

Системный анализ, управление и обработка информации

УДК 681.3

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ПЗС-МАТРИЦЫ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВИЗОРА

Е.А. Ахполова

АО «РКЦ «ПРОГРЕСС»
Россия, 443009, г. Самара, ул. Земяца, 18

E-mail: ahpolova_elena@mail.ru

Рассматривается проблема контроля технического состояния фоточувствительной ПЗС-матрицы, используемой в оптико-электронном преобразователе для дистанционного зондирования Земли с борта космического аппарата. Показана зависимость тепловой картины, полученной с поверхности микросхемы, от характера и локализации дефекта. Предложена методика оценки технического состояния по тепловой картине, полученной с помощью тепловизора. Представлены особенности работы тепловизора при проведении диагностики технического состояния ПЗС-матрицы. Рассматривается способ определения предельных значений температурного диапазона с помощью метода моментов. Описана структурная схема программно-аппаратного комплекса для сбора и обработки диагностической информации.

Ключевые слова: приборы с зарядовой связью, оптико-электронный преобразователь, диагностика, тепловой метод контроля, программно-аппаратный комплекс.

Оптико-электронный преобразователь (ОЭП) на основе фоточувствительных приборов с зарядовой связью (ФПЗС) входит в состав системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которая позволяет получать данные о состоянии земной поверхности. Информация с подобных систем широко используется в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства, для решения научных задач, а также в военно-стратегических целях [1].

К оптико-электронной аппаратуре предъявляются повышенные требования надежности ($P = 0,998$) на протяжении активного срока эксплуатации (не менее 5 лет). В процессе производства и хранения ОЭП в нем могут появляться и накапливаться неисправности, тем или иным образом влияющие на его работоспособность. Некоторые из них приводят к тому, что объект перестает отвечать предъявляемым к нему требованиям нормативно-технической или конструкторской документации [2].

Основную роль в полноценной работе оптико-электронного преобразователя играет фоточувствительная ПЗС-матрица, которая принимает и преобразовывает движущееся световое изображение в цифровой сигнал. Таким образом, перед

производителем ставится задача по организации диагностики функционирования микросхемы во время монтажа и испытания прибора.

Методика контроля и обработки результатов

На практике чаще всего используются методы контроля технического состояния фоточувствительной ПЗС-матрицы, основанные на измерении ее фотоэлектрических и электрических параметров (эффективность переноса заряда, зарядовая вместимость, напряжение насыщения и т. д.). Данные методы диагностики требуют высокой квалификации персонала, способного выполнять работу на узкоспециализированной аппаратуре, а также продолжительны по времени.

В связи с субъективностью оценки технического состояния микросхемы вышеуказанные методы обладают низкой достоверностью, а также являются малоэффективными при большом числе диагностируемых элементов. Однако известно, что при протекании через микросхему электрического тока порядка 90-95 % энергии в итоге превращается в тепловую.

Распределение теплового излучения по поверхности ФПЗС и его интенсивность зависят от теплофизических параметров материала и от возможного наличия дефектов в нем. Дефект является причиной интегрального или локального искажения теплового поля. Картина поля меняется в зависимости от расположения в объеме, природы и размера самого дефекта. Тепловая картина меняется при наличии локального разогрева (по причине замыкания проводников, изменения кристаллической структуры светочувствительной поверхности и др.) или более холодного участка (вызванного трещиной, пробоем, порой и т. д., которые не пропускают электрический ток).

Для снятия тепловой картины с поверхности микросхемы используется тепловизионный метод неразрушающего контроля. При регистрации температуры с помощью тепловизора значение ее зависит от коэффициента теплового излучения и соответствует радиационным значениям объекта. Для преобразования измеренной температуры в истинные значения используется следующая формула:

$$t_O = (1 - \varepsilon_E/\varepsilon_O)t_C + \varepsilon_E t_E/\varepsilon_O + (t'_O - t'_E)/\varepsilon_E, \quad (1)$$

где t_O – истинная температура объекта; t_E – истинная температура эталона; t_C – истинная температура окружающей среды; t'_O , t'_E – измеренные радиационные температуры объекта и эталона соответственно; ε_E – коэффициент теплового излучения эталона; ε_O – коэффициент теплового излучения объекта [3].

Сложность метода заключается в необходимости калибровки прибора в процессе измерения. С этой целью в поле зрения тепловизора помещается эталонный источник температуры с известным значением коэффициента теплового излучения и температуры.

Таким образом, тепловой метод неразрушающего контроля заключается в сравнительном анализе измеренного значения температуры поверхности микросхемы и расчетного значения температуры, которое принимается за эталон. В связи с особенностями конструкции, допуском на теплофизические и электрические параметры микросхемы, погрешностями измерения расчетные значения температуры задают диапазон допуска температуры матрицы.

При выполнении условия $t_{\min} \leq t'_O \leq t_{\max}$ объект можно классифицировать как работоспособный. В случае выхода измеренного значения температуры за пределы указанного диапазона объект характеризуется как неработоспособный [3].

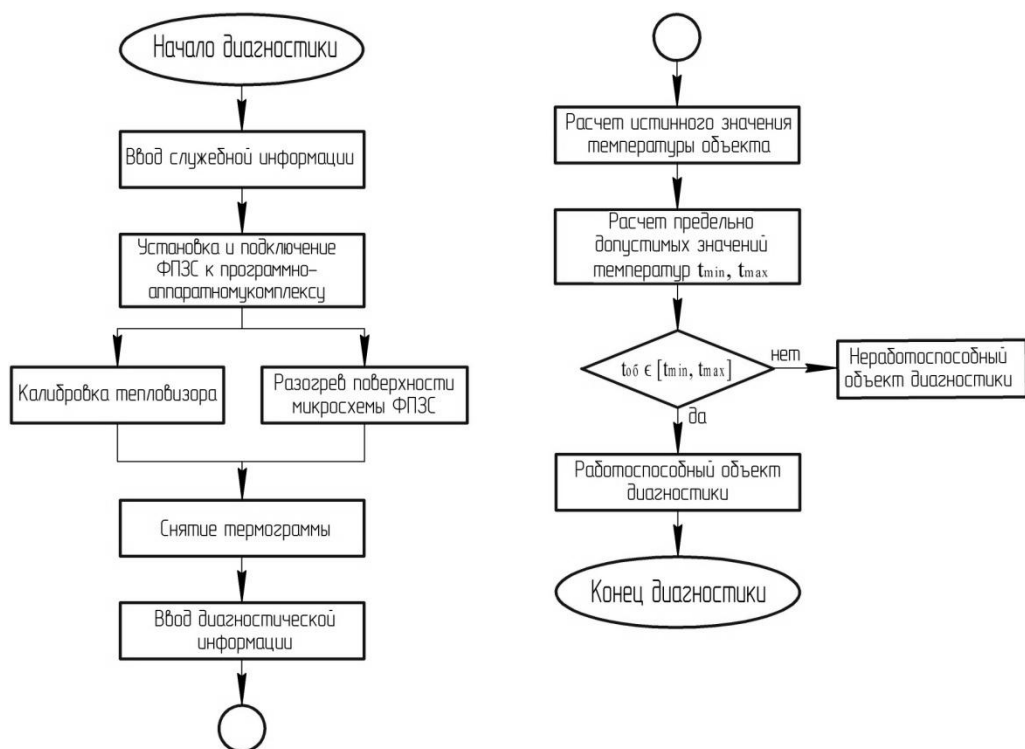


Рис. 1. Алгоритм автоматизированного контроля технического состояния фоточувствительной ПЗС-матрицы

Определение предельных значений температурного диапазона осуществляется с помощью выражений:

$$t_{\min} = m(t) - 3\sigma(t); \quad t_{\max} = m(t) + 3\sigma(t),$$

где t_{\min} , t_{\max} – предельные минимальное и максимальное значения температурного диапазона соответственно; $m(t)$ – математическое ожидание температуры поверхности микросхемы; $\sigma(t)$ – среднеквадратическое отклонение температуры поверхности микросхемы.

При этом математическое ожидание $m(t)$ определяется по формуле

$$m(t) = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n},$$

где t_i – температура поверхности микросхемы ФПЗС, измеренная в i -м цикле и преобразованная по формуле (1); n – количество измерений.

Среднеквадратическое отклонение $\sigma(t)$ температуры поверхности микросхемы определяется как

$$\sigma(t) = \sqrt{D(t)},$$

где $D(t)$ – дисперсия температуры, выраженная формулой

$$D(t) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - m(t_i))^2.$$

Таким образом, определяется диапазон допустимых значений для темпера-

туры поверхности ПЗС-матрицы $[t_{\min}, t_{\max}]$. Путем сравнения измеренного с помощью тепловизора значения t_0 с значениями t_{\min}, t_{\max} осуществляется разбраковка объектов диагностики на работоспособные и неработоспособный.

Алгоритм контроля ПЗС-матрицы представлен на рис. 1.

Для обработки информации и оперативного принятия решения о техническом состоянии ФПЗС необходимо автоматизировать процесс температурной диагностики. Структурная схема программно-аппаратного комплекса представлена на рис. 2.

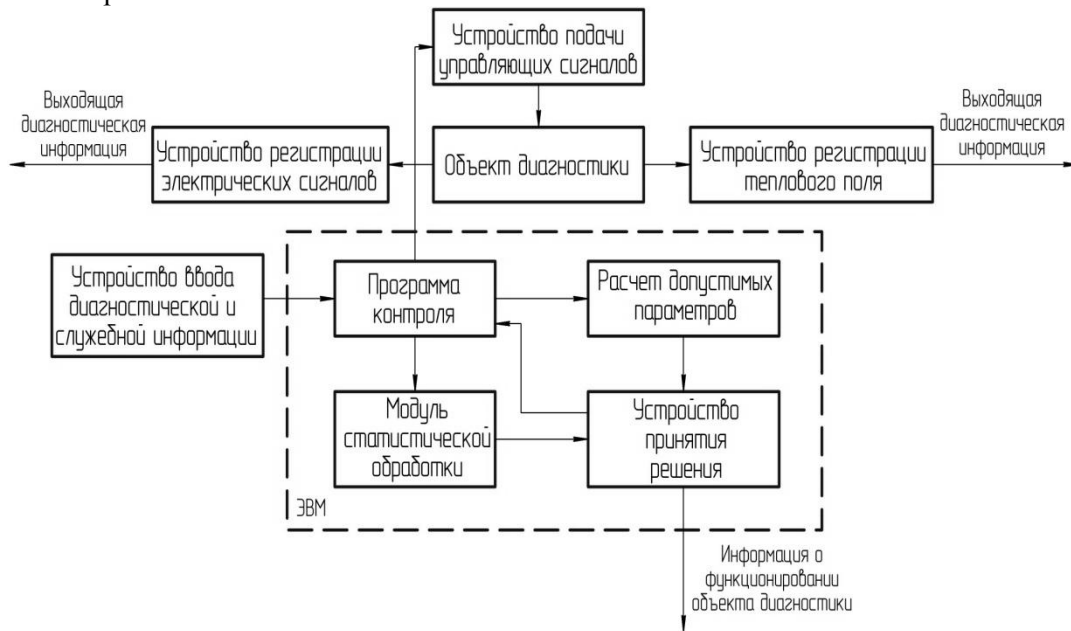


Рис. 2. Структурная схема программно-аппаратного комплекса для температурной диагностики фоточувствительной ПЗС-матрицы

Устройство подачи управляющих сигналов представляет собой отладочную плату компании XILINX на базе ПЛИС Virtex-6, которая обладает широкими возможностями для разработки и отладки приложений высокоскоростных последовательных интерфейсов. Управление устройством осуществляется через ЭВМ благодаря программе контроля. Сигналы, подаваемые на объект диагностики, в данном случае ФПЗС-матрицу, позволяют имитировать ее штатную работу.

В качестве устройства регистрации теплового поля выступает тепловизор с оптико-механической системой сканирования. Основные узлы, из которых состоит прибор: оптическая система приема, оптико-механическая система сканирования, видеоконтрольное устройство, приемник излучения и усилительно-преобразовательного электронного тракта. Оптическая система создает изображение на приемнике излучения в виде контура объекта в инфракрасных лучах. Получение тепловой картины объекта обеспечивается системой сканирования, затем с приемника усиливается и передается на индикатор.

В качестве устройства регистрации электрических сигналов используется осциллограф, который позволяет получать диагностическую информацию о техническом состоянии объекта по электрическим параметрам выходного сигнала (амплитуда, частота и т. д.).

Устройство ввода диагностической и служебной информации, а также ЭВМ

с программным комплексом и базой данных представляют собой человеко-машинный интерфейс. Инженер-аналитик следит за процессом диагностики и дает заключение о техническом состоянии фоточувствительной ПЗС-матрицы [4].

Заключение

Таким образом, в процессе испытаний в автоматическом режиме измеряются параметры микросхемы, определяется ее работоспособность, производится запись данных в базу данных испытаний. Регистрация информации о нештатных ситуациях при функционировании микросхемы и анализ причин возникновения отклонений в ее работе позволяют повысить надежность работы оптико-электронного преобразователя в штатном режиме на борту космического аппарата, а также сократить время на диагностику ФПЗС.

Автоматизация контроля фоточувствительной ПЗС-матрицы с помощью тепловизора способствует повышению качества и эффективности диагностики за счет увеличения точности измерений, достоверности принятия решений и уменьшения трудозатрат на процесс испытаний [5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бакланов А.И.* Системы наблюдения и мониторинга: Учеб. пособие. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 234 с.; ил.
2. *Ахполова Е.А., Орлов С.П.* Использование метода Байеса для обработки статистических данных результатов испытаний оптико-электронного преобразователя // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – № 1 (41). – 2014. – С. 32–37.
3. *Ахполова Е.А.* Использование метода термографии при диагностике оптико-электронного преобразователя // Мат-лы XX Науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов. – Королев, 2014. – С. 148–149.
4. *Ахполова Е.А.* Метод контроля работоспособности фоточувствительной ПЗС-матрицы оптико-электронного преобразователя // Мат-лы XVI Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: Изд-во ЦРНС, 2014. – С. 126-130.
5. *Евланов Л.Г.* Контроль динамических систем. – М.: Наука, 1970. – 432 с.

Статья поступила в редакцию 29 января 2015 г.

METHODOLOGY OF TECHNICAL STATE CONTROL THE PHOTOSENSITIVE CCD MATRIX USING THERMAL IMAGER

E.A. Ahpolova

State Research-and-Production Space Rocket Centre «TsSKB-Progress»
18, Zemetza st., Samara, 443009, Russia

The problem of the technical- state control of photosensitive CCDs used in optoelectronic converters for remote sensing of the Earth from a spacecraft is considered. The dependency of the thermal picture obtained from the chip surface, on the character and localization of the defect is shown. The method of estimation of technical condition by means of the thermal picture obtained by a thermal imager from the surface of the chip is proposed. The specific features of the thermal imager operation during the technical-state control of CCDs are presented. The way to determine the limiting values of the temperature range by the method of moments is discussed. A block diagram of hardware and software system for collection and processing of diagnostic information is described.

Keywords: *Charge-Coupled Device, optoelectronic converter, diagnostics, method of thermal analysis, hardware-software system.*

Elena A. Ahpolova, control foreman workshop.

УДК 681.5:316.35.023.4

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МАЛЫХ СОЦИАЛЬНЫХ ГРУПП С УЧЕТОМ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА

И.Б. Герасимова, Л.Н. Мухамедрахимова

Уфимский государственный авиационный технический университет
Россия, 450103, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12

E-mail: Liliya.Muhamedrahimova@gmail.com

Рассматривается проблема повышения эффективности функционирования малых социальных групп (МСГ) с учетом человеческого фактора. Для исследования данной проблемы строится когнитивная динамическая модель МСГ, основанная на линейных отношениях и учитывающая психофизиологическую совместимость членов группы. Психофизиологическая совместимость заключается в определенных сочетаниях типов темпераментов и порождает межличностную привлекательность членов группы. Посредством компьютерного моделирования оценивается темп деятельности МСГ, а также его устойчивость и ритмичность. Каждый член группы рассматривается как личность, способная к самоорганизации и имеющая свой темперамент.

Ключевые слова: *малая социальная группа, структура личности, когнитивная модель, система, психофизиологическая совместимость, темперамент.*

Говоря об эффективном управлении организациями, одним из главных элементов, выполняющим совокупность специфических видов деятельности, принимающим управленческие решения и связывающим воедино все составляющие элементы сложной системы управления, следует считать человеческий фактор [1]. Рациональное использование человеческого фактора, т. е. учет личностных, социально-психологических, психофизиологических, мотивационных особенностей людей, может способствовать получению значительного экономического эффекта без экономических затрат. Первыми, еще в XIX веке, кто отметил важность человеческого фактора и применял методы повышения производительности труда, основанные на личностных особенностях людей, были американские специалисты, предприниматели и ученые Ф. У. Тейлор, А. Файоль, Э. Мэйо, Ч. Бернارد, Д. МакГрегор и т. д. [2].

Одним из типов организационных структур, отвечающих условиям внешней и внутренней среды, являются адаптивные, многомерные и адхократические формы организационных структур. Например, организационной формой адхократии является бригадная структура, основу которой составляет групповая форма организации труда и производства, являющаяся, по сути, малой социальной группой (МСГ), в которой люди прямо или косвенно взаимосвязаны для реализации комплекса производственных целей и вступают в определенные межличностные отношения друг с другом.

