройство, ПЗУ – постоянное запоминающее устройство, ОЗУ – оперативная память, СИ – системный интерфейс, ВИ – внешний интерфейс с подсистемой верхнего уровня или оператором.

Минимальной погрешность датирования оказывается у результата, который был получен при запуске измерительного канала (ИК) сразу после начала такта синхронизации и определяется тактовой частотой процессора и процедурой доступа к регистрам управления ИК.

Разработаны критерии эффективности в виде функций штрафа, связанных с запаздыванием начала измерения сигнала:

1. Нормированная функция, учитывающая только факт появления дополнительной погрешности датирования:

$$P = \frac{\sum_{j=2}^J \sum_{l=1}^L p_{jl}}{(J-1) \times l_{\max}}, \quad p_{jl} = \begin{cases} 1, & \tau_{jl} = \tau_{j-1,l} \\ 0, & \tau_{jl} \neq \tau_{j-1,l} \end{cases}, \quad (2)$$

где количество сигналов задания равно  $J$ , количество тактов синхронизации в кадре  $L$ , а количество запусков самого высокочастотного сигнала  $l_{\max}$ , такт синхронизации на котором запущен  $j$ -сигнал  $\tau_{jl}$ . Нормированная функция



штрафов (2) имеет малую вычислительную сложность, фиксирует факт наличия погрешности датирования и не учитывает ее величину.

2. Критерий, учитывающий нарастание погрешности датирования при запуске на одном такте более двух измерительных каналов:

$$P = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{j=2}^J (p_{j-1,l} + p_{j,l})}{l_{\max} \sum_{j=1}^J (j-1)}, \quad (3)$$

нормированная функция штрафов, рассчитываемая по формуле (3), учитывает величину погрешности датирования.

3. Функция с коэффициентом уменьшения штрафа за задержку измерения сигнала с меньшим показателем жесткости привязки ко времени.

$$P = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{j=2}^J (p_{j-1,l} + p_{j,l} \times \frac{f_j}{f_{\max}})}{l_{\max} \sum_{j=1}^J (j-1)}, \quad (4)$$

где  $f_{\max}$  – частота сигнала с наиболее жесткой привязкой ко времени. Функция штрафов, рассчитываемая по формуле (4) снижает значение функции за задержку сигналов с частотами ниже максимальной и из всех рассмотренных имеет наибольшую вычислительную сложность.

Применение критериев эффективности в оптимизационных задачах требует предварительного упорядочивания сигналов по степени жесткости привязки ко времени.

Цели управления предполагают составление расписания чтения результатов, для случая, когда есть неограниченная возможность изменять конфигурацию быстродействующего модуля задержка до момента получения результата учитывается в функции штрафа:

$$P = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{j=2}^J \left( p_{j-1,l} + \left( p_{j,l} + \frac{t_3 + t_{\text{преобр}} + t_{\text{чт}} + t_{\text{зап}}}{t_3} \times p_{j,l} \right) \times \frac{f_j}{f_{\max}} \right)}{l_{\max} \sum_{j=1}^J (j-1)} =$$

$$= \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{j=2}^J \left( p_{j-1,l} + p_{j,l} \left( 1 + \frac{t_3 + t_{\text{преобр}} + t_{\text{чт}} + t_{\text{зап}}}{t_3} \right) \times \frac{f_j}{f_{\max}} \right)}{l_{\max} \sum_{j=1}^J \left( j-1 + \frac{(n+1) \times t_{\text{и}} - t_3}{t_3} \right)} \quad p_{j,l} = \begin{cases} 1, & \tau_{j,l} = \tau_{j-1,l} \\ 0, & \tau_{j,l} \neq \tau_{j-1,l} \end{cases}, p_{1,l} = 0 \quad (5)$$

где  $t_3$  – время задержки измерения,  $t_{\text{преоб}}$  – время преобразования измерительного модуля,  $t_{\text{чт}}$  – время чтения результата измерения,  $t_{\text{зап}}$  – время записи результата измерения.