В связи с тем, что такие группы являются автономными, состоящими из квалифицированных специалистов и управленцев и имеющими право на самостоя-

*Ильмира Барыевна Герасимова (д.т.н., доцент), профессор.
Лилия Наилевна Мухамедрахимова, аспирант.*

тельное решение конкретных проблем, при формировании подобных команд предпочтение отдается людям с универсальными знаниями и навыками, строящими отношения на взаимопомощи, взаимозаменяемости, личной ответственности, активном сотрудничестве. Возникающая сложность в таких ситуациях связана с необходимостью учитывать фактор (принцип) совместимости членов группы, что подтверждается и с точки зрения социологии, социальной психологии, и с позиции управления персоналом [3-5].

В связи с этим становится актуальным изучение совместимости членов группы на основе их интеллектуальных, организационных и психофизических характеристик. В работе для решения этой проблемы строится когнитивная линейная динамическая модель МСГ, позволяющая исследовать механизмы функционирования МСГ, совместимость различных типов личностей в ее составе, а также выявить способы повышения темпа совместной деятельности членов группы при ее заданном составе.

Когнитивная модель структуры личности

Изучение и анализ МСГ с точки зрения совместимости членов группы предполагает применение личностного и деятельностного подходов, в основе которых лежит понимание личности как устойчивого сочетания индивидуальных особенностей человека, обуславливающих типичность и постоянство его реакций, поведения, отношений, т. е. системной модели личности.

В работе предлагается подход, согласно которому личность рассматривается как устойчивая самоорганизующаяся система, обладающая регулируемой психикой, умеющая думать и осознавать свои действия, а также реализовывать целенаправленную деятельность. Другими словами, системная модель личности в форме когнитивной модели представляется в виде триады, т. е. как трехэлементное связанное множество, основными концептами которого являются интеллектуальная деятельность (ИД), организационно-трудова деятельность (ОТД) и психофизиологическое состояние (ПС). Все концепты личности взаимосвязаны и образуют единое целое, т. е. реализуется системный принцип целостности (единства).

Также личность рассматривается как самоорганизующаяся система, в которой обеспечение самоорганизации производится с помощью механизма саморегуляции – процесса формирования психической активности и управления ею для достижения осознанно выдвинутых и принятых личностью целей деятельности. Механизм саморегуляции личности реализуется с помощью положительных и отрицательных обратных связей.

В основу исследований положено представление системной модели личности в виде когнитивного орграфа, который также может быть выражен в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = -a_1 X_1 + b_1 X_2 X_3 + u_1; \\ \dot{X}_2 = -a_2 X_2 + b_2 X_1 X_3 + u_2; \\ \dot{X}_3 = -a_3 X_3 + b_3 X_1 X_2 + u_3, \end{cases} \quad (1)$$

где X_1, X_2, X_3 – темп изменения ИД, ПС и ОТД личности соответственно;

$\dot{X}_1, \dot{X}_2, \dot{X}_3$ – скорости изменения темпов ИД, ПС и ОТД соответственно;

a_1, a_2, a_3 – параметры, отражающие стабилизирующие факторы изменения темпа ИД, ПС и ОТД;

b_1, b_2, b_3 – коэффициенты, отражающие коллективное положительное влияние двух концептов личности на третий в мультипликативной форме;

u_1, u_2, u_3 – параметры, отражающие индивидуальный вклад каждого концепта в состояние личности.

Положительность знаков коэффициентов между каждой парой концептов свидетельствует об их положительном влиянии друг на друга. Изменение числовых значений коэффициентов b_i , a_i и параметров u_i приводит к формированию различных уровней состояния личности.

Анализ когнитивной модели личности на основе моделирования

Для решения задачи исследования психофизиологической совместимости членов группы были проанализированы известные типы личности (классификация по темпераменту) с точки зрения разработанной системной модели личности (1). Темперамент представляет собой устойчивое сочетание свойств нервной системы человека, обуславливающее типичные проявления личности на психологическом и социально-психологическом уровнях. Темперамент определяет: скорость и устойчивость психических процессов, темп и ритм организационно-трудовой и интеллектуальной деятельности, силу выраженности (интенсивность) психических процессов, общую направленность психической активности [3].

В соответствии с известными характеристиками типов личности и с опорой на исследования работ [3-5], в которых подробно описано поведение и свойства типов личностей в качестве руководителей и подчиненных, производилось компьютерное моделирование в среде MATLAB. Время, параметры взаимодействия и индивидуальных вкладов при формировании сценариев взяты безразмерными от 0 до 1 и заданы экспертным путем с использованием знаний из психологии управления о типах личности.

Холерик характеризуется высокой скоростью умственных процессов, быстротой выполнения операций и высоким темпом психических и психомоторных реакций.

Холерик – быстрый (имеет самые высокие темпоритмы) тип личности, характеризующийся мощным процессом возбуждения и слабым торможением ($u_2 = 2, a_2 = 0,4$). Он быстро думает и принимает решения, он не желает тормозиться и перепроверять свои выводы ($a_3 = 0,8$).

В работе холерик нередко амбициозен и честолюбив, обладает высокой работоспособностью ($u_1 = 1, u_3 = 1$), однако слабо организован, эмоционален и неуравновешен ($b_1 = 0,1$).

Холерик с трудом переносит снижение активности и необходимость оставаться некоторое время в покое: эмоции оказывают повышенное воздействие на ОТД ($b_3 = 0,1$).

Холерик относится к неустойчивым типам темперамента, и действительно, при полученных значениях коэффициентов ($u_1=1, u_2=2, u_3=1, a_1=0,6, a_2=0,4, a_3=0,6, b_1=0,1, b_2=0,048, b_3=0,1$) системная модель личности находится в состоянии статической неустойчивости. Однако если холерик с накоплением жизненного опыта становится более уравновешенным, т. е. $a_2=0,6$, и его эмоции не так сильно влияют на интеллектуальную и трудовую деятельность, т. е. коэффициенты b_1, b_3 понизятся до 0,07, то система станет устойчивой и темпы деятельности будут достигать высоких значений: $X_{ид}=3,25, X_{пс}=4,28, X_{отд}=3,25$.

Флегматик характеризуется низкой скоростью умственных процессов, замедленностью выполнения операций и низким темпом психических и психомоторных реакций.

Флегматик – медленный человек, внешне скуп на проявление эмоций и чувств ($u_2=0,5$). В работе он производителен, компенсируя свою неспешность прилежанием, упорством и настойчивостью, оставаясь при этом спокойным и уравновешенным ($u_1=1, u_3=1, b_1=0,12, b_3=-0,05$). В стрессовой ситуации не волнуется, сохраняет самообладание и ясную голову ($b_2=0,12$).

У данного типа личности процессы торможения всегда уравновешивают процессы возбуждения ($a_1=1, a_2=1, a_3=1$), понижена скорость протекания психических процессов и реакций, особенно быстроты ума.

Флегматик – очень устойчивый тип личности, производительный и неспешный, что достигается при полученных коэффициентах ($u_1=1, u_2=0,5, u_3=1, a_1=1, a_2=1, a_3=1, b_1=0,22, b_2=0,12, b_3=0,18$), характеризующих достижение низких темпов деятельности: $X_{ИД}=1,17, X_{ПС}=0,66, X_{ОТД}=1,14$.

Сангвиник характеризуется высокой скоростью умственных процессов, быстротой выполнения операций и низким темпом психических и психомоторных реакций.

Сангвиник очень продуктивен в работе, когда ему интересно, и приходит в сильное возбуждение от этого; если работа неинтересна, он относится к ней безразлично, ему становится скучно ($b_1=0,2, b_2=0,16, b_3=0,2$). Это человек сильный, энергичный, с хорошим самоконтролем ($a_1=0,9, a_2=0,9, a_3=0,9$). Как правило, он деловой, выносливый и работоспособный ($u_1=1, u_2=1, u_3=1$).

Сангвиник относится к устойчивым типам личности, какой и является система при полученных коэффициентах ($u_1=1, u_2=1, u_3=1, a_1=0,9, a_2=0,9, a_3=0,9, b_1=0,2, b_2=0,16, b_3=0,2$). В работе сангвиник отмечается достаточно высокой продуктивностью: $X_{ИД}=1,76, X_{ПС}=1,66, X_{ОТД}=1,76$.

Меланхолик характеризуется низкой скоростью умственных процессов и замедленностью выполнения операций при осуществлении ИД, высоким темпом психических и психомоторных реакций.

Меланхолик – человек легко ранимый, склонный к постоянному переживанию различных событий, свои астенические переживания он не может сдерживать усилием воли ($a_1=0,6, a_2=0,4, a_3=0,7$). Этот тип личности имеет высокую утомляемость: работать с максимальной самоотдачей не способен, характеризуется быстрым падением работоспособности ($u_1=0,5, u_3=0,5, b_2=0,3$). Меланхолики болезненно реагируют на разные неполадки в организации: они всегда стараются действовать точно по инструкции ($b_1=0,25, b_3=0,25$).

Меланхолик – очень неустойчивый тип личности, и система при полученных параметрах становится статически неустойчивой ($u_1=0,5, u_2=1, u_3=0,5, a_1=0,6, a_2=0,4, a_3=0,7, b_1=0,25, b_2=0,3, b_3=0,25$). Однако, даже имея такой темперамент, меланхолики научились себя «маскировать». «Маскировка» – это внешний контроль над своими переживаниями, т. е. увеличение коэффициентов саморегуляции до $a_1=0,8, a_2=1, a_3=0,8$, и меньшее влияние эмоций на деятельность ($b_1=0,2, b_3=0,2$), тогда меланхолик достигает следующих темпов: $X_{ИД}=0,91, X_{ПС}=1,25, X_{ОТД}=0,91$.

Когнитивная динамическая модель малой группы

Рассматривается МСГ, состоящая из трех человек, находящихся на одном иерархическом уровне (занимающих одну и ту же должность или выполняющих

близкие по содержанию функции) и объединенных общей целью – выполнением какого-либо проекта (рис. 1).

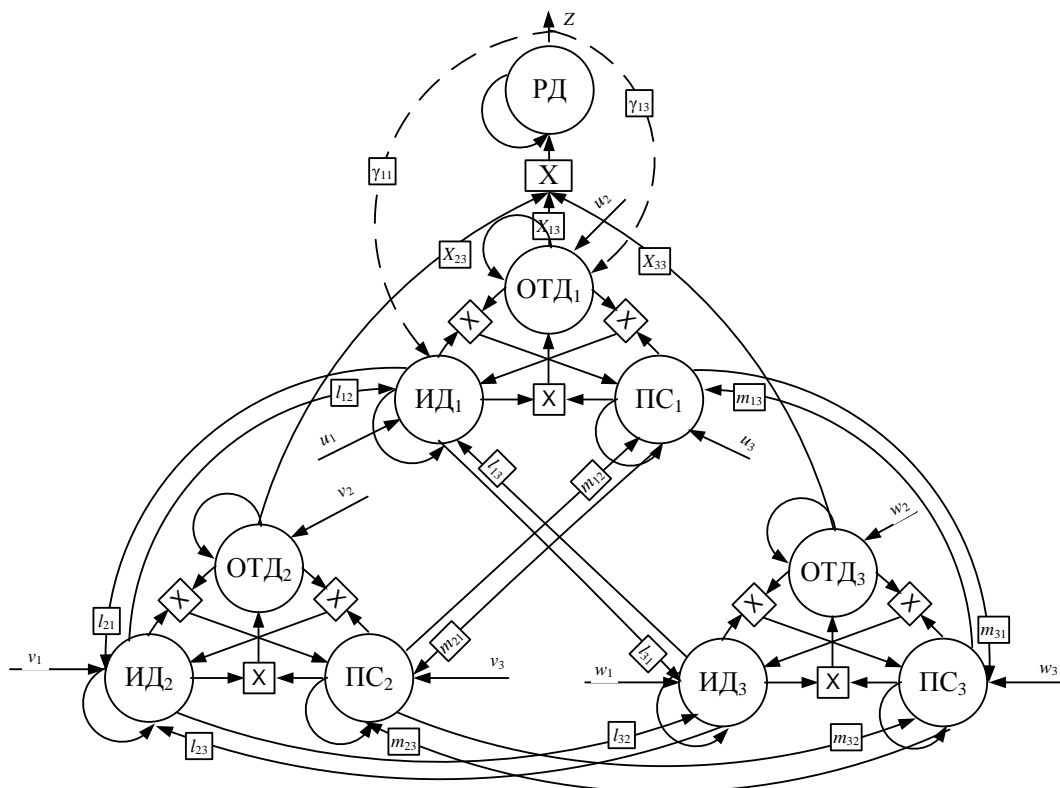


Рис. 1. Когнитивная модель МСГ из трех личностей

На рис. 1 l_{ij} – коэффициенты взаимодействия, отражающие степень влияния j -го концепта на i -тый на интеллектуальном уровне;

m_{ij} – коэффициенты взаимодействия, отражающие степень влияния j -го концепта на i -тый на психофизическом уровне;

γ_{11}, γ_{13} – коэффициенты, отражающие восприятие лидером темпов деятельности на интеллектуальном и организационно-трудовом уровнях.

Задачей взаимной деятельности личностей является коллективное поддержание определенного темпа выполнения работ по проекту.

Поскольку все члены МСГ находятся на одном уровне иерархии, то ни один из них не является руководителем проекта. В связи с этим социальная власть осуществляется через лидерство одного из членов группы. В модели феномен лидерства реализуется через наличие отрицательных обратных связей, идущих от результата деятельности (РД) к лидеру группы (личность с индексом 1), к его концептам ИД₁ и ОТД₁, что означает рациональное восприятие и осознание темпов деятельности группы в целом.

Взаимодействие между личностями осуществляется на уровне концепта ИД, так как осуществляется обмен информацией, идеями, осуществляется совместный интеллектуальный труд, и концепта ПС в виде линейных связей. При этом природа взаимодействия такова, что одна личность либо стимулирует (с помощью положительных обратных связей), либо тормозит (с помощью отрицатель-

ных обратных связей) деятельность других членов МСГ.

Выходной координатой функционирования МСГ является темп ее деятельности (скорости выполнения работы), полученный как интегральный (мультипликативный) эффект от объединения индивидуальных темпов ОТД личностей. От темпа трудовой деятельности неотделим такой показатель, как ритм деятельности, который также оценивается в качестве выходной координаты. Заданный темп в работе определяет работоспособность, а ритм создает основу для высокой производительности и одновременно делает работу менее утомительной. Нарушение ритмичности трудового процесса отрицательно сказывается на самочувствии работающих, на результатах их труда и состоянии физиологических функций [6].

Таким образом, МСГ является сложной системой, где каждый из элементов оказывает свое влияние на результат деятельности, вносит свой вклад и находится в определенных отношениях с другими членами группы, также оказывая на них влияние.

Когнитивная динамическая модель МСГ (см. рис. 1) также может быть выражена в виде системы дифференциальных уравнений в форме Коши:

$$\begin{cases} \dot{Z} = -\alpha Z + X_3^1 X_3^2 X_3^3, \\ \dot{X}_1^1 = -a_1^1 X_1^1 + b_1^1 X_2^1 X_3^1 + u_1^1 + l^{12} X_1^2 + l^{13} X_1^3 - \gamma_1^1, \\ \dot{X}_2^1 = -a_2^1 X_2^1 + b_2^1 X_1^1 X_3^1 + u_2^1 + m^{12} X_2^2 + m^{13} X_2^3, \\ \dot{X}_3^1 = -a_3^1 X_3^1 + b_3^1 X_1^1 X_2^1 + u_3^1 - \gamma_3^1, \\ \dot{X}_1^2 = -a_1^2 X_1^2 + b_1^2 X_2^2 X_3^2 + u_1^2 + l^{21} X_1^1 + l^{23} X_1^3, \\ \dot{X}_2^2 = -a_2^2 X_2^2 + b_2^2 X_1^2 X_3^2 + u_2^2 + m^{21} X_2^1 + m^{23} X_2^3, \\ \dot{X}_3^2 = -a_3^2 X_3^2 + b_3^2 X_1^2 X_2^2 + u_3^2, \\ \dot{X}_1^3 = -a_1^3 X_1^3 + b_1^3 X_2^3 X_3^3 + u_1^3 + l^{31} X_1^1 + l^{32} X_1^2, \\ \dot{X}_2^3 = -a_2^3 X_2^3 + b_2^3 X_1^3 X_3^3 + u_2^3 + m^{31} X_2^1 + m^{32} X_2^2, \\ \dot{X}_3^3 = -a_3^3 X_3^3 + b_3^3 X_1^3 X_2^3 + u_3^3, \end{cases}$$

где \dot{Z} , Z – скорость темпа и темп деятельности группы, полученный как результат интеграции (мультипликации) темпов ОТД каждой из личностей;

α – параметр стабилизации темпа деятельности МСГ.

Анализ когнитивной модели малой социальной группы на основе моделирования

Из всех вариантов сочетаний темпераментов в качестве примера были выбраны одни из наиболее благоприятных: «сангвиник – флегматик», «сангвиник – меланхолик», «меланхолик – флегматик», и таким образом составлена МСГ из трех типов личностей: «сангвиник – флегматик – меланхолик».

В процессе анализа производилось изменение отдельных параметров модели и оценивалось влияние этих параметров на конечный темп выполнения проекта при совместной деятельности членов МСГ, а также на его устойчивость и ритмичность.

Лидером в МСГ является сангвиник, поскольку ни меланхолик, ни флегматик не имеют склонности к лидерству и чаще всего занимают ведомые позиции; сангвиник же часто бывает неформальным лидером в группе.

На интеллектуальном уровне отношения характеризуются положительными обратными связями, т. к. все члены МСГ благоприятно влияют друг на друга, обмениваются идеями и сотрудничают. Отношения между меланхоликом и флегматиком средние $l_{23}=l_{32}=0,1$, а между сангвиником и флегматиком, сангвиником и меланхоликом они выше, поскольку лидер оказывает на своих коллег большее влияние и они больше обмениваются идеями с лидером, чем друг с другом ($l_{21}=0,15, l_{31}=0,2, l_{12}=l_{13}=0,15$).

Коэффициенты взаимоотношения на уровне ПС меньше по значениям, чем коэффициенты взаимоотношений на уровне ИД, т. к. рассматриваются деловые отношения. К тому же в данном случае существуют некоторые особенности:

- меланхолик в общении характеризуется замкнутостью, необщительностью и трудностями в установлении контактов с другими людьми ($m_{12}=0,05, m_{32}=0,05$), но зависит от них и особенно нуждается в поддержке со стороны руководителя или лидера ($m_{21}=-0,15, m_{23}=-0,05$);

- флегматик не проявляет особого интереса к неформальным отношениям в компании и строит уравновешенные отношения с людьми, т. е. коэффициенты взаимоотношений на уровне ПС следующие: $m_{13}=0,05, m_{23}=-0,05, m_{33}=0,05$.

Таким образом, при полученных значениях коэффициентов ($l_{12}=l_{13}=0,15, l_{21}=0,15, l_{31}=0,2, l_{23}=l_{32}=0,1, m_{12}=m_{13}=m_{32}=0,05, m_{21}=-0,15, m_{23}=-0,05, m_{31}=0,1$) темп деятельности МНГ достигает значений $Z=2,5$ при устойчивой и ритмичной работе (рис. 2).

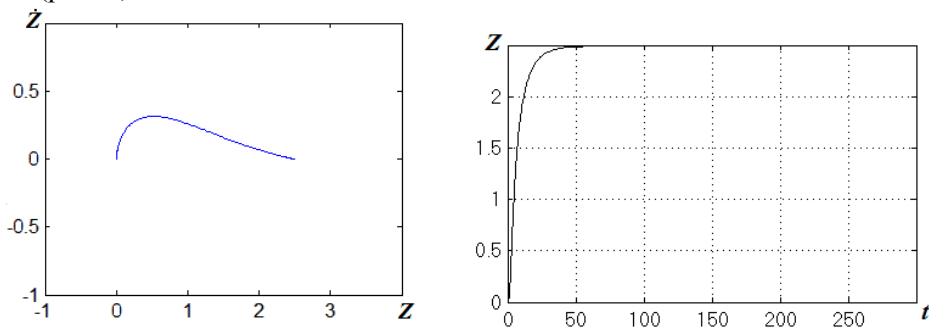


Рис. 2. Устойчивый темп деятельности группы

Флегматик нередко бывает «человеком процесса», его нужно контролировать и стимулировать к получению конкретного результата, поэтому если увеличить давление лидера на флегматика на уровне ИД до $l_{31}=0,4$ и вследствие этого возрастет его собственное давление на ОТД со стороны ИД и ПС, т. е. b_3 возрастет до 0,3, то темп деятельности возрастет до $Z=5,34$. Дальнейшее давление на флегматика приведет к неустойчивости системы.

Если же оказать малейшее давление на меланхолика или контролировать его больше (увеличить коэффициент $l_{21}=0,25$), то он не может выдержать такого давления и приведет группу в состояние статической неустойчивости.

Повысить темп деятельности МСГ до $Z=6$ возможно путем увеличения всех коэффициентов взаимодействия между личностями в два раза. При этом необходимо повысить параметр саморегуляции ИД меланхолика до 1 для того, чтобы он мог выдержать такое высокое давление со стороны лидера.

Выводы

По результатам анализа и когнитивного моделирования МСГ, составленной с учетом психофизиологической совместимости ее членов, можно сделать вывод,

что при гармонических, дружественных отношениях и сотрудничестве между членами группы достигается высокий устойчивый темп деятельности, превосходящий индивидуальные темпы деятельности членов МСГ (результат синергетического эффекта). Для повышения темпов деятельности МСГ необходимо учитывать не только профессиональные качества личности и ее индивидуальные психофизиологические особенности (темперамент), но и сложившиеся отношения между членами группы.

Построение когнитивной динамической модели МСГ позволяет не только выявить механизмы функционирования группы и спрогнозировать ее поведение, но и получить новые знания о возможных состояниях МСГ и способах их достижения. Предложенный подход дает возможность заранее определять темп деятельности группы и, таким образом, формировать группы «правильным образом» или находить пути повышения производительности уже существующих групп.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. – М.: Синтег, 1999. – 128 с.
2. Розанова В.А. Психология управления: Учеб. пособие – М.: Бизнес-школа «Интел-Синтез», 2000. – 384 с.
3. Битянова М.П. Социальная психология: Учеб. пособие. – СПб.: Питер, 2008. – 368 с.
4. Никифорова Г.С. Психология менеджмента: Учебник для вузов. – 2-е изд., доп. и перераб. – СПб.: Питер, 2004. – 639 с.
5. Ильясов Б.Г., Герасимова И.Б., Мухамедрахимова Л.Н. Когнитивная модель творческой личности // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Мат-лы XV Междунар. конф. 25-28 июня 2013 г., Самара, Россия. – Самара: СамНЦ РАН, 2013. – С. 147-152.
6. Самоукина Н.В. Эффективная мотивация персонала при минимальных финансовых затратах. – М.: Вершина, 2006. – 224 с.
7. Российская энциклопедия по охране труда: Т. 3: С-Я. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2007. – 400 с.

Статья поступила в редакцию 8 ноября 2014 г.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF SMALL SOCIAL GROUPS FUNCTIONING TAKING INTO ACCOUNT A HUMAN FACTOR

I.B. Gerasimova, L.N. Muhamedrahimova

Ufa state aviation technical university
12, K. Marksa st., Ufa, 450103, Russia

The paper considers the problem of increasing the efficiency of small social groups (SSG) functioning. In order to solve this problem, a cognitive dynamic model of SSG which is based on linear relationships is constructed. The model takes into account the psychophysiological compatibility of the members. Psychophysiological compatibility is certain combinations of temperament types which generate interpersonal attraction. Next the rate and sustainability of the SSG activity process are evaluated by means of computer simulation. At the same time, each person in the group is considered as capable of self-organization with his/her own temperament.

Keywords: *small social group, personality structure, cognitive model, system, psychophysiological compatibility, temperament.*

*Ilmira B. Gerasimova (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Likia N. Muhamedrahimova, Postgraduate Student.*

УДК 004.032.322

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОЙ КОМПАНИИ

А.С. Рагузин, Н.Г. Губанов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассмотрена задача построения функциональной модели системы синхронизации времени информационных систем, основанной на протоколе NTP, оптимальной для решения задачи поддержания единого времени на энергообъектах региональной электросетевой компании. Введено понятие базовой модели системы синхронизации времени. Проведено математическое моделирование формирователя локальной шкалы времени на узле системы, средств сравнения шкал времени узлов базовой модели и их коррекции. Полученные результаты позволяют подбирать соответствующие средства в зависимости от предъявляемых требований по точности и стабильности работы.

Ключевые слова: *система синхронизации времени, модель шкалы времени, метод сравнения шкал времени, метод коррекции шкалы времени, метки времени.*

В статье [1] был рассмотрен вопрос организации типовой комплексной системы синхронизации времени (ССВ) различного рода информационных систем распределительной сетевой компании (РСК). Уточненная схема организации такой системы представлена на рис. 1.

Также в [1] было определено, что оптимально будет организовать ССВ с помощью протокола синхронизации времени NTP, используемого в пакетных сетях передачи данных. В данной статье рассмотрены вопросы моделирования такой ССВ.

Описание ССВ и выбор объектов моделирования

Определим ССВ как набор временных шкал (ВШ), распределенный на значительной территории, и средств, обеспечивающих синхронизацию их показаний и использующих стандартные протоколы обмена данными для сетей с коммутацией пакетов.

При этом ССВ может быть реализована разными методами, применяемыми для получения исходной ВШ, для передачи меток времени (МВ) (каналы передачи данных, протоколы), для сравнения и корректировки ВШ (фазовая либо частотная подстройка).

С целью наиболее рационального применения имеющихся в РСК технических ресурсов в качестве структурной основы, моделируемой ССВ, в [1] была взята структура сетей передачи данных РСК с включенными в нее информационными системами, организованная по технологии пакетной передачи данных Ethernet. В связи с этим структура ССВ в большинстве случаев определяется то-

Николай Геннадьевич Губанов (к.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами».

Алексей Сергеевич Рагузин, аспирант.

пологий, построенной в РСК, сети передачи данных, и в общем виде представляет собой схему дерева, а на различных участках – линейную цепь, либо схему «звезда».

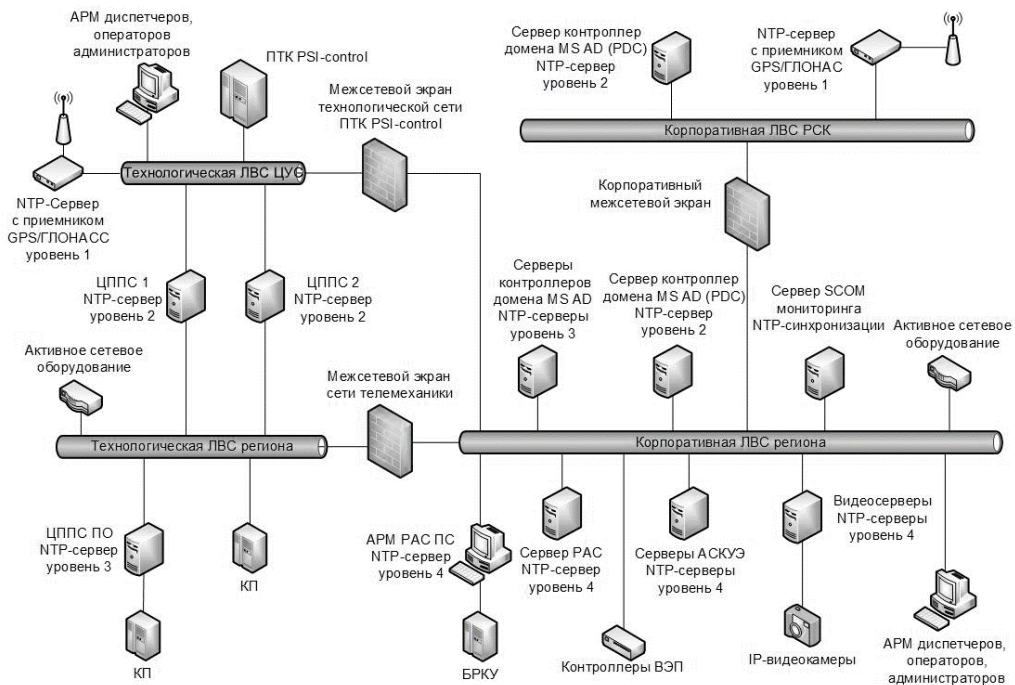


Рис. 1. Схема организации ССВ типовых устройств информационных систем РСК

В случае организации функционирования ССВ на каком-либо участке по схеме «звезда» появляется возможность производить синхронизацию всех локальных ВШ на узлах, расположенных в лучах «звезды», напрямую с эталонной ВШ на узле, расположенном в центре. Во втором случае, при функционировании ССВ по линейной схеме, каждый ее узел синхронизирует свою локальную ВШ с ВШ предыдущего узла. Таким образом, функциональная схема ССВ, описывающая процесс синхронизации от узла с эталонной ВШ до последнего узла, расположенного в одной из ветвей дерева, можно представить в виде линейной схемы, состоящей из N узлов, которые последовательно объединяются каналами передачи данных (рис. 2). При этом процесс синхронизации ВШ последнего узла с первым осуществляется через некоторое количество промежуточных узлов. Из-за появления в процессе синхронизации ошибки на каждом участке схемы и их суммирования по всем участкам точность синхронизации времени падает.

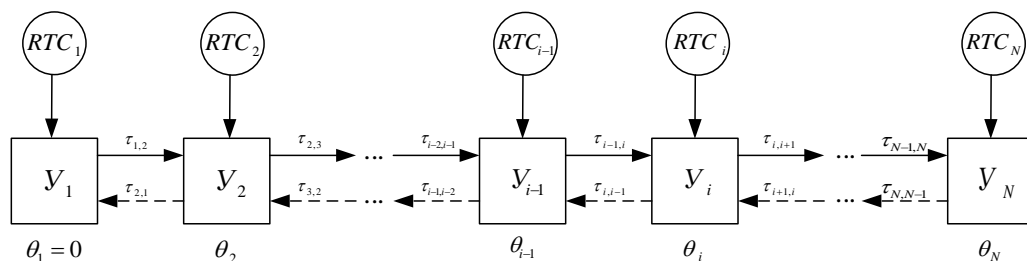


Рис. 2. Функциональная схема одной из ветвей ССВ

На рис. 2: Y_i – i -й узел моделируемой ССВ; RTC_i – аппаратные часы реального времени узла Y_i ; $\tau_{i-1,i}$, $\tau_{i,i-1}$ – задержки в канале передачи от узла Y_{i-1} к узлу Y_i и от узла Y_i к узлу Y_{i-1} соответственно; θ_i – ошибка времени ВШ узла Y_i относительно ВШ узла Y_1 , где $i = 1...N$. Y_1 – узел, ВШ которого считается эталонной; Y_{i-1} – ведущий узел, Y_i – ведомый узел ($i = 2...N$).

Задача установления единого времени для всех узлов системы сводится к некому набору последовательных задач синхронизации ВШ двух соседних узлов схемы, при этом ВШ узла Y_i сравнивается с ВШ узла Y_{i-1} , а затем корректируется на значение разницы, полученной при сравнения их шкал.

Из-за большого количества узлов, входящих в типовую ССВ, провести полное качественное описание и анализ функциональной схемы, приведенной на рис. 2, становится довольно сложной задачей. Для упрощения этой задачи введем понятие базовой модели, которая будет включает в себя два соседних узла. Для каждой базовой модели системы, объединяющей Y_{i-1} и Y_i ($i = 2...N$), определяется θ_i – ошибка ВШ узла i относительно ВШ узла $i-1$. Таким образом, ошибку любого узла ССВ относительно исходного, ВШ которого принята эталонной, можно определить как $\theta_i = \sum_{j=2}^i \theta_j$ для $i = 2, 3, \dots, N$.

На всех узлах моделируемой ССВ для получения первоначальной локальной ВШ используются аппаратные часы реального времени (англ. Real Time Clock, RTC). Следует разделить ВШ на аппаратные (кварцевые часы, используемые в аппаратном оборудовании) и системные (программные часы, используемые в операционных системах). После включения устройства в течение начальной загрузки операционная система синхронизирует системные часы, т. е. системную ВШ, с аппаратными часами, аппаратной ВШ. После этого те и другие ВШ определяют время независимо.

Узлы ССВ включены в общую сеть каналом передачи данных. Каждый узел включает программные средства синхронизации своей системной ВШ с системной ВШ другого узла. Синхронизация ВШ одного узла с ВШ другого узла достигается путем обмена МВ между этими узлами с помощью сетевых протоколов синхронизации. При этом один из узлов является ведущим, его ВШ считается точной, а другой – ведомым.

Исходя из вышесказанного определяются следующие объекты для моделирования ССВ:

- аппаратные часы;
- средства синхронизации ВШ;
- средства коррекции ВШ.

В качестве способа моделирования целесообразно выбрать математическое макро моделирование, которое, определяя основные параметры моделируемых объектов, позволяет получить их простое математическое описание, сохранив при этом принципы их функционирования [2].

Модель локальной временной шкалы

Как уже было сказано, в моделируемой ССВ ВШ на узле формируется от сигналов аппаратных часов реального времени. Большинство RTC использует кварцевый генератор с резонатором на частоте 32768 Гц, но некоторые используют частоту питающей сети.

Представим абсолютное время с помощью некоторого процесса, который может быть описан следующим колебанием:

$$s(t) = A \sin P(t),$$

где t – абсолютное время; A – амплитуда колебаний; $P(t)$ – фаза колебаний.

Для идеального колебания идеального генератора фаза описывается следующим выражением:

$$P(t) = 2\pi v_{const}t + \varphi_{0_{const}},$$

где $v_{const} = 1/T_{const}$ – постоянная частота колебаний; T_{const} – постоянный период колебаний; $\varphi_{0_{const}}$ – начальная фаза колебаний в t_0 .

Тогда абсолютное время может быть описано выражением

$$t = \frac{P(t) - \varphi_{0_{const}}}{2\pi v_{const}}.$$

Но на практике для реального генератора, применяемого в RTC, значения частоты v и фазы φ_0 зачастую отличаются от идеального генератора и изменяются с течением времени под воздействием различных факторов. Поэтому для локальной ВШ справедливо

$$T(t) = \frac{2\pi vt + \varphi_0 - \varphi_{0_{const}}}{2\pi v_{const}} = \frac{v}{v_{const}}t + \frac{\varphi_0 - \varphi_{0_{const}}}{2\pi v_{const}},$$

где первый член v/v_{const} описывает масштаб локальной ВШ, а второй – сдвиг начала отсчета локальной ВШ от t_0 .

Для приведения локальной ВШ к абсолютной требуется совместить начало отсчета этих шкал t_0 и уравнивать частоты колебаний, так как при увеличении v локальная ВШ будет ускоренной, а при уменьшении – замедленной.

Точность показаний ВШ характеризуется ошибкой времени, которая может быть представлена как [3]

$$\theta(t) = T(t) - t. \quad (1)$$

Для задач синхронизации времени вместо абсолютной применяют так называемую эталонную ВШ $T_{ref}(t)$, полученную от «надежного источника времени». Тогда (1) можно представить в виде [3]

$$\theta(t) = T(t) - T_{ref}(t).$$

Метод сравнения временных шкал узлов базовой модели

В моделируемой ССВ принят клиент-серверный режим работы протокола NTP. Для обмена синхронизационной информацией между клиентами и серверами используются специальные сообщения. Все значения времени представляются в двойном формате с битами, пронумерованными в обратном порядке. В качестве математического описания процесса сравнения ВШ двух узлов базовой модели ССВ ниже рассматривается процесс сравнения по широко используемому в телекоммуникациях *методу двунаправленной передачи*.