Минимизация дрожания частот опроса  $\delta t$  является уменьшением различия моментов получения информации о значении сигнала на разных тактах, т.е. в значение критерия входит разность между самым ранним запуском и самым поздним (или между самым ранним и самым поздним получением результата). Для того, чтобы её определить, необходимо при назначении сигнала с  $\tau=0$  на начальный такт запуска подсчитать количество сигналов, которые уже измеряются на этом такте  $l$ , т.е. провести суммирование по каждому столбцу матрицы потенциальных возможностей  $A$ , в котором

измеряется  $j$ -й сигнал, а именно  $\delta t_l = \sum_{j=1}^{j_T} t_{zij} (A_{jl} \neq 0)$ , где  $t_{zij}$  – длительность обмена по шине при запуске измерительного канала  $i$  для измерения сигнала  $j$ ,  $j_T$  – текущий номер сигнала; в безразмерном варианте в виде штрафа  $P_{jTl} = \frac{\delta t_l}{t_3}$

, таким образом  $P_{jTl} = \frac{P_{jTl \max} - P_{jTl \min}}{N_{\text{ИМ}} - 1}$ , где  $N_{\text{ИМ}}$  – длительность измерительного эксперимента, выраженная в тактах. Суммарное значение критерия будет определяться формулой:

$$P_{jTl} = \sum_{j=1}^J \frac{P_{jTl \max} - P_{jTl \min}}{N_{\text{ИМ}} - 1}. \quad (6)$$

Для минимизации суммарного значения критерия (5), необходимо при рассмотрении (назначении начального такта запуска) сигналов с  $\tau=0$  выполнять вычисление данного критерия для каждого из возможных вариантов.

**В третьей главе** разработаны правила создания ограничений, накладываемые на постановку задачи, и обоснование независимости пространства поиска. Разработаны алгоритмы составления расписания работы многоканальной измерительной системы, выполнена оценка вычислительной сложности. Рассмотрен способ снижения функции штрафов при наличии в задании сигналов с жесткой привязкой ко времени  $\tau \neq 0$ .

Сформулированы условия применимости жадного алгоритма M1 и M2:

M1:  $\emptyset \in R$  и если  $C \in R$  и  $D \subseteq C$ , то  $D \in R$ ;

M2:  $\forall C, D \in R$ , таких, что  $|D| = |C| + 1$ ,  $\exists$  элемент  $b \in D \setminus C$ , такой что  $C \cup \{b\} \in R$ , где  $R$  – множество возможных решений,  $A$  – матрица потенциальных возможностей.

Правило M1 введено, чтобы исключить случай  $R = \emptyset$ . Для того, чтобы выполнялось правило M2 необходимо выполнение следующих условий:

У1: модуль  $i$  типа  $m$  имеет  $K$  входов, причем  $K = 2n$ ;

У2: число сигналов  $g$  из  $S$ , имеющих  $f = f_{\max}/K$  должно быть меньше или равно  $n \times K$ , причем количество доступных модулей данного типа должно быть не менее  $\lceil g/(n \times K) \rceil$ ;

У3: множество  $S$  упорядочивается по невозрастанию частот опроса  $f_j$ ;

У4: строки матрицы  $A$  упорядочиваются по неубыванию количества входов ИМ.

Выполнение условий  $U$  обеспечивает выполнение правила M2, что достаточно для того, чтобы  $A$  и  $R$  образовали матроид и жадный алгоритм нашел оптимальное решение. Фактически, выполнение этих требований обеспечивает достаточное количество входов системы для измерения всех сигналов из  $S$ , а также неухудшение пространства поиска при расходовании аппаратного ресурса. Т.е. назначение сигнала на канал  $k$  модуля  $m$  не снижает потенциальных возможностей  $A$ . Жадный алгоритм находит оптимальное решение, если множество  $S$  содержит только сигналы без жесткой привязки ко времени ( $\tau = 0$ ). Наличие в множестве  $S$  сигналов с  $\tau \neq 0$ , т.е. таких которые распределяются по ИК раньше, чем сигналы, запуск на измерение которых может быть сдвинут на некоторое число тактов, приводит к отклонению решения от оптимального. Оценка сверху этого отклонения вычисляется следующим образом:

$$P = \frac{\sum_{j=1}^J \left( n_j^1 \times p_j \times \frac{f_j}{f_{\max}} \right)}{l_{\max} \sum_{j=1}^J (j-1)}, \quad p_j = \begin{cases} 1, & \tau_j \neq 0 \\ 0, & \tau_j = 0 \end{cases} \quad (7)$$

где  $n_j^1 = \frac{N_n \times f_j}{f_{\max}}$ .