На рис. 3 представлена временная диаграмма, поясняющая процесс сравнения ВШ двух узлов базовой модели.

В момент t_1 ведомый узел B фиксирует показание своей ВШ T_1^b и отправляет его в виде МВ ведущему узлу A . Узел A принимает его и фиксирует этот момент по своей ВШ показателем времени T_2^a .

В момент t_3 узел A фиксирует показание своей ВШ T_3^a и отправляет его, а также T_2^a в виде МВ узлу B . Узел B принимает МВ T_2^a , T_3^a и фиксирует показание T_4^b своей ВШ.

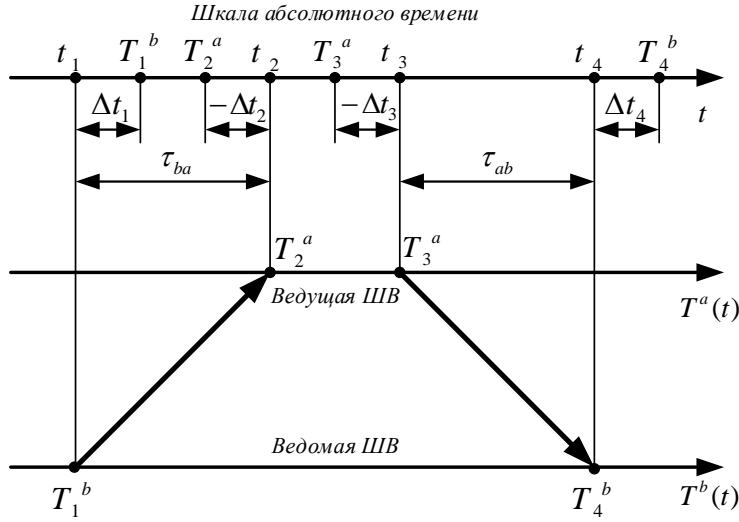


Рис. 3. Временная диаграмма сравнения ВШ двух узлов

По окончании цикла обмена сообщениями узел B имеет четыре МВ – T_1^b , T_2^a , T_3^a и T_4^b . Они позволяют вычислить ошибку ведомой ВШ относительно ведущей.

Согласно представленной на рис. 3 временной диаграмме получается система уравнений:

$$\tau_{ba} = (T_2^a - \Delta t_2^a) - (T_1^b - \Delta t_1^b), \tau_{ab} = (T_4^b - \Delta t_4^b) - (T_3^a - \Delta t_3^a), \quad (2)$$

где $\tau_{ab} = t_2 - t_1$, $\tau_{ba} = t_4 - t_3$ – задержки распространения МВ в канале передачи от узла B к узлу A и от узла A к узлу B соответственно; $\Delta t_1^b = T_1^b - t_1$, $\Delta t_2^a = T_2^a - t_2$, $\Delta t_3^a = T_3^a - t_3$, $\Delta t_4^b = T_4^b - t_4$ – ошибки показаний ВШ. При этом в случае эталонной ведущей ВШ принимается $\Delta t_2^a = \Delta t_3^a = 0$.

Имея в системе двух уравнений шесть неизвестных величин τ_{ab} , τ_{ba} , Δt_1^b , Δt_2^a , Δt_3^a , Δt_4^b , можно говорить о недостаточности априорных данных. Для устранения неизвестных можно ввести новые параметры и условия либо определить их некоторым другим способом.

Например, приняв величины $\Delta t_{12} = \Delta t_1^b - \Delta t_2^a$ и $\Delta t_{43} = \Delta t_4^b - \Delta t_3^a$, которые отражают разницу между ведущей и ведомой ВШ узлов A и B в начале и в конце цикла сравнения, можно из (2) получить систему уравнений с четырьмя неизвестными:

$$\tau_{ba} - \Delta t_{12} = T_2^a - T_1^b, \tau_{ab} + \Delta t_{43} = T_4^b - T_3^a. \quad (3)$$

Складывая первое уравнение со вторым и вычитая первое уравнение из второго, получим из (3) систему вида [5]

$$\begin{cases} \tau_{\Sigma} + \Delta\theta = (T_4^b - T_1^b) - (T_3^a - T_2^a), \\ \theta_{\Sigma} - \Delta\tau = (T_4^b + T_1^b) - (T_3^a + T_2^a), \end{cases} \quad (4)$$

где $\tau_{\Sigma} = \tau_{ab} + \tau_{ba}$; $\Delta\tau = \tau_{ba} - \tau_{ab}$; $\Delta\theta = \Delta t_{43} - \Delta t_{12}$; $\theta_{\Sigma} = \Delta t_{12} + \Delta t_{43}$.

Как предлагалось выше, для уменьшения числа неизвестных в уравнении введем ограничительные условия. Пусть:

- шкалы узлов A и B идентичны $\Delta\theta = 0$ или $\Delta t_{43} = \Delta t_{12} = \theta$, но при этом имеют неизменный временной сдвиг θ ;
- задержки в канале передачи данных равны $\Delta\tau = 0$, $\tau_{ab} = \tau_{ba} = \tau$.

Тогда из системы (4) можно легко определить время распространения МВ в канале τ и временной сдвиг θ [6, 7]:

$$\tau = 0,5[(T_4^b - T_1^b) - (T_3^a - T_2^a)], \theta = 0,5[(T_4^b + T_1^b) - (T_3^a + T_2^a)].$$

В другом случае, введя одно ограничительное условие, можно получить систему из трех уравнений. Пусть при условии $\Delta\theta = 0$ или $\Delta t_{43} = \Delta t_{12} = \theta$ система уравнений (4) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \tau_{\Sigma} = (T_4^b - T_1^b) - (T_3^a - T_2^a), \\ \theta_{\Sigma} - \Delta\tau = (T_4^b + T_1^b) - (T_3^a + T_2^a). \end{cases}$$

Тогда при известных задержках в канале $\Delta\tau$ можно определить временной сдвиг ВШ узлов базовой модели.

Методы коррекции шкалы времени

Как описано в [6], процедура коррекции времени протокола NTP использует две принципиально различные системы управления с обратной связью (СУОС). В СУОС с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ) периодически с интервалом μ секунд происходит обновление значения фазы, которое напрямую используется для минимизации ошибки времени, а косвенно – ошибки частоты. В СУОС с частотной автоподстройкой частоты (ЧАПЧ) периодически с интервалом μ секунд происходит обновление значения частоты, которое напрямую используется для минимизации ошибки частоты, а косвенно – ошибки времени.

В качестве математического описания процесса коррекции ВШ ниже описан довольно известный комбинированный метод подстройки [8], который основывается на одношаговой подстройке, но при этом управляет частотой. Определим, что значение погрешности между истинным и измеренным расхождением ВШ $\xi = \theta - \theta'$ после сравнения ВШ не выше заданного предела ошибки времени локальной ВШ $\pm\xi_M$.

Для начала рассмотрим *метод одношаговой подстройки*. Здесь значение времени ВШ изменяется скачкообразно на величину накопившейся ошибки за интервал времени μ (рис. 4). Так, согласно [8], из-за расхождения частот $\Delta\nu$ на n -м временном интервале ВШ накапливается ошибка $X_n(t)$, которая растет с течением времени согласно выражению

$$X_n(t) = \xi_{n-1} + \delta(t - t_{n-1}), t_{n-1} \leq t < t_n,$$

где $\delta = \frac{\Delta\nu}{\nu_{\text{под}}}$ – величина частотного сдвига корректируемой ВШ.

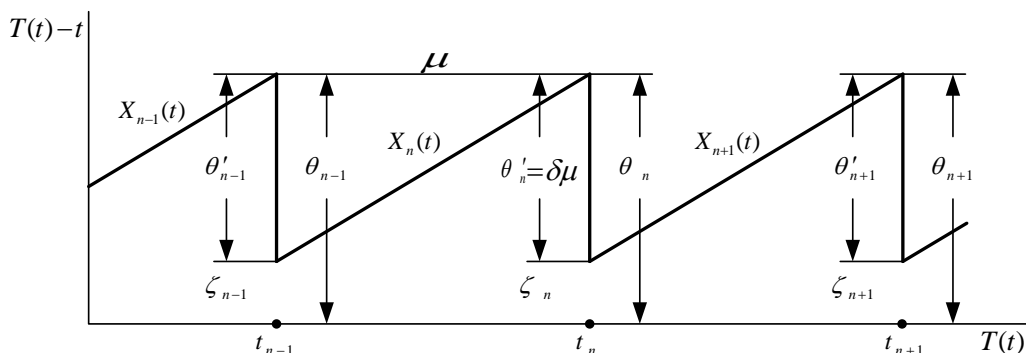


Рис. 4. Метод одношаговой подстройки временной шкалы

Тогда в момент времени очередной коррекции t_n ошибка времени будет определяться как

$$\theta_n = X_n(t_n) = \xi_{n-1} + \delta(t_n - t_{n-1}) = \xi_{n-1} + \delta\mu.$$

Т. е. за интервал времени $\mu = t_n - t_{n-1}$ значение ВШ изменяется на

$$\theta'_n = \theta_n - \xi_{n-1} = \delta\mu.$$

Таким образом, при проведении коррекции методом одношаговой подстройки значение ведомой ВШ изменяется скачкообразно на θ'_n .

Особенностью *комбинированного метода подстройки* является то, что после выполнения коррекции по методу одношаговой подстройки вычисляется отклонение частотного сдвига, которое приводит к появлению ошибки ВШ за интервал времени μ , от номинального значения:

$$\frac{\Delta v}{v_{\text{п о т}}} = \frac{\theta'_n}{\mu} = \frac{\delta\mu}{\mu} = \delta. \quad (5)$$

Опираясь на (5), вносим поправку Δv в частоту генератора RTC, который формирует ВШ ведомого узла (рис. 5).

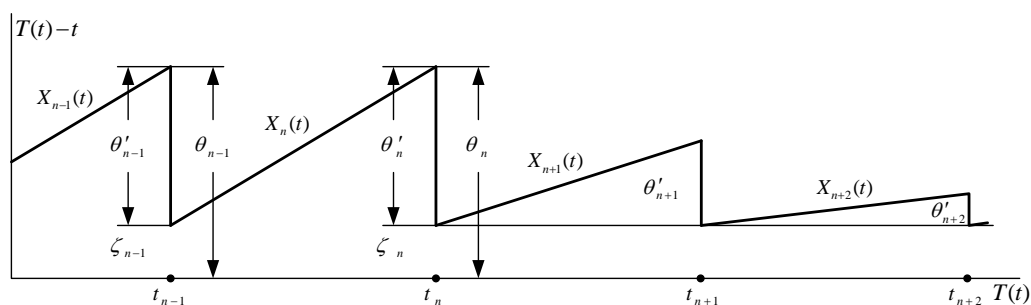


Рис. 5. Метод комбинированной подстройки временной шкалы

Таким образом, в случае метода комбинированной подстройки корректировка ВШ происходит периодически и предусматривает прибавление к значению текущей частоты корректирующего значения, т. е. фильтром с СУОС при каждом обновлении данных синхронизации обеспечивается экспоненциальное затухание значения $X_n(t)$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рагузин А.С., Шишков М.А., Носенко А.Ф. Синхронизация времени гетерогенных информационных систем технологических объектов региональной электросетевой компании // Электроэнергетика глазами молодежи: Науч. труды междунар. науч.-техн. конф.: сборник статей. – Самара: СамГТУ, 2011. – Т. 2. – С. 7-12.
2. Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
3. Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи / Пер. с англ. Н.Л. Бирюкова, С.Я. Несвитской, Н.Р. Триски; под ред. А.В. Рыжкова. – М.: Мир, 2003. – 456 с.
4. ГОСТ 8.567-99 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения времени и частоты. Термины и определения. – Введ. 01.01.2001.
5. Коновалов Г.В., Новожилков Е.О. Моделирование способов передачи сигналов времени при частотно-временном обеспечении телекоммуникаций // Молодые ученые – науке, технологиям и профессиональному образованию: Мат-лы междунар. науч.-техн. конф. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – Ч. 4. – С. 205-208.
6. Mills D.L. Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification. RFC 5905 // University of Delaware. – 2010. – June.
7. Савчук А.В., Шапошникова В.Н., Черняк И.П. Теоретические основы синхронизации текущего времени в телекоммуникациях // Зв'язок. – 2007. – № 3. – С. 5-9.

8. Новожилев Е.О. Моделирование передачи сигналов времени в цифровых сетях электросвязи // Современные проблемы частотно-временного обеспечения сетей электросвязи: Сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – М.: ФГУП ЦНИИС, 2010. – С. 191–199.

Статья поступила в редакцию 24 января 2015 г.

MODELING OF SYSTEM TIME SYNCHRONIZATION OF INFORMATION SYSTEMS OF ELECTRIC GRID COMPANY

A.S. Raguzin, N.G. Gubanov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The paper describes the construction of a functional model of an information-system time-synchronization system which is based on the NTP protocol. This system is optimal for time synchronization at the power utilities of a regional power network company. The notion of a basic model for a time-synchronization system is introduced. In the paper the mathematical modeling of the local time scale former at a system node, means of comparison for the time and their correction is carried out. The results obtained allow to choose the appropriate means which depend on the imposed requirements of accuracy and stability.

Keywords: *system time synchronization, model timeline, time comparison method, the method of correction of the time, the time stamp.*

*Aleksey S. Raguzin, Postgraduate Student.
Nikolay G. Gubanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

УДК 62-799

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ПОДШИПНИКА ГИДРОАГРЕГАТА

Ю.В. Демидов, В.Г. Щетинин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: schetinin_v@mail.ru

Рассматривается проблема контроля за состоянием системы охлаждения генераторного подшипника. Выделяются и описываются: назначение, конструкция, принцип работы генераторного подшипника гидроагрегата и его системы охлаждения. На основании изложенной проблемы была поставлена задача параметрической идентификации системы охлаждения генераторного подшипника гидроагрегата. В качестве объекта идентификации была рассмотрена система охлаждения с восемью маслоохладителями, радиально подключенными к напорному коллектору теплоносителя, теплоносителем которой является вода. Предложен и рассмотрен алгоритм идентификации. В заключении указано, что предложенный алгоритм является масштабируемым и может использоваться для идентификации систем охлаждения с иной структурой и назначением.

Ключевые слова: параметрическая идентификация, диагностика, генераторный подшипник гидроагрегата, система охлаждения генераторного подшипника, информационно-измерительная система, алгоритм идентификации.

Разработка информационно-измерительных систем (ИИС) для оперативной оценки состояния энергетического оборудования является одной из актуальных проблем при решении задачи повышения надежности его функционирования [1, 2, 3]. Подшипниковые узлы гидроагрегатов являются одними из наиболее ответственных, и для них эта проблема представляется одной из первоочередных.

Рассмотрим сегментный генераторный подшипник (ГПШ) гидроагрегата. ГПШ предназначен для восприятия горизонтальных нагрузок и представляет собой сегментный направляющий подшипник, работающий на самосмазке. Сегменты подшипника располагаются вокруг шейки вала и представляют собой кольцо. Шейка вала крепится на вал гидроагрегата и передает нагрузку на сегменты подшипника. Таким образом осуществляется горизонтальная стабилизация вала гидрогенератора. Для обеспечения смазки трущихся поверхностей сегменты погружаются в масло до половины своей высоты. В результате возникновения капиллярного эффекта масло поднимается и растекается по всей поверхности шейки вала и сегментов, обеспечивая смазку непогруженных частей подшипника.

Система охлаждения (СО) генераторного подшипника представляет собой систему охладителей, трубопроводов и задвижек и предназначена для охлаждения масла. Основным звеном СО являются маслоохладители, которые располагаются в масляной ванне подшипника, внутри циркуляционного контура масла

Юрий Владимирович Демидов, магистрант.

Владимир Георгиевич Щетинин (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

ГПШ. Смазавшее и охладившее рабочие поверхности горячее масло стекает в ванну, где охлаждается в результате циркуляции через решетки маслоохладителя. Неисправность в системе охлаждения приводит к снижению ее КПД и, как следствие, к перегреву генераторного подшипника. Состояние системы охлаждения во многом определяет надежность работы генераторного подшипника, особенно в период прохождения гидрогенератором пиковых нагрузок.

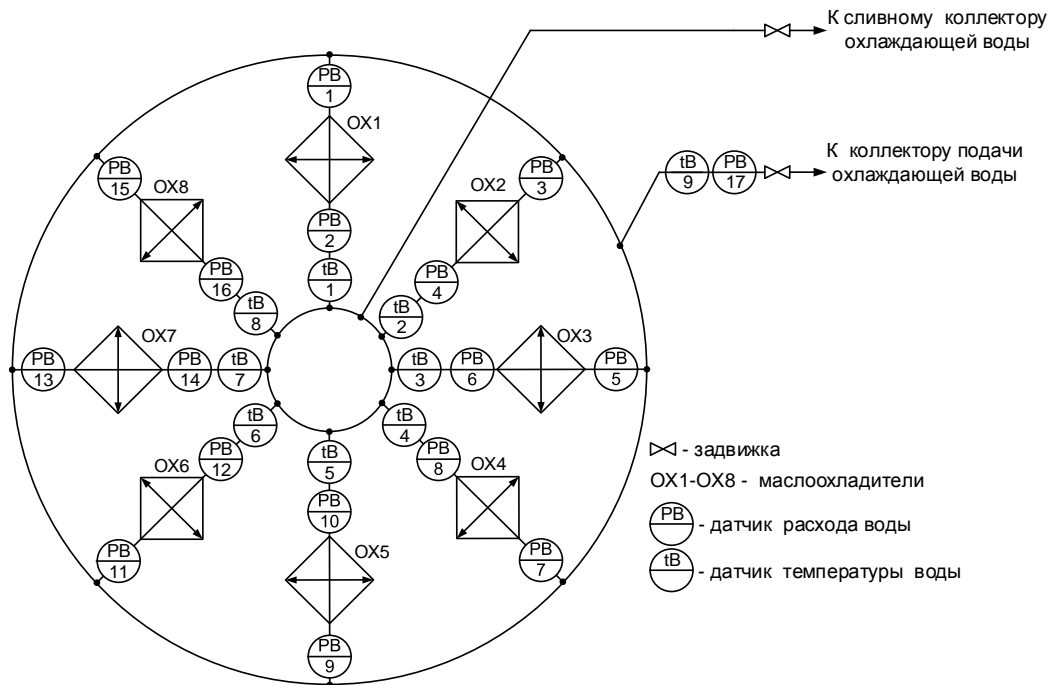


Рис. 1. Электрогидравлическая схема системы охлаждения турбинного подшипника

Для того чтобы осуществлять контроль над работой СО ГПШ, требуется вести мониторинг и анализировать десятки параметров, определяющих ее состояние. Персоналу, в чьем оперативном управлении находится большое количество оборудования, отследить отклонения в работе системы не представляется возможным. Таким образом, являются актуальными: задача параметрической идентификации системы охлаждения генераторного подшипника и создание человеко-машинного интерфейса ИИС, что позволит автоматизировать процесс мониторинга состояния системы.

Задачами параметрической идентификации системы охлаждения генераторного подшипника являются: оценка ее технического состояния, контроль режима работы, выявление дефектов узлов и определение их существенности. Температурные и гидромеханические параметры характеризуют состояние СО ГПШ, по их текущему значению определяется наличие дефекта или нежелательного режима работы.

Типовые дефекты в работе генераторного подшипника, доступные для идентификации, включают в себя: засорение трубопроводов, засорение маслоохладителей, повреждение трубопроводов, повреждение маслоохладителей.

Рассмотрим систему охлаждения с восемью маслоохладителями, радиально подключенными к напорному коллектору теплоносителя, теплоносителем кото-

рой является вода. Схема системы представлена на рис. 1. Данная система охлаждения состоит из 8 маслоохладителей, которые подключены параллельно друг другу. Каждый маслоохладитель радиально подключен как к напорному, так и к сливному коллектору. Теплоноситель поступает в напорное кольцо, затем проходит через маслоохладители и попадает в сливной кольцевой коллектор.

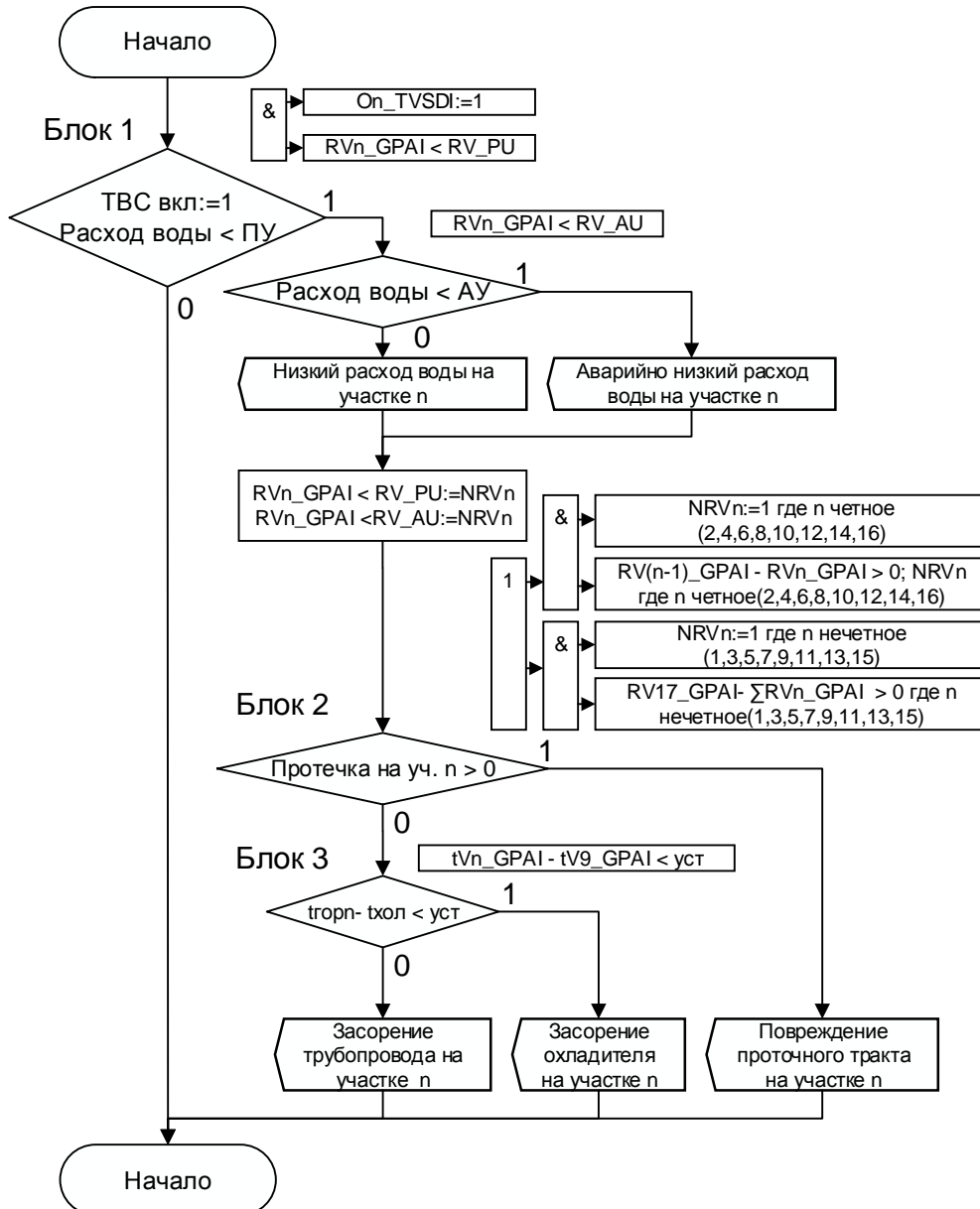


Рис. 2. Алгоритм идентификации СО ГПШ

Для того чтобы обеспечить систему диагностики информацией на входе и выходе проточного тракта маслоохладителя, а также на входе распределительного кольца коллектора подачи охлаждающей воды, установлены датчики расхода воды. Для осуществления постоянного температурного контроля системы охла-

ждения установлены датчики температуры на выходе из каждой параллельной ветви охладителя и перед кольцом сливного коллектора охлаждающей воды.

Предлагается следующий алгоритм диагностики СО (рис. 2), реализуемый далее ИИС.

Алгоритм диагностики системы охлаждения состоит из нескольких ступеней и включает в себя блоки:

Блок 1. Контроль расходов по нижней уставке, выдача сигнализации при преодолении нижнего предельного значения и рекомендаций по устранению.

Блок 2. Выявление участка протечки по разности показаний расходомеров, выдача сигнализации при выявлении потери расхода и рекомендаций по устранению.

Блок 3. Выявление засорения охладителя и трубопровода по разности показаний датчиков температур воды и расхода, выдача сигнализации при преодолении нижнего предельного значения и рекомендаций по устранению.

Рассмотрим выполнение алгоритма на примере плеча охлаждения с охладителем ОХ1.

Блок 1 выполняется при наличии сигнала о включении системы технического водоснабжения:

$$ON_TVSDI := 1,$$

где ON_TVSDI – символическое имя сигнала, характеризующего режим работы системы технического водоснабжения.

Текущие показания датчиков расхода воды $PB1$ и $PB2$ сравниваются со значением уставки предупредительной сигнализации:

$$RV_1_GPAI < RV_PU,$$

$$RV_2_GPAI < RV_PU,$$

где RV_PU – символическое имя уставки предупредительной сигнализации, RV_1_GPAI и RV_2_GPAI – текущие показания датчиков $PB1$ и $PB2$.

Если условие выполняется, то далее следует проверка наличия существенно-го снижения расхода путем сравнения с аварийной уставкой:

$$RV_1_GPAI < RV_AU,$$

$$RV_2_GPAI < RV_AU,$$

где RV_AU – символическое имя уставки аварийной сигнализации, RV_1_GPAI и RV_2_GPAI – текущие показания датчиков $PB1$ и $PB2$.

Значения уставок определяются заводом-изготовителем или на основании опыта эксплуатации СО генераторного подшипника.

При снижении расхода воды в системе охлаждения ниже предельного значения, соответствующего предупредительной или аварийной уставке, выдается сигнализация «Низкий расход воды на участке n » или «Аварийно низкий расход воды на участке n » соответственно. Если одно из вышеуказанных условий выполняется, то значению, выходящему за границы нормального режима работы, присваивается символическое имя NRV_n , где n – номер датчика, зафиксировавшего отклонение, и осуществляется переход к Блоку 2. Если снижение расхода не обнаружено, то алгоритм завершается.

В ходе выполнения блока 2 осуществляется поиск протечки по разности показаний расходомеров на одном участке. За участок принимаем проточную часть системы охлаждения, заключенную между двумя расходомерами.

Рассмотрим возникновение протечки на участке трубопровода, заключенном между расходомерами $PB1$ и $PB2$. При наличии признака снижения расхода

$NRV_n := 1$ на расходомере с четным номером, в данном случае PB2, выполняется расчет величины протечки:

$$\begin{aligned}RV_{n-1_GPAI} - RV_{n_GPAI} &> 0, \\RV_{2-1_GPAI} - RV_{2_GPAI} &> 0, \\RV_{1_GPAI} - RV_{2_GPAI} &> 0,\end{aligned}$$

где RV_{n_GPAI} – символическое имя ячеек данных, где хранятся текущие показания датчиков.

Если разность показаний датчиков PB1 и PB2 больше ноля, то на данном участке образовалась протечка. При обнаружении протечки формируется сообщение «Повреждение проточного тракта на участке n», где n – имя участка.

Снижение расхода на нечетном датчике является показателем либо протечки воды в напорном кольце, либо низкого расхода в коллекторе подачи воды. Ситуация с низким расходом воды в коллекторе подачи воды не рассматривается, т. к. в данном случае должны сработать гидромеханические защиты гидроагрегата и он был бы незамедлительно остановлен.

Рассмотрим снижение расхода на датчике PB1. При наличии признака снижения расхода $NRV_1 := 1$ выполняется поиск протечки путем сравнения разности показаний датчика PB17 с суммой показаний нечетных датчиков:

$$RV_{17_GPAI} - \sum_{n=0}^7 RV_{(2n+1)_GPAI} > 0,$$

где $\sum_{n=0}^7 RV_{(2n+1)_GPAI}$ – сумма показаний нечетных датчиков, RV_{17_GPAI} – показание датчика PB17.

Если вышеуказанная разность показаний датчиков больше ноля, то на данном участке образовалась протечка, система формирует сообщение «Повреждение проточного тракта на участке n», где n – имя участка. Аналогичный метод может использоваться для диагностики сливного кольца.

При наличии снижения расхода в нескольких точках данный блок зацикливается, пока не будут проверены все предполагаемые протечки. Если протечки не обнаружены, то осуществляется проверка наличия засоров в проточном тракте.

Блок 3 предназначен для выявления засоров в проточной части СО и является конечным блоком алгоритма. На этапе выявления засоров дефект определяется по разности показаний датчика температуры холодной воды и одного из датчиков температуры горячей воды.

Температурой холодной воды условно называют показания датчика температуры, установленного в проточной части напорного коллектора теплоносителя. Горячей водой, в свою очередь, называют отработанный теплоноситель, т. е. прошедший через систему трубок охладителя и охладивший его.

Рассмотрим снижение расхода на датчиках расхода плеча 1: PB1 и PB2. При снижении расхода на одном из данных датчиков, в данном случае на четном PB2, вычисляется разность между показаниями tB9 и tB1:

$$\begin{aligned}tV_{n_GPAI} - tV_{9_GPAI} &< \text{уст}, \\tV_{1_GPAI} - tV_{9_GPAI} &< \text{уст},\end{aligned}$$

где tV_{n_GPAI} – температура горячей воды плеча n, tV_{9_GPAI} – показания датчика tB9, tV_{1_GPAI} – показания датчика температуры плеча 1.

Если вышеуказанная разность показаний датчиков меньше уставки, то это

свидетельствует о плохом теплообмене в охладителе и, соответственно, его засорении. В результате обнаружения вышеуказанного дефекта система формирует сообщение «Засорение охладителя на участке п».

В том случае, когда разность температур находится в допустимых пределах или снижение расхода обнаруживается на нечетных расходомерах, засоренность охладителя исключена. Система выводит сообщение «Засорение трубопровода на участке п».

Представленный алгоритм является масштабируемым, он может использоваться для идентификации систем охлаждения с большим количеством охладителей. Определение дефектного участка может выполняться с большей точностью. Для этого следует реализовать большее количество точек контроля над состоянием системы. Алгоритм идентификации системы охлаждения генераторного подшипника гидроагрегата может быть адаптирован под СО с иной структурой и назначением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Абрамов А.И., Иванов-Смоленский А.В.* Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. – М.: Высшая школа, 2001. – 389 с., ил.
2. *Камышиникова А.Н.* Информационно-измерительная система контроля электрических параметров гидрогенератора: Автореф. дис. ... к. т. н.: специальность 05.11.16 Информационно-измерительные и управляющие системы по отраслям. – Самара, 2012. – 22 с.: ил.; 21 см.
3. *Левицкий А.С., Федоренко Г.М.* Повышение надежности, безопасности эксплуатации мощных гидрогенераторов путем использования волоконно-оптических информационно-измерительных систем // Гідроенергетика України. – 2011. – № 3-4. – С. 18-22. – Бібліогр.: 8 назв. – рос.

Статья поступила в редакцию 16 января 2015 г.

PARAMETRIC IDENTIFICATION OF COOLING SYSTEM OF HYDROELECTRIC GENERATING SET BEARING

Yu.V. Demidov, V.G. Shchetinin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

In the paper the control problem of states of cooling system of hydroelectric generating set bearing is considered. The followings are emphasized and described: purposes, design, operating principles of the bearing and its cooling system. By this purposes the problem of parametric identification of cooling system of hydroelectric generating set bearing is stated. As a sample the cooling system with 8 lubricating oil coolers, radially connected to discharge header of heat transfer with water as a liquid, is considered. The algorithm of identification of states is proposed and studied. As a corollary it is shown that the algorithm stated in the paper is usable for systems with another structure and purposes.

Keywords: *parametric identification, diagnostic, hydroelectric generating set bearing, cooling system of hydroelectric generating set bearing, identification algorithm.*

*Yury V. Demidov, Graduate Student.
Vladimir G. Shchetinin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

УДК 681.324

МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МИКРОПРОЦЕССОРОВ

Н.В. Ефимушкина

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Описан подход к разработке имитационных моделей современных типовых микропроцессоров. Модели позволяют оценить временные характеристики объектов. Для выявления влияния на эти характеристики важнейших факторов используется упрощенное представление структуры микропроцессоров. Они включают в себя один или несколько конвейеров. Программа, выполнение которой имитируется моделью, представлена в виде случайной последовательности команд. Среди этих команд могут быть связанные по данным или управлению, а также операции с памятью. Модели позволяют выявить наиболее эффективные структуры и режимы работы объектов, а также коллизии, снижающие их производительность. Они объединены в пакет, состоящий из четырех программ, разработанных под руководством автора.

Ключевые слова: микропроцессор, конвейер, конфликт, суперскалярный процессор, WLIV, EPIC.

Современные ЭВМ и системы на их основе характеризуются сложными структурами и режимами функционирования. Для изучения особенностей их работы используются методы теории вычислительных систем (ВС). Основными задачами указанной теории, как известно, являются анализ, идентификация и синтез. При этом применяются аналитические, имитационные и экспериментальные методы. Первые сводятся к построению математических моделей, которые устанавливают зависимость между параметрами и характеристиками объекта в явной аналитической форме. Такие модели имеют большие погрешности, но позволяют оценить характеристики системы для наиболее тяжелых случаев.

Имитационные методы основаны на описании функционирования системы в виде алгоритма. Соответствующая программа содержит процедуры, регистрирующие состояния модели и обрабатывающие полученные данные для оценки характеристик объекта и протекающих в нем процессов. Имитационные модели дают возможность экспериментатору и разработчику формировать представления о свойствах объекта и, познавая систему через ее модель, принимать обоснованные проектные решения.

Экспериментальные методы базируются на получении данных о функционировании ВС в реальных или специально созданных условиях. Высокая сложность вычислительных систем и их элементов, таких как центральные процессоры, существенная зависимость характеристик от класса решаемых системой задач ограничивают применение этих методов для оценки эффективности работы объектов.

Формулировка проблемы

Наиболее перспективными для исследования микропроцессоров представляются методы имитационного моделирования. Соответствующие модели воспроизводят процесс работы объекта исходя из априорно известных свойств его элементов, за счет объединения моделей элементов в соответствующую структуру. Важнейшее свойство имитационного моделирования – универсальность. Метод позволяет исследовать системы любой сложности, учитывать влияние различных факторов и воспроизводить типовые ситуации. В моделях могут отображаться наиболее важные элементы, что позволяет выявить основные закономерности функционирования объекта.