Составление расписания работы измерительной системы при отсутствии сигналов с жесткой привязкой ко времени осуществляется по алгоритмы приведенному на рисунке 3. При составлении расписания формируются таблицы расписания работы контроллера  $R$ , каждого измерительного канала  $R_i$ .

Таблица  $R$  содержит управляющую информацию для контроллера: какой измерительный канал необходимо включить, в каком режиме и на каком такте синхронизации.

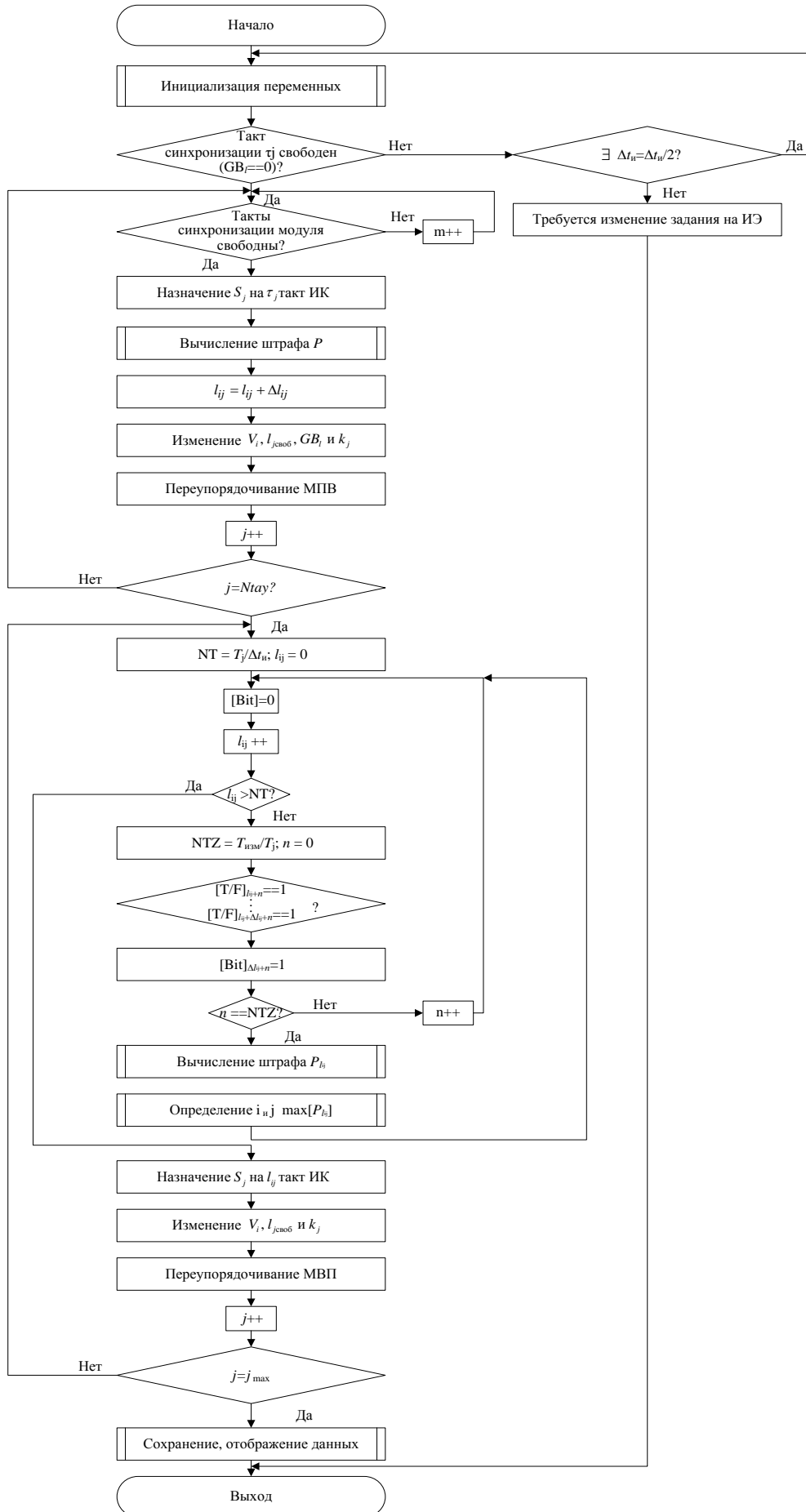


Рисунок 3 Назначение сигналов на ИК.

Распределение начинается с сигналов, имеющих наибольший вес или наименьшее число степеней свободы. Если сигнал назначен на измерение на какой-либо измерительный канал, корректируется матрица, т.е. параметр числа входов измерительного модуля  $k_i$  уменьшается на единицу.

Назначение сигналов  $S_j$  на измерительный канал происходит после переупорядочивания измерительных модулей в соответствии с  $V_i = \frac{l_{i\text{своб}}}{k_{i\text{своб}}}$ , где  $l_{i\text{своб}}$  – число свободных тактов,  $k_{i\text{своб}}$  – число свободных каналов. Такой порядок действий позволяет распределить запуски процедуры измерения системы на измерительных модулях системы равномерно. Вычислительная сложность алгоритма составления расписания работы многоканальной измерительной системы оценена выражением:

$$O(p) = J \log J + n \log n + Jn + \sum_{j=1}^J N_j, \quad (8)$$

где  $n$  – число ИМ. Алгоритм имеет полиномиальную вычислительную сложность и позволяет сократить время подготовки измерительного эксперимента.

Наличие в задании сигналов с  $\tau \neq 0$  провоцирует появление «дрожания частот опроса», влияние которого может быть уменьшено за счет изменения аппаратного ресурса. Измерительный модуль с программным запуском может быть заменен на ИМ с аппаратным тактированием равной частотой коммутации или ИМ с аппаратным тактированием и программируемыми частотами коммутации. При использовании аппаратного запуска измерений есть возможность ограничить погрешность датирования системы одним запуском. Погрешность датирования при измерениях сигналов модулем с аппаратным тактированием обуславливается расхождением частот синхронизации главного вычислителя системы и частоты синхронизации ИМ.

В зависимости от требований к быстродействию (и возможностей АЦП) возможны две реализации ИМ с программируемыми частотами коммутации, представленные на рисунке 3,