В работах [1, 2] используются соответствующие методы моделирования, которые ориентированы на исследование и проектирование вычислительных сетей с использованием теории массового обслуживания. В настоящее время из аналогов наиболее близким к рассматриваемым является только пакет программ моделирования компьютерных сетей OPNET MODELER [3]. Однако этот пакет непригоден для изучения структур процессоров. Описываемый в статье комплекс имитационных моделей ориентирован на изучение именно таких объектов.

При разработке моделей решался целый ряд проблем:

- выбор основных элементов исследуемых устройств, которые должны быть отображены в модели;
- определение уровня детализации параметров объекта;
- оценка адекватности модели.

При решении первой проблемы в качестве объектов исследования были выбраны:

- основные устройства центральных процессоров – конвейеры;
- типовые структуры микропроцессоров: суперскалярная и EPIC.

В моделях необходимо было отобразить основные элементы этих устройств, которые определяют особенности их функционирования. Например, в связи с тем, что в центральных процессорах для повышения производительности широко используется принцип конвейеризации, их модели содержат модели конвейеров. В процессорах EPIC часть проблем, характерных для суперскалярной архитектуры, устранена, поэтому их модели имеют более простую структуру.

Одной из важнейших проблем был выбор состава параметров, описывающих структуру и режим работы объектов. Они должны обеспечивать выявление основных особенностей функционирования устройств. При этом второстепенные факторы, усложняющие исследование, необходимо отбросить.

Описываемый подход привел к использованию упрощенных моделей устройств. При этом они включают в себя только те элементы, которые позволяют исследовать важнейшие особенности функционирования объектов и выявить основные закономерности их поведения.

Описание пакета программ для исследования микропроцессоров

Предложенный подход реализован в пакете программ имитационного моделирования для исследования современных микропроцессоров. Пакет позволяет исследовать особенности организации вычислительных процессов в центральных процессорах, а также влияние самых разнообразных факторов на производительность этих устройств. Он обеспечивает оценку временных характеристик. Пакет включает в себя средства для исследования следующих типовых элементов и микропроцессоров:

- одного конвейера с конфликтами и без;
- нескольких параллельных конвейеров разной длины с конфликтами и без;
- суперскалярных и EPIC-процессоров.

Исследование целесообразно начать с простейших устройств и моделей. Первая модель описывает работу типового пятиступенчатого конвейера, его основные свойства и режимы. Известно, что конвейерный принцип обработки широко применяется в современных процессорах [4]. Модель конвейера наглядно демонстрирует, что с ростом числа команд среднее время их выполнения стремится к длительности одной микрооперации, а при разной длительности последних – ко времени наиболее продолжительной из них. Экранная форма описываемой модели приведена на рис. 1, а график зависимости среднего времени выполнения команд от их числа – на рис. 2.

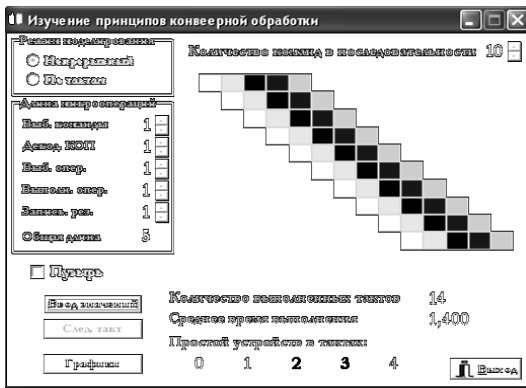


Рис. 1. Экранная форма модели конвейера

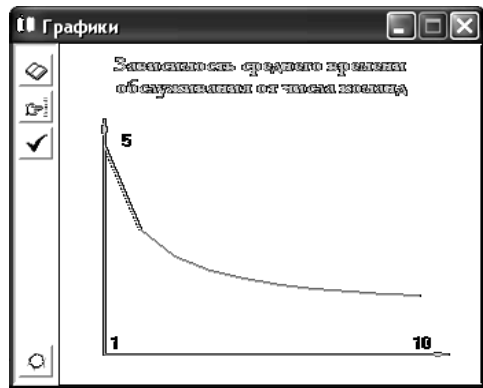


Рис. 2. График, полученный при моделировании

Известно, что максимальная производительность одного конвейера равна одной команде за такт. Ее увеличение может быть достигнуто только за счет параллельной работы нескольких таких устройств.

В следующей модели исследуется влияние увеличения числа конвейеров на производительность системы. В ней исполняемая программа представляется как смесь команд, свойства которых могут быть заданы исследователем.

Традиционная система команд процессора включает в себя длинные (много-тактные) и короткие (однотактовые) операции, которые реализуются соответствующими обрабатывающими устройствами. Моделируемая программа может содержать только короткие или короткие и длинные команды, которые выполняются соответствующими конвейерами.

При этом демонстрируется, что в идеальном случае n конвейеров за такт могут выполнить n команд. Пример экранной формы для исследования мультikonвейерной системы приведен на рис. 3. Общеизвестно, что эффективная работа конвейера может быть нарушена из-за конфликтов одного из трех типов:

- структурных, которые возникают из-за занятости отдельных ресурсов (когда аппаратные средства не могут поддерживать выполнение команд в режиме с совмещением);

- по данным, появляющихся, если очередная команда использует результат предыдущей;
- по управлению, которые возникают при наличии операций переходов, изменяющих значение счетчика команд [1-2].

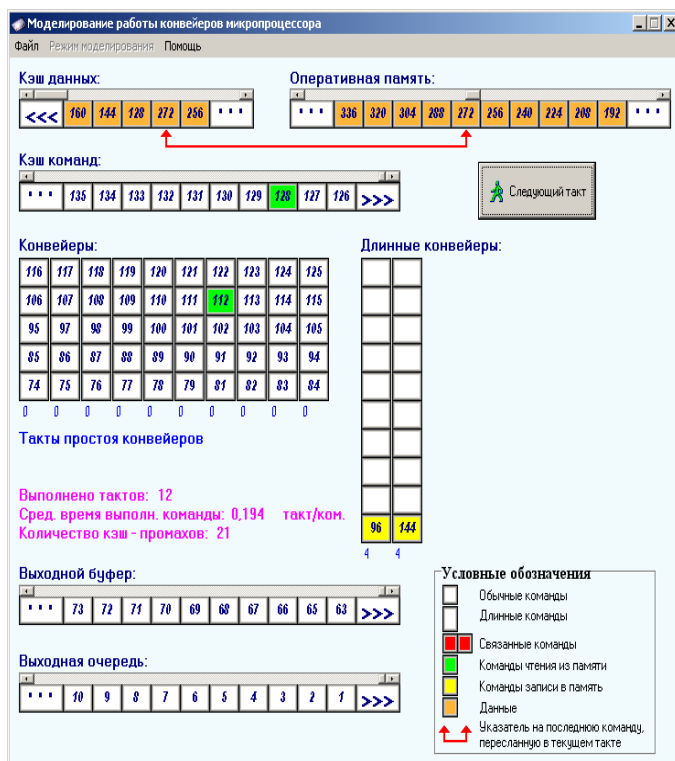


Рис. 3. Экранная форма модели мультиконвейера

Все конфликты приводят к приостановке выполнения команды, в которой они возникли (pipeline stall), а также всех следующих за ней до конца конвейера. Эта ситуация называется «конвейерным пузырьком» (pipeline bubble). Пузырь проходит по конвейеру, не выполняя никакой работы. Модели, входящие в описываемый комплекс, позволяют исследовать все перечисленные типы конфликтов, т. е. содержать команды, связанные по данным, памяти или управлению и оценить их влияние на производительность системы.

В настоящее время существуют три основных класса центральных процессоров:

- суперскалярные;
- с очень длинным командным словом (VLIW);
- с явным параллелизмом команд (EPIC) [4-7].

Все они содержат несколько параллельно работающих конвейеров. В первых конфликты разрешаются динамически, в процессе выполнения программы, а во вторых – компилятором, до начала ее работы. Последний класс сочетает в себе достоинства первых двух. Его компилятор формирует не исполняемый код, а некий план решения задачи, который может быть адаптирован к любой модели процессора. При этом конфликты по данным и структурные устраняются компи-

лятором, а коллизии, связанные с командами управления, ликвидируются при выполнении программы.

Таким образом, исполняемый код программы процессора EPIC должен содержать команды управления (if), которые могут привести к конфликтам, и любые другие операции, при которых коллизии не возникают. Меняя частоту появления условных переходов и вероятность их неправильного предсказания, можно оценить влияние соответствующих конфликтов на производительность процессора. Пример экранной формы для исследования процессора EPIC, на которой пустая клетка соответствует простою конвейера, приведен на рис. 4 [7].

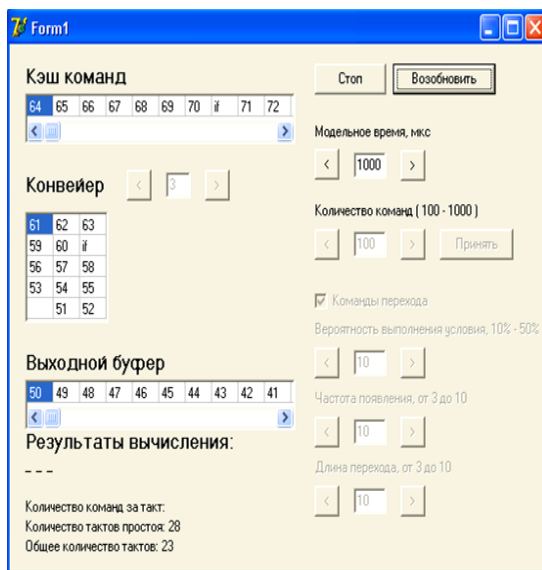


Рис. 4. Экранная форма модели процессора EPIC

Большинство современных процессоров, в том числе и многоядерные, являются суперскалярными. Они имеют сложную структуру и режим работы. В модели типового суперскалярного процессора отображены наиболее существенные элементы оригинала, которые позволяют воспроизвести важнейшие принципы его функционирования, такие как спекулятивное выполнение команд (с измененным порядком) и предсказание переходов. Она содержит следующие основные устройства:

- блок выборки команд;
- дешифратор;
- таблицу переименования регистров;
- станцию-резервуар, в которую помещаются готовые к исполнению микрооперации;
- функциональные блоки;
- буфер восстановления последовательности команд.

Пример экранной формы для исследования суперскалярного процессора представлен на рис. 5.

Имитационные модели разработаны под руководством автора статьи с использованием универсальной среды Borland Delphi. Их важной особенностью является широкое использование анимации, которая обеспечивает максимальную наглядность и оптимальный режим исследования.

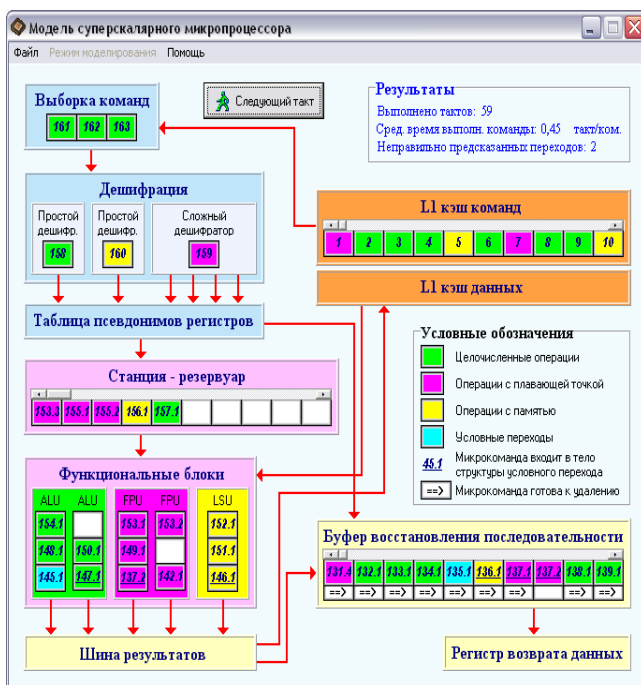


Рис. 5. Экранная форма модели суперскалярного процессора

Заключение

Описан пакет программ, который содержит четыре имитационные модели, позволяющие исследовать типовые микропроцессоры, имеющие суперскалярную и EPIC архитектуру, а также их основные элементы – конвейеры. Важнейшими характеристиками вычислительных систем являются временные, определяющие их производительность. Именно они и исследуются в моделях.

При разработке последних решался целый ряд проблем:

- выбор основных элементов исследуемых устройств, которые должны быть отображены в модели;
- определение уровня детализации параметров объекта;
- оценка адекватности модели.

В предлагаемых моделях отображены основные элементы устройств, которые определяют особенности их функционирования. При этом второстепенные блоки, не оказывающие влияния на процессы, протекающие в системе, в моделях не воспроизводятся.

Результаты моделирования совпадают с теоретическими выводами и экспериментальными данными, что подтверждает адекватность моделей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лукьянов В.С., Слесарев Г.В. Проектирование компьютерных сетей методами имитационного моделирования: Учеб. пособие. – Волгоград: ВолгГТУ, 2000. – 55 с.
2. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. Практикум: Учеб. пособие. – М.: Высш. школа, 2003. – 295 с.
3. Тарасов В.Н., Коннов А.Л., Ушаков Ю.А. Анализ и оптимизация локальных сетей и сетей связи с помощью программной системы OPNET MODELER // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2006. – Т. 2. – № 6. – С. 197–204.
4. Таненбаум Э. Архитектура компьютера / Пер. с англ. – Изд. 5-е. – СПб., 2010. – 848 с.

5. Столингс У. Структурная организация и архитектура компьютерных систем / Изд. 5-е. – М.: Вильямс, 2002. – 896 с.
6. Хамахер К., Вранешич З., Заки С. Организация ЭВМ / Пер. с англ. Сер. Классика computer science. – Изд. 5-е. – СПб: Питер, 2003. – 845 с.
7. Ефимушкина Н.В., Орлов С.П. Учебный комплекс имитационных моделей для лабораторных работ по дисциплине «ЭВМ и периферийные устройства» // Компьютерные инструменты в образовании. – 2013. – № 4. – С. 45–51.

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2014 г.

MODELS FOR RESEARCH OF MODERN MICROPROCESSORS

N.V. Efimushkina

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

An approach to the development of state-of-the-art microprocessor simulation models is discussed. The models allow to estimate time characteristics of objects. For the identification of the influence of the most important factors on these characteristics, a simplified representation of the microprocessor structure is used. The microprocessors include one or several pipelines. The program which is simulated by the model, is presented in the form of a stochastic sequence of instructions. Among these instructions can be data or control conflicts, and also memory operations. The models allow to reveal the most effective structures and operating modes of the objects, and also collisions reducing their output. They are united in the package consisting of four programs developed under the leadership of the author.

Keywords: microprocessor, pipeline, conflict, superscalar processor, WLIV, EPIC.

УДК 681.3

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИБЫЛЬНОСТИ РЕКЛАМНОЙ ИНТЕРНЕТ-СЕТИ

Д.А. Ёлкин¹, И.А. Минаков², С.И. Вольман¹

¹ООО НПК «Максифаер Девелопмент»

Россия, 443125, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 349, 3-й этаж

²Институт проблем управления сложными системами РАН

Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

E-mail: dmitry.yolkin@maxifier.com cscmp@iccs.ru

Описывается подход, позволяющий анализировать ход рекламных кампаний на наборе интернет-сайтов и оптимизировать совокупную прибыль от идущих кампаний. Предлагаемый метод базируется на теории линейного программирования и схож с методами, используемыми при решении транспортных задач, но включает в себя ряд дополнений, связанных со спецификой функционирования рекламных серверов. Дополнительная сложность вызвана динамикой изменения сети, когда цели рекламных кампаний, набор страниц и сайтов, число посетителей и пользователей, равно как и сам набор идущих кампаний, постоянно изменяются. Статья описывает метод решения подобных задач, на конкретных примерах показывает возможные преимущества подхода и дает рекомендации по его применению в реальных системах.

Ключевые слова: интернет-реклама, рекламная кампания, симплекс-метод, оптимизация рекламной сети, повышение прибыли.

Для монетизации контента интернет-сайтов владельцы управляют ходом рекламных кампаний, каждая из которых может быть показана на рекламных площадках (сайтах) [1]. Каждая рекламная кампания обладает набором параметров и характеристик (стоимость, расписание доставки), изменяя которые, можно управлять доставкой этих кампаний, тем самым изменяя величину дохода и прибыли, которые могут быть получены в данной интернет-сети. У каждого сайта также есть ряд параметров (размер баннеров, которые могут быть показаны на этом сайте, величина издержек, которую должны заплатить владельцу данного сайта в случае, если показы перепродаются третьим лицом, например медийным агентством, и т. д.).

Основной задачей владельца интернет-сети является максимизация прибыли за счет повышения суммарного дохода с показов/кликов/действий идущих рекламных кампаний. Данная статья описывает метод, повышающий доходность кампаний за счет совокупной оптимизации сети.

Постановка задачи и описание исходных данных

Предположим, что в рассматриваемой нами замкнутой сети существуют паблишеры P_i , каждому из которых принадлежат сайты S_{ij} :

Дмитрий Александрович Ёлкин, руководитель департамента оптимизации и управления.

Игорь Александрович Минаков (д.т.н.), старший научный сотрудник лаборатории анализа и моделирования сложных систем.

Семен Игоревич Вольман, технический директор.

- паблишер P_1 содержит сайты $S_{P11}, S_{P12}, S_{P13}$;
- паблишер P_2 содержит сайты $S_{P21}, S_{P22}, S_{P23}$;
- паблишер P_3 содержит сайты $S_{P31}, S_{P32}, S_{P33}$.

Каждый из этих паблишеров не принадлежит владельцу рассматриваемой нами интернет-сети, поэтому владелец вынужден платить паблишерам за все показы, сделанные на их сайтах. Для каждого паблишера характерна собственная модель взимания платы, информацию о которой можно найти в табл. 1.