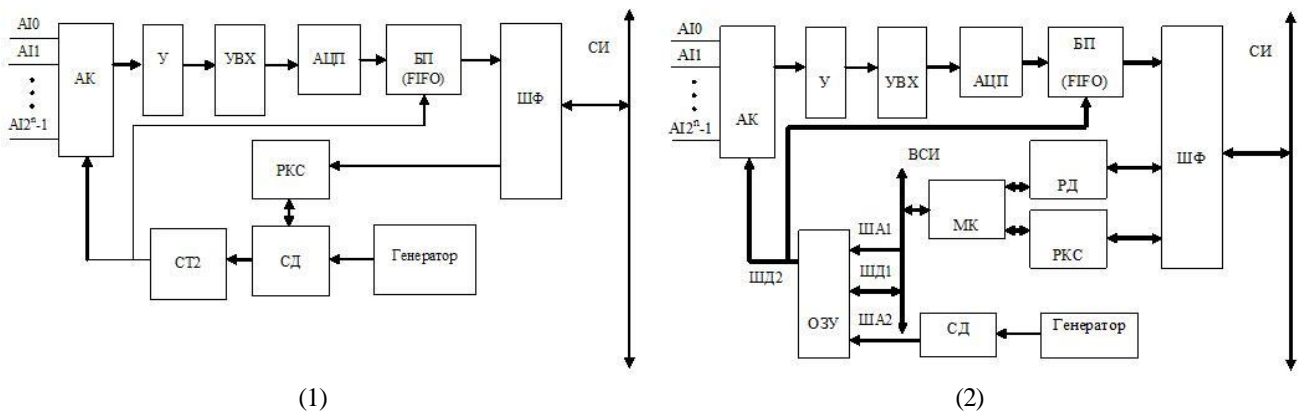


Рисунок 3 – ИМ с программируемыми частотами коммутации

где АІ – аналоговый вход, АК – аналоговый коммутатор, У – усилитель, УВХ – устройство выборки и хранения, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, БП – буферная память, ШФ – шинный формирователь, СИ – системный интерфейс, ВСИ – внутренний системный интерфейс, ШД – шина данных, ША – шина адреса, ОЗУ – оперативное запоминающее устройство, МК – микроконтроллер, РД – регистр данных, РКС – регистр команд и состояний, СД – счетчик-делитель.

1. Классическая структура микропроцессорного измерительного модуля, в котором обмен данными между процессором, оперативной памятью, регистром команд и состояний осуществляется по системному интерфейсу.

2. Быстродействующая структура с двухпортовым ОЗУ, в которое загружается таблица расписания процессором, получившим его, в свою очередь, от центрального вычислителя системы, вторая шина данных ОЗУ соединена совходами номера канала аналогового коммутатора. Перебор адресов осуществляется с помощью генератора и счетчика.

Значение критерия эффективности для ИИС, имеющей в своем составе модули с автономной синхронизацией вычисляется по формуле:

$$P = \frac{\sum_{j=1}^J \left( \frac{N_{И} (f + f_{и} / f_{mm} + \left[ \frac{1}{f_{mm}} \times (tb_{j+l} \times td_j) \right])^2}{f_{max}^2} \right)^{j \times p_j}}{l_{max} \sum_{j=1}^J (j-1)} \quad p_j = \begin{cases} 1, & \tau_j \neq 0 \\ 0, & \tau_j = 0 \end{cases}$$

**В четвертой главе** проведена проверка работоспособности алгоритмов составления расписания работы многоканальной ИИС, приведены примеры использования алгоритмов составления расписания работы многоканальной ИИС при испытаниях на безопасность в условиях воздействия на объект электромагнитных полей и измерениях сигналов характерных для аварийных ситуаций работы энергетического оборудования компрессорной установки.

В качестве теоретической задачи для проверки предложенного метода решения задачи составления расписания работы измерительной системы рассматривается ряд тестовых заданий, для которых оптимальное решение известно. Результат работы программного средства, выполненного на основе алгоритмов представленных в главе 3, сравнивается с оптимальным решением. Работа программного средства оценивается по величине функции штрафов для каждого  $S_j$ .

Заданы сигналы  $\{S_j\}$ , частоты опроса измерительных каналов приведены в таблице 2,

Таблица 2– Частоты опроса измерительных каналов

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$f_j$	$f_{max}$	$\frac{f_{max}}{2}$	$\frac{f_{max}}{4}$	$\frac{f_{max}}{4}$	$\frac{f_{max}}{4}$	$\frac{f_{max}}{8}$	$\frac{f_{max}}{8}$	$\frac{f_{max}}{8}$	$\frac{f_{max}}{8}$	$\frac{f_{max}}{8}$	$\frac{f_{max}}{8}$	$\frac{f_{max}}{8}$	$\frac{f_{max}}{16}$	$\frac{f_{max}}{16}$
j	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
$f_j$	$\frac{f_{max}}{16}$	$\frac{f_{max}}{16}$	$\frac{f_{max}}{16}$	$\frac{f_{max}}{16}$	$\frac{f_{max}}{16}$	$\frac{f_{max}}{16}$	$\frac{f_{max}}{16}$	$\frac{f_{max}}{16}$	$\frac{f_{max}}{16}$	$\frac{f_{max}}{16}$	$\frac{f_{max}}{16}$	$\frac{f_{max}}{16}$	$\frac{f_{max}}{16}$	$\frac{f_{max}}{16}$

измерительная система включает 6 измерительных модулей, два – 2-канальных и четыре – 8-канальных. Расписание работы ИС представлено в таблице 3.

Таблица 3–Расписание работы ИИС

№ канала	Номер такта																ИМ	Штраф по формуле (2.9)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		0,000000
2	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0		0,000661
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0,000000
4	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0		0,000165
5	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0		0,000331
6	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1		0,000165
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0,000000
8	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		0,000083
9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0		0,000083
10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		0,000083
11	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0		0,000083
12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0		0,000083
13	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0		0,000165
14	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1		0,000083
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0,000000
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0,000041
17	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0,000041
18	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0,000041
19	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0,000041
20	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0,000041
21	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0,000041
22	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0,000083
23	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0		0,000041
24	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		0,000041
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0		0,000041
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0		0,000041
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		0,000041
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0		0,000041
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0		0,000041
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		0,000083
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		0,000041
465	4	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	5	4		0,002728

В качестве практического применения рассматривается измерение сигналов, характерных для аварийных ситуаций работы энергетического оборудования компрессорной установки (КУ). Контроль электропривода КУ осуществляется в виде определения отклонения работы установки от нормального режима и регистрации отклонения от этого режима с целью предотвращения аварийных ситуаций. Номинальный режим электродвигателя привода КУ имеет характеристику, показанную на рисунке 5.

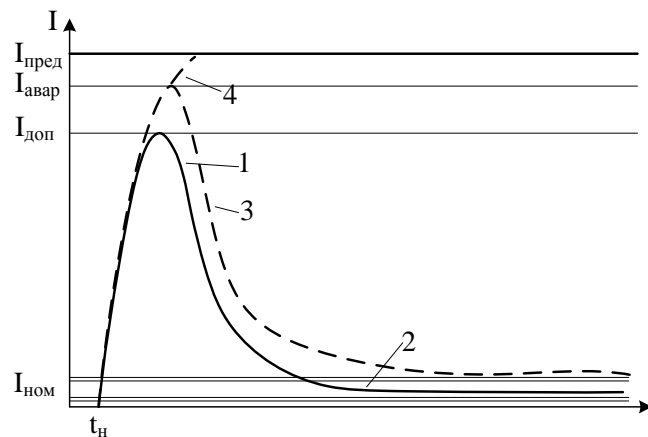


Рисунок 5 – Значение тока электродвигателя при пуске – 1, нормальном режиме работы – 2, предаварийном режиме – 3, при аварии – 4

Признаками состояния оборудования «требуется вмешательство» является превышение пускового тока некоторого значения, допустимого для данного вида оборудования, увеличение времени набора оборотов, а также превышение значения рабочих токов.

В соответствии с формулами вычисляется длительность кадра синхронизации  $T_n = 1 / f_{jmin}$ , и количество тактов синхронизации  $N_n = T_n \times f_{jmax}$ . При этом частоты опроса корректируются в сторону увеличения для того, чтобы сделать их кратными степени двойки.

В **заключении** подводятся итоги работы, делаются выводы об эффективности и применимости результатов.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Сформулирована задача составления расписания работы многоканальной ИИС; разработаны критерии эффективности в виде функций штрафа за задержку запуска измерительного канала по отношению к моменту начала такта синхронизации; приведен способ уменьшения погрешности косвенных измерений в многоканальных ИИС; предложен способ составления расписания чтения результатов измерения и функция штрафов для случая, когда есть неограниченная возможность изменять конфигурацию быстродействующего модуля; предложен критерий эффективности для минимизации «дрожания частот опроса».



Предложен метод решения задачи составления расписания работы измерительных модулей многоканальной ИИС, доказано, что при этом алгоритмом направленного поиска находится оптимальное или квазиоптимальное решение, рассчитано отклонение этого решения от оптимального; предложена архитектура ИМ, позволяющая снизить функции штрафов при наличии в задании сигналов с жесткой привязкой ко времени  $\tau \neq 0$ , приведена формула расчета критерия эффективности; разработаны алгоритмы составления расписания работы ИИС, оценена вычислительная сложность алгоритмов. Предложена методика подготовки испытаний сложных технических объектов, позволяющая при выполнении синхронных измерений параметров быстропротекающих технологических процессов получить минимальную погрешность датирования отсчетов. Способ подготовки заданий на измерительный эксперимент позволяет применить алгоритмы, находящие оптимальные или близкие к оптимальным решения за полиномиальное время.