Таблица 1

Модели взимания платы паблишерами с владельца интернет-сети

Паблишер	Сайт	Модель	Число доступных показов (m_{aj})
P_1	S_{P11}	Владелец интернет-сети платит 0,3 условной единицы (у. е.) за каждую тысячу показов данному паблишеру	5 000
	S_{P12}	Владелец интернет-сети платит 0,7 у. е. за каждую тысячу показов данному паблишеру	20 000
	S_{P13}	Владелец интернет-сети отдает паблишеру 60 % всех доходов, полученных на данном сайте	30 000
P_2	S_{P21}	0,4 у. е. за каждую тысячу показов	10 000
	S_{P22}	0,5 у. е. за каждую тысячу показов	20 000
	S_{P23}	60 % всех доходов	10 000
P_3	S_{P31}	50 % всех доходов	5 000
	S_{P32}	0,5 у. е. за каждую тысячу показов	5 000
	S_{P33}	60 % всех доходов	0

В рассматриваемой нами сети существует совокупность рекламных кампаний C_i , каждая из которых может идти только на определенных сайтах:

- кампания C_1 на $S_{P11}, S_{P12}, S_{P21}$;
- кампания C_2 на $S_{P12}, S_{P13}, S_{P21}, S_{P31}$;
- кампания C_3 на $S_{P11}, S_{P22}, S_{P32}$.

Таблица 2

Состояние кампаний на рассматриваемый j -й момент времени

Кампания	Стоимость за 1000 показов (T), у. е.	Запланированное кол-во показов по контракту	Число показов, набранное к j -му моменту времени (D_i)	Число показов, которое осталось набрать (R_i)	Число показов, которое должно быть набрано к j -му моменту времени согласно плану (L_i)
C_1	0,5	20000	5000	15000	3000
C_2	0,6	30000	10000	20000	10000
C_3	1	9000	8000	1000	9000

Предположим, что мы рассматриваем сеть не в 0-й момент времени, когда ни одна из кампаний еще не успела сделать ни единого показа, а в некоторый j -й момент времени, когда каждая из кампаний набрала определенное количество показов и обладает статистикой, достаточной для того, чтобы судить о поведении кампании в сети. Каждая из рассматриваемых нами кампаний оплачивается за 1000 показов (т. н. СРМ-кампания). Совокупность характеристик i -й кампании

к данному моменту j может быть найдена в табл. 2. Количество показов, которое каждая из кампаний набрала на соответствующем сайте, может быть найдено в табл. 3.

Таблица 3

Статистика распределения первоначальных показов кампаний по сайтам

Сайт (число доступных показов)	Кампания (остаток показов)		
	$C_1 - 1500$	$C_2 - 20000$	$C_3 - 1000$
$S_{P11} - 5000$	2000 0,2		4000 0,7
$S_{P12} - 20000$	1000 -0,2	5000 -0,1	
$S_{P13} - 30000$		3000 0,24	
$S_{P21} - 10000$	2000 0,1	1500 0,2	
$S_{P22} - 20000$			3000 0,5
$S_{P23} - 10000$			
$S_{P31} - 5000$		500 0,3	
$S_{P32} - 5000$			1000 0,5
$S_{P33} - 0$			

Введение понятия относительной прибыльности

Данная задача оптимизации очень схожа с транспортной задачей, которая может быть решена методами линейного программирования [2] (напр., симплекс-метод [3]). Основное отличие заключается в том, что в классической транспортной задаче в качестве веса c_{ij} указывались затраты на перевозку i -го груза в j -й пункт назначения. В случае оптимизации прибыли интернет-сети мы вводим понятие нормы прибыльности (или относительной прибыльности) i -кампании на j -м сайте (E_{ij}). Норма прибыльности E_{ij} – это относительная величина прибыли, получаемая владельцем интернет-сети с тысячи показов, которые будут набраны i -й кампанией на j -м сайте и которая вычисляется согласно формуле

$$E_{ij} = V_{ij} Q_{ij} \frac{1000}{m_{ij}}, \quad (1)$$

где V_{ij} – это доход, который получает i -я кампания на j -м сайте. Для случая

$$\text{СРМ кампаний } V_{ij} = T_i \frac{m_{ij}}{1000}$$

Q_{ij} – это расходы, которые владелец интернет-сети вынужден заплатить владельцу j -го сайта (публишеру) за число показов, набранных i -й кампанией на этом сайте. Данная величина зависит от модели, по которой владелец сети рассчитывается с публишером;

m_{ij} – это число показов, набранных i -й кампанией на j -м сайте.

Тогда задача максимизации прибыли интернет-сети сводится к максимизации целевой функции вида

$$F(x) = \sum_{i,j} \frac{x_{ij} E_{ij}}{1000} \rightarrow \max \quad (2)$$

при условиях, что

$$\sum_j x_{ij} \leq R_i \text{ – сумма показов } i\text{-й кампании не превосходит число показов, ко-}$$

торое осталось набрать кампании по контракту;

$$\sum_i x_{ij} \leq m_{aj} \text{ – сумма показов кампаний на } j\text{-м сайте не превосходит величини}$$

ны свободных показов на этом сайте.

Согласно (1) рассчитаем нормы прибыльности для каждой i -й кампании на j -м сайте. В табл. 3 рассчитанные данные даны курсивом.

При этом ожидаемое число показов можно прогнозировать, например, на основе метода, изложенного авторами в [4].

Построение оптимального плана сети

Существует множество способов построения опорного и оптимального плана для решения транспортной задачи. В данном случае рассмотрим самый простой из них, который является достаточно быстрым и позволяет решать задачи большой размерности, что наиболее актуально для задач оптимизации интернет-сети. Алгоритм следующий.

1. Ищем ячейку ij с максимальным значением нормы прибыльности E_{ij} .
2. Полагаем, что число показов x_{ij} выбирается как максимум из числа показов, которое осталось набрать i -й кампании (с учетом предыдущих итераций), и числа свободных показов j -го сайта (с учетом предыдущих итераций).
3. Из числа оставшихся показов i -й кампании R_i вычитаем число показов x_{ij} , полученное на 2-м шаге.
4. Из числа доступных показов j -го сайта m_{aj} вычитаем число показов x_{ij} , полученное на 2-м шаге.
5. Переходим к пункту 1 – ищем ячейку с максимальным значением нормы прибыльности, за исключением ячеек, найденных на предыдущих шагах. Повторяем поиск до тех пор, пока не распределится число показов для всех кампаний либо не закончится число свободных показов всех сайтов.

Рассмотрим алгоритм, описанный выше, на конкретном примере, согласно табл. 3.

1. Ищем ячейку ij с максимальным значением нормы прибыльности – $E_{3sp11} = 0,7$. Число показов $x_{3sp11} = \max\{1000, 5000\} = 1000$.
 - а) $R_{C_3} = 1000 - 1000 = 0$ – кампания C_3 набрала все свои показы.
 - б) $m_{sp11} = 5000 - 4000 = 4000$.
2. Ищем следующую ячейку ij с максимальным значением нормы при-

быльности – $E_{2Sp31} = 0,3$.

Число показов $x_{2Sp31} = \max\{20000, 5000\} = 5000$.

а) $R_{C_2} = 20000 - 5000 = 15000$

б) $m_{Sp11} = 5000 - 5000 = 0$ – сайт S_{P31} исчерпал все свободные показы.

3. Ищем следующую ячейку ij с максимальным значением нормы прибыльности – $E_{2Sp13} = 0,24$.

Число показов $x_{2Sp31} = \max\{15000, 30000\} = 15000$.

а) $R_{C_2} = 15000 - 15000 = 0$ – кампания C_2 набрала все свои показы.

б) $m_{Sp13} = 30000 - 15000 = 15000$.

4. Ищем следующую ячейку ij с максимальным значением нормы прибыльности – $E_{1Sp11} = 0,2$.

Число показов $x_{1Sp11} = \max\{4000, 15000\} = 4000$.

а) $R_{C_1} = 15000 - 4000 = 11000$.

б) $m_{Sp11} = 4000 - 4000 = 0$ – сайт S_{P11} исчерпал все свободные показы.

Таблица 4

Распределение числа показов, необходимое для построения оптимального плана

Сайт (число доступных показов)	Кампания (остаток показов)		
	$C_1 - 1500$	$C_2 - 20000$	$C_3 - 1000$
$S_{P11} - 5000$	4000 0,2		1000 0,7
$S_{P12} - 20000$	1000 -0,2	-0,1	
$S_{P13} - 30000$		15000 0,24	
$S_{P21} - 10000$	10000 0,1	0,2	
$S_{P22} - 20000$			0,5
$S_{P23} - 10000$			
$S_{P31} - 5000$		5000 0,3	
$S_{P32} - 5000$			0,5
$S_{P33} - 0$			

5. Ищем следующую ячейку ij с максимальным значением нормы прибыльности – $E_{1Sp21} = 0,1$

Число показов $x_{1Sp11} = \max\{11000, 10000\} = 10000$.

а) $R_{C_1} = 11000 - 10000 = 1000$.

б) $m_{Sp21} = 10000 - 10000 = 0$ – сайт S_{P21} исчерпал все свободные показы.

6. Ищем следующую ячейку ij с максимальным значением нормы прибыльности – $E_{1Sp12} = -0,2$.

Число показов $x_{1Sp11} = \max\{1000, 20000\} = 1000$.

а) $R_{C_1} = 1000 - 10000 = 0$ – кампания C_1 набрала все свои показы.

б) $m_{Sp12} = 200000 - 1000 = 19000$.

Таким образом, оптимальная прибыль для владельца интернет-сети – это величина целевой функции, рассчитываемая по (2), $F_0(x) = 7.4$

Детали распределения представлены в табл. 4

Определение прироста прибыли за счет построения оптимального плана

Зная оптимальное распределение показов, полученное в предыдущем пункте, сравним величину прибыли, которую сможет получить владелец интернет-сети при оптимальном распределении показов, с прибылью, которую получил бы этот же владелец при условии, что в сети ничего бы не изменилось и кампании продолжили бы набирать показы на сайтах пропорционально тому, что они уже набрали на этих сайтах ранее.

Предположим, что кампания C_i наберет оставшиеся свои показы на сайте S_j согласно формуле

$$m_{C_i S_j} = \min \left\{ m_{a S_j}, R_{C_i}, \frac{m_{C_i S_j}}{\sum_k m_{C_i S_j}} + R_{C_i-1} \frac{m_{C_i S_j}}{\sum_{k(k \neq j-1)} m_{C_i S_j}} \right\}, \quad (3)$$

где $m_{a S_j}$ – число свободных показов на сайте S_j с учетом предыдущих итераций распределения показов,

R_{C_i} – число показов, которое осталось набрать кампании C_i ;

R_{C_i-1} – число показов, которое не удалось распределить на предыдущих итерациях для кампании C_i ;

$m_{C_i S_j}$ – число показов, которое набрала кампания C_i на сайте S_j ;

$\sum_k m_{C_i S_j}$ – сумма показов, которую набрала кампания C_i на своих сайтах на момент распределения;

$\sum_{k(k \neq j-1)} m_{C_i S_j}$ – сумма показов, которую набрала кампания C_i на своих сайтах на момент распределения, за исключением сайтов, на которых не удалось полностью распределить показы C_i на предыдущих итерациях.

Согласно (3) и данным табл. 3 рассчитаем оставшееся число показов на каждом сайте S_j . Так как формула (3) зависит от числа доступных показов на каждом сайте S_j , то будем исходить из предположения, что абстрактный рекламный сервер в первую очередь будет доставлять более дорогие кампании. Тогда получим следующее распределение (табл. 5).

Итог перераспределения показов

Кампания	Сайт	Число оставшихся показов
$C_3 \quad T=1,0$	$S_{P11} \quad m_a S_{P11} = 5000$	$m_{C_3 S_{P11}} = 500$
	$S_{P22} \quad m_a S_{P22} = 20000$	$m_{C_3 S_{P22}} = 375$
	$S_{P32} \quad m_a S_{P32} = 5000$	$m_{C_3 S_{P32}} = 125$
$C_2 \quad T=0,6$	$S_{P12} \quad m_a S_{P12} = 20000$	$m_{C_2 S_{P12}} = 10000$
	$S_{P13} \quad m_a S_{P13} = 30000$	$m_{C_2 S_{P13}} = 6000$
	$S_{P21} \quad m_a S_{P21} = 10000$	$m_{C_2 S_{P21}} = 3000$
	$S_{P31} \quad m_a S_{P31} = 5000$	$m_{C_2 S_{P31}} = 1000$
$C_1 \quad T=0,5$	$S_{P11} \quad m_a S_{P11} = 4500$ (с учетом $m_{C_3 S_{P11}} = 500$)	$m_{C_1 S_{P11}} = 4500$
	$S_{P12} \quad m_a S_{P12} = 10000$ (с учетом $m_{C_2 S_{P12}} = 10000$)	$m_{C_1 S_{P12}} = 3500$
	$S_{P21} \quad m_a S_{P21} = 3000$ (с учетом $m_{C_2 S_{P21}} = 3000$)	$m_{C_1 S_{P21}} = 7000$

Таким образом, прибыль для владельца интернет-сети без отсутствия оптимизации и при условии, что кампании набирают показы на сайтах пропорционально тому, что они набирали ранее, определяется величиной целевой функции.

Прибыль, которую получит владелец интернет-сети в результате оптимального распределения, будет в $\sim 2,7$ раз выше $\left(\frac{F_o(x)}{F(x)} = \frac{7,4}{2,735} = 2,71 \right)$ по сравнению с прибылью, которую получил бы владелец, если бы не предпринимал попытки оптимизации.

Способы исполнения оптимального плана средствами рекламных серверов

После построения оптимального плана основной сложностью является приведение его в жизнь с помощью средств, которые предоставляет рекламный сервер, используемый владельцем интернет-сети. Другими словами, если для достижения оптимальности необходимо, чтобы кампания C_1 набрала 4000 показов на сайте S_{P11} , а кампания C_2 – 15000 показов на сайте S_{P13} , то с помощью средств рекламного сервера нам необходимо так настроить расписание каждой кампании, чтобы оптимальное количество показов было набрано данной кампанией строго на определенном сайте. Иногда это непросто реализовать на практике, так как не каждый рекламный сервер предоставляет возможность задания точного количества показов, которые могут быть набраны определенной кампанией на определенном сайте. Тогда существует несколько основных способов:

1) более общий подход – создание дополнительных кампаний от исходной родительской кампании C_i , так называемых sweet spot кампаний, каждая из которых будет идти строго на определенном сайте со строго определенной целью согласно оптимальному плану;

2) задание доли показов от общего числа оставшихся показов данной кампании C_i , определенной для каждого из сайтов. Так, например, рекламный сервер

Open Ad Stream (OAS) предоставляет функциональность Site Tiers, когда любые сайты кампании можно объединить в группы и указать долю показов, которую будет набирать каждая группа от общего числа всех показов кампании.

Выводы

Для того чтобы составить оптимальный план, максимизирующий прибыль, которую может получить владелец интернет-сети, необходимо:

- вычислить норму прибыльности для каждого сайта и кампании, запущенных в этой сети;
- посчитать количество доступных показов, которое может быть набрано на каждом сайте. Количество доступных показов может считаться как в общем для всех кампаний, идущих на каждом конкретном сайте, так и для каждой кампании по отдельности, учитывая ее специфику (приоритет, размер баннеров и специфику таргетинга).

Оптимальный план должен считаться для всех кампаний и сайтов, имеющих в сети. В противном случае план будет неоптимальным и тяжело приводимым в действительность. Для того чтобы реализовать оптимальный план в жизнь, нужно:

- в первую очередь (если рекламный сервер поддерживает механизм Site Tiers) использовать механизм Site Tiers, так как сложность сети в этом случае увеличиваться не будет за счет создания дополнительных кампаний;
- если механизм Site Tiers недоступен на уровне рекламного сервера, то реализовать оптимальный план за счет создания дополнительных кампаний, но при этом сложность сети будет увеличиваться.

В том случае, если мы имеем большую и сложную сеть, в которой необходимо изменить все кампании за раз, чтобы достигнуть оптимального расписания, необходимо начинать оптимизацию:

- с кампаний, которые вносят наибольший вклад в оптимальный план, так как в этом случае достигнутая прибыль будет наибольшей;
- либо с публических/сайтов, которые вносят наибольший вклад в оптимальный план.

Число кампаний и сайтов, которые могут изменяться первоначально, может варьироваться, при этом потенциальная прибыль возрастает в случае, если есть больше возможностей для изменения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Вольман С.И., Минаков И.А., Скобелев П.О., Якушин А.В.* Разработка системы поддержки принятия решений при оптимизации хода рекламных кампаний в сети Интернет / Сб. трудов IV Междунар. конф. по проблемам управления. 26-30 января 2009 г. – М.: Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2009. – 2030 с. – ISBN 978-5-91450-026-6. – С. 1628-1638.
2. *Томас Х. Кормен и др.* Глава 29. Линейное программирование // Алгоритмы: построение и анализ = Introduction to Algorithms. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – С. 1296. – ISBN 5-8459-0857-4.
3. *Хемди А. Таха.* Глава 3. Симплекс-метод // Введение в исследование операций = Operations Research: An Introduction. – 7-е изд. – М.: Вильямс, 2007. – С. 95-141. – ISBN 0-13-032374-8.
4. *Вольман С.И., Минаков И.А., Хайрутдинов А.Р., Якушин А.В.* Разработка системы прогнозирования объемов показов сайтов для оптимизации рекламных кампаний в сети Интернет // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – № 2 (26). – С. 221-225.

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2014 г.

YIELD OPTIMIZATION FOR THE AD NETWORKS

D.A. Elkin¹, I.A. Minakov², S.I. Volman¹

¹ OOO Maxifier Development
349, Novo-Sadovaya st., Samara, 443125, Russia

² Institution of the Russian Academy of Sciences Institute for the Control of Complex Systems of RAS
61, Sadovaya st., Samara, 443020, Russia

The paper discusses an approach to enable complex analysis of all advertising campaigns taking place on an ad network and a method to increase the total profit of these campaigns. The method is based on linear programming and simplex-method theories but also includes some specific features of an online advertising domain. The paper describes the algorithm for solving such problems and gives examples which show the expected benefits and advantages of the approach as well as provides recommendations for its real-life applications.

Keywords: *Online advertising, ad campaign, ad-servers, simplex-method, optimization of ad network, yield, revenue increase.*

*Dmitry A. Elkin, Director of optimization.
Igor A. Minakov (Dr. Sci. (Techn.)), Senior Scientist.
Simon I. Volman, Director of Technology.*

УДК 681.3.06

**ОРГАНИЗАЦИЯ АВТОНОМНОЙ ПОСРЕДНИЧЕСКОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ БОЛЬШИХ ДАННЫХ
В ИНТЕРНЕТЕ ВЕЩЕЙ****А.В. Иващенко¹, А.А. Минаев², О.В. Двойнина¹, С.Ю. Леднева²**¹ Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королёва
Россия, 443086, г. Самара, Московское ш., 34² Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: ledneva_svtl@mail.ru, anton.ivashenko@gmail.com

Предлагается концепция балансировки загрузки автономных устройств в распределенной системе сбора и обработки сверхбольших массивов информации (Big Data), построенной в соответствии с концепцией Интернета вещей. Рассматривается программное обеспечение для устройств сбора информации, которые реализуют не только свое непосредственное назначение, но и участвуют в передаче информации между сторонними устройствами. В качестве постановки задачи предлагается обеспечить формирование расписания событий измерения, которое необходимо поддерживать в актуальном состоянии и адаптивно корректировать в зависимости от текущей ситуации в режиме реального времени, с учетом сокращения количества измерений, характеризующего нагрузку на сеть. Для решения поставленной задачи предлагается программная архитектура распределенной сети сбора и обработки данных, реализующей автономную посредническую деятельность диагностических устройств. В качестве примера описывается программно-аппаратная реализация распределенной системы медицинской диагностики, базирующейся на сети автономных сенсорных устройств. Реализация предложенного решения в автономной системе оптического контроля внутривенной инфузии, а также результаты ее внедрения на практике подтверждают практическую полезность описанных в статье результатов.

Ключевые слова: Интернет вещей, посредническая деятельность, распределенная архитектура, мультиагентные технологии, медицинская диагностика

Современные системы сбора и обработки данных часто имеют распределенную архитектуру и строятся в виде сетей автономных устройств связи, способных взаимодействовать между собой в режиме реального времени. Такие сети могут изменять свою конфигурацию в ответ на события внешней среды, представлять открытые интерфейсы для подключения новых устройств и производить балансировку собственной загрузки в соответствии с возникающими потребностями.

Например, при решении задач медицинской диагностики в настоящее время широко применяются автономные диагностические устройства, способные к вза-

Антон Владимирович Иващенко (д.т.н.), профессор кафедры «Информационные системы и технологии».

Антон Андреевич Минаев, аспирант.

Оксана Владимировна Двойнина, аспирант.

Светлана Юрьевна Леднева, старший преподаватель кафедры «Вычислительная техника».

имоддействию в беспроводной сети связи. В отличие от медицинских мониторов, они не ограничивают свободу передвижения пациента и могут быть использованы в домашних условиях. В то же время существует проблема их комплексного применения для одновременного отслеживания параметров жизнедеятельности пациента в режиме реального времени и проведения персональной диагностики.

Взаимодействие автономных устройств разного типа в гетерогенной открытой информационной среде может быть описано с помощью последовательности событий подключения, обмена сообщениями, идентификации и т. п. В современной распределенной диагностической системе таких событий много (большой физический объем данных), они достаточно многообразны и требуют высокоскоростной обработки. В связи с этим задачу управления сбором и обработкой информации в системе сбора и обработки данных с распределенной архитектурой следует отнести к проблеме BIG DATA (больших данных).

В данной статье рассматривается организация автономной посреднической деятельности в распределенной сети устройств сбора и обработки данных. При построении программного обеспечения такой сети предлагается в соответствии с концепцией принципами мультиагентных технологий реализовать функциональность автономного посредника, которая включает возможности балансировки загрузки в соответствии с интенсивностью потока текущих задач устройства.

Современные подходы к организации распределенного взаимодействия в интегрированной информационной среде

Концепция Интернета вещей (Internet of things, IoT) достаточно широко обсуждается в современном научном сообществе [1, 2]. Появившись в виде идей широкого применения средств радиочастотной идентификации (RFID), в настоящее время она охватывает широкий спектр задач построения беспроводных сетей, организации межмашинного взаимодействия и реализации программно-конфигурируемых сетей. Например, данная концепция демонстрирует хорошие результаты на практике при решении задач интенсивной медицинской диагностики с использованием распределенной сети датчиков. Так, в работах [3, 4] описывается решение для беспроводной системы сбора диагностической информации, ее передачи на выделенный сервер и оповещения медицинского персонала. Для связи датчиков с координатором предлагается использовать протоколы беспроводной передачи данных ZigBee или Bluetooth. Координатор диагностической сети организует прием потоков диагностической информации и транслирует их в локальную вычислительную сеть посредством беспроводного протокола Wi-Fi. В локальной сети данные медицинской диагностики принимаются устройствами отображения данных в масштабе реального времени, устройствами тревожного оповещения, а также выделенным сервером.

Распределенная архитектура современной интегрированной информационной среды с учетом концепции Интернета вещей и требований интероперабельности часто представляется в виде сети или графа, узлами которого являются программные или аппаратно-программные компоненты, способные взаимодействовать между собой путем обмена информацией в виде сообщений и обладающие автономным поведением. Для моделирования такой архитектуры в современной научной литературе [5, 6] предлагаются P2P (peer-to-peer, равный с равным) модели взаимодействия. Среди ключевых свойств P2P-сетей отмечается децентрализация (т. е. отсутствие единственного контролирующего органа управления), заимствование ресурсов и автономность. P2P-сеть формируется и

изменяется динамически, она может перестраиваться, сохраняя при этом свои способности по передаче информации в режиме реального времени.

Технологии программирования, позволяющие реализовать управление передачей информации в P2P-сети, должны реализовывать принципы сетевцентрического управления. Этому требованию соответствуют мультиагентные технологии [7]. С одной стороны, эти технологии позволяют реализовать взаимодействие в открытой среде по аналогии с природными механизмами самоорганизации, но с другой стороны, требуют дополнительных усилий по обеспечению упомянутых выше требований надежности и высокой производительности.

Для решения этих вопросов предлагается дополнить мультиагентную архитектуру программного обеспечения пиринговой сети, реализовав функциональность посреднической деятельности по передаче информации. Вообще понятие посредника достаточно широко используется в теории мультиагентных систем. При этом обычно понимают специфический тип агента, предназначение которого состоит в координации гетерогенных интеллектуальных агентов [8], представлении объектов предметной области [9] и реализации протоколов и механизмов передачи сообщений между агентами с целью обеспечения их взаимодействия [10, 11]. В данной работе предлагается выделить функцию посредника и передать ее всем агентам, имеющим различное назначение и участвующим во взаимодействии.

Постановка задачи

В обобщенной архитектуре сети сбора и обработки информации устройства s_j , $j = 1..N_s$ объединяются в беспроводную сеть сбора данных по параметрам u_i , $i = 1..N_u$.

Операции измерения могут быть представлены булевыми переменными $e_{i,j,k} = e(u_i, s_j, v_{i,j,k}, t_{i,j,k}) \in \{0, 1\}$, где $v_{i,j,k}$ – значение параметра u_i , определенное s_j в момент времени $t_{i,j,k}$.

Для идентификации определенной ситуации необходимо достаточное количество событий измерения, которое обозначим шаблоном (паттерном)

$$\Theta_{i,n} = \{\varepsilon_{i,j,k} = 1, k \in \Omega_{i,n}\} \quad (1)$$

где $\varepsilon_{i,j,k} = \varepsilon(u_i, s_j, v'_{i,j,k}, t'_{i,j,k}) \in \{0, 1\}$ представляет собой реальное событие изменения значения параметра и поступает в систему в качестве входных данных.

В идеальном случае адаптивная сеть передачи данных должна удовлетворять требованию

$$\sum_{i=1}^{N_u} \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{k=1}^{N_{\varepsilon}} \varepsilon(u_i, s_j, v'_{i,j,k}, t'_{i,j,k}) \cdot \min_l (e(u_i, s_j, v_{i,j,l}, t_{i,j,l}) \cdot t_{i,j,l} - t'_{i,j,k}) \rightarrow \min. \quad (2)$$

С учетом того, что в реальности последовательность событий представляет собой неэквидистантный временной ряд, этот показатель может быть определен как

$$\sum_{i=1}^{N_u} \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{k=1}^{N_{\varepsilon}} \sum_{l=1}^{N_{\varepsilon}} \varepsilon_{i,j,k} \cdot e_{i,j,l} \cdot \theta(t_{i,j,l} - t'_{i,j,k}) \cdot \theta(t'_{i,j,k} - t_{i,j,l-1}) \cdot (t_{i,j,l} - t'_{i,j,k}) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $\theta(x)$ – степ-функция Хэвисайда: $\theta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}$,

$\forall \varepsilon_{i,j,k}, \exists e_{i,j,l} : t_{i,j,l} > t'_{i,j,k}, \forall e_{i,j,l}, l > 1 : t_{i,j,l} > t_{i,j,l-1}$ (события упорядочены в порядке появления).

Выражения (2) и (3) описывают требования к временным интервалам измерений. Устройства сбора информации должны производить измерения в такие моменты времени, чтобы наилучшим образом идентифицировать текущую ситуацию. Таким образом, можно сформулировать задачу планирования: в системе должно быть сформировано расписание событий $e_{i,j,k}$, которое необходимо поддерживать в актуальном состоянии и адаптивно корректировать в зависимости от текущей ситуации в режиме реального времени.

Кроме этого, необходимо учитывать еще один показатель: общее количество измерений, которое характеризует нагрузку на сеть:

$$\sum_{i=1}^{N_u} \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{l=1}^{N_e} e(u_i, s_j, v_{i,j,l}, t_{i,j,l}) \rightarrow \min. \quad (4)$$

Выражения (1) и (3) находятся в некотором противоречии: система должна обеспечивать минимальную нагрузку на сеть сбора и передачи информации и в то же время обеспечивать достаточный объем входных данных для принятия решений.

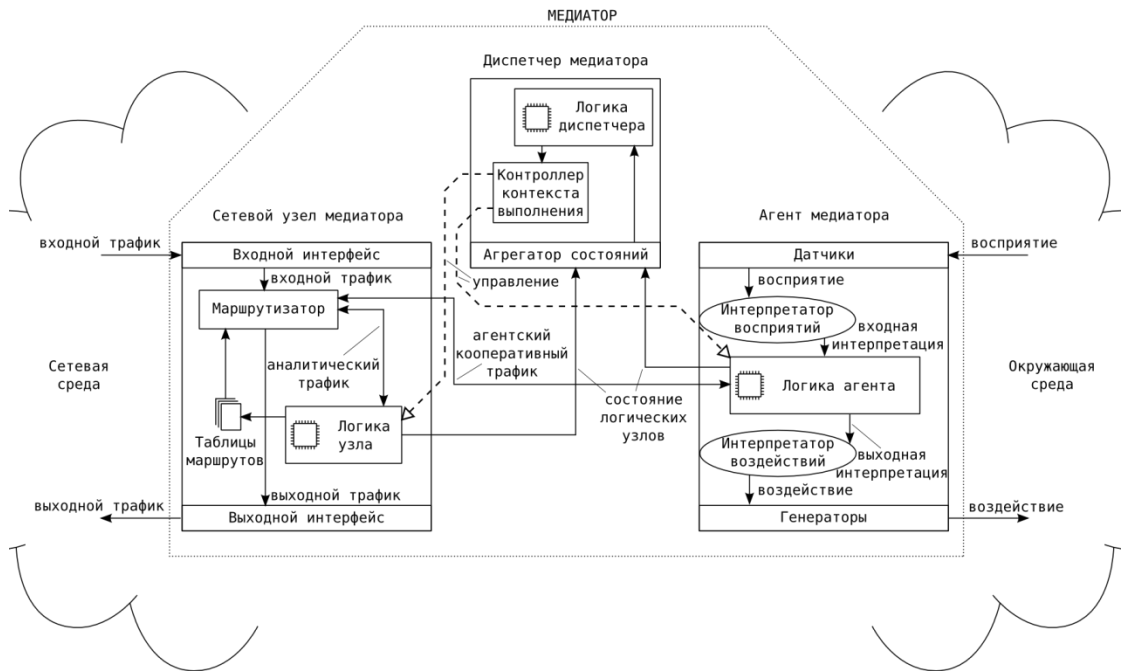
Архитектура решения

Для решения поставленной задачи предлагается построить программную архитектуру распределенной сети сбора и обработки данных, реализующую автономную посредническую деятельность диагностических устройств. В рамках такого подхода предлагается повысить автономность каждого датчика за счет реализации специализированного программного обеспечения, функциональность которого включает предобработку информации на стороне датчика и реализацию P2P-взаимодействия между датчиками в процессе передачи данных. В ходе такого взаимодействия устройства сбора информации не только реализуют свое непосредственное назначение, но и участвуют в передаче информации между сторонними устройствами.

Одно из основных отличий предлагаемой архитектуры заключается в реализации предварительной обработки данных посредством вычислительных возможностей интеллектуальных датчиков. Также предлагается использовать интерфейс «Медиатор» для информационного взаимодействия между датчиками, необходимый для реализации комплексной обработки информации в рамках измерительной подсистемы (см. рисунок).

Предлагаемая архитектура позволяет наделить систему сбора и обработки данных функционалом, который определяет возможность начального диагностического анализа на уровне данной системы в реальном масштабе времени. Данные преимущества улучшают качество и своевременность диагностики. Каждый датчик работает под контролем системы управления модулем датчика. Модуль датчика представляет собой законченное устройство, имеющее беспроводной интерфейс, преобразователь физической величины в оцифрованные данные и систему управления. Для минимизации количества первичных данных, которые

необходимо обработать, система управления модулем датчика управляет частотой дискретизации производимых измерений. Частота дискретизации измеряемых параметров является важным фактором, влияющим на эффективность работы не только отдельного модуля датчика, но и всей системы в целом.



Архитектура автономного посредника

Преимущества предлагаемого решения включают адаптивность за счет перераспределения соединений узлов сети связи в зависимости от текущей нагрузки, интероперабельность, так как сеть связи конфигурируется и развивается по принципам самоорганизации и новые узлы могут самостоятельно входить в сеть, и устойчивость к сбоям: при выходе элемента сети остальные узлы выстраивают новые связи.

Реализация решения в медицине

Описанное решение было использовано при реализации устройств контроля процессов внутривенной инфузии, обеспечивающих распознавание момента завершения процедуры и передачу сообщения на мобильное устройство медицинской сестры. Автономная система оптического контроля внутривенной инфузии представляет собой систему для улучшения эффективности работы медицинского персонала, своевременного оповещения об изменениях уровня жидкости в капельнице и улучшения качества сервиса в медицинских учреждениях.

Построение распределенной системы сбора и обработки данных в медицинской палате позволяет обеспечить индивидуальную конфигурацию группы устройств диагностики (датчиков) для конкретного пациента. Эти датчики, оборудованные средствами беспроводной связи с координатором, способны функционировать в автономном режиме, без ограничения мобильности пациента. Данные, собираемые с этих устройств в режиме реального времени, частично

обрабатываются на стороне самих автономных устройств, а при возникновении рисков передаются для централизованной обработки. В случае необходимости комплексного анализа устройства могут взаимодействовать, обмениваясь сообщениями и согласовывая частоту и точность проведения измерений. Преимущества предлагаемого подхода включают гибкость, адаптивность к внешним событиям, возможность функционирования в режиме реального времени и поддержки принятия решений по диагностике пациентов, а также возможность обработки сверхбольших массивов данных.

Заключение

Предложенное решение по организации автономной посреднической деятельности в распределенной сети сбора и обработки данных позволяет реализовать балансировку загрузки автономных диагностических устройств в условиях работы с большими данными (Big Data). Успешная реализация предложенного решения в автономной системе оптического контроля внутривенной инфузии, а также результаты ее внедрения на практике подтверждают практическую полезность описанных в статье результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сарьян В.К., Сущенко Н.А., Дубнов И.А. и др.* Прошлое, настоящее и будущее стандартизации Интернета вещей // Труды НИИР. – 2014. – № 1. – С. 2–7.
2. *Jara A.J., Bocchi Y., Genoud D.* Determining human dynamics through the Internet of Things // Proceedings of the 2013 IEEE/WIC/ACM International Conferences on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technology (IAT), Atlanta, Georgia, USA. – 2013. – P. 109–113.
3. *Sahandi R., Noroozi S., Roushanbakhti G. et al.* Wireless technology in the evolution of patient monitoring on general hospital wards // Journal of Medical Engineering and Technology, 34 (1). – 2010. – P. 51–63.
4. *Liu Y., Sahandi R.* ZigBee network for remote patient monitoring // IEEE 22nd International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies, Sarajevo, Bosnia & Herzegovina. – 2009. – P. 1–7.
5. *Schoder D., Fischbach K.* Peer-to-peer prospects // Communications of the ACM, 2003. – Vol. 46, no. 2. – P. 27–29.
6. *Орлов С.П., Леднев А.М., Иващенко А.В.* Применение модели