Проведена проверка работоспособности алгоритмов составления расписания работы многоканальной ИИС, приведены примеры использования алгоритмов составления расписания работы многоканальной ИИС. Применение результатов работы позволяет сократить погрешность датирования при измерении высокочастотных сигналов из задания на измерительный эксперимент до 50%.

#### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

##### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Алексеев, В. В. Задача составления расписания многоканальных средств измерений с автоматической коррекцией. Критерии эффективности / В. В. Алексеев, А. М. Боронахин, Е. Ю. Закемовская, П. Г. Королёв, Н. В. Романцова // Приборы. – 2011. – № 7. – С. 45-49.
2. Грубо, Е.О. Алгоритм неполного перебора составления расписания работы измерительной системы. / Е.О. Грубо, П.Г. Королев, Н.В. Романцова, А.В. Утушкина // СПб., Известия СПбГЭТУ. – 2013. – №2. – С. 66-71.
3. Романцова, Н. В. Составление расписания работы измерительной системы методом направленного поиска. / Н.В. Романцова, А.В. Царёва. // СПб., Известия СПбГЭТУ, – 2013. – №10. – С. 65-68.
4. Королев, П.Г. Составление расписаний работы информационно-измерительных и управляющих систем./ П.Г. Королев, Н.В. Романцова, А.В. Царева// М.: «Приборы», – 2015. – № 10.С.22-28.

##### Публикации в других изданиях и материалы конференций

1. Грубо, Е.О. Многоканальный регистратор для систем мониторинга экологических параметров технологического процесса./ Е.О. Грубо, П.Г. Королев, Н.А. Кузьмина, Н.В. Романцова // Труды Всероссийского конгресса. «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы

- устойчивого развития арктических регионов России» - СПб., 14 – 15 ноября 2008.–С. 102-106.
2. Королев, П.Г.Динамические составляющие погрешности многоканальных регистраторов данных. / П.Г.Королев, Н.В.Романцова, А.В.Утушкина// Международный конгресс «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов России», научно-практическая конференция «Транспортно-коммуникационная система Арктики в геополитическом взаимодействии и управлении регионами в условиях чрезвычайных ситуаций», СПб., 13-14 ноября 2009. –С. 120-125.
  3. Закемовская, Е.Ю. Особенности программирования измерительных систем с фиксированным составом модулей. / Е.Ю. Закемовская, П.Г. Королев, Н.В. Романцова.// Международный конгресс «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов России». Научно-практическая конференция «Наукоемкие и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий»,– СПб, 12-13 нояб. 2010 г. – С. 137-142.
  4. Романцова, Н. В. Разработка алгоритмов перераспределения ресурсов в измерительно-вычислительных системах. / Н.В. Романцова. // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Пенза, 19–22 апр. 2011. / Пенз. гос. унив., – Пенза, 2011. Т.1. –С. 132-135.
  5. Королёв, П.Г. Распределение ресурсов информационно-измерительной системы. / П.Г. Королев, Н.В. Романцова. // 64-я Науч.-тех. конф. профессорско-преподавательского состава университета: Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Санкт-Петербург, 25 янв. – 5 фев. 2011. – СПб, 2011. –С. 184-188.
  6. Королёв, П.Г. Компоненты измерительных систем для исследования быстропротекающих технологических процессов. / П.Г. Королёв, Н.А. Кузьмина, Н.В. Романцова, А.В. Царева. // «Цели развития тысячелетия» и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов»: материалы VI междунар. конгресса. Науч.-техн. конф. «Геополитические факторы устойчивого развития Арктики и инновационные технологии прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций», г. Пенза, 15 – 16 нояб. 2013 г. / СПб.: 2013.– С. 154-158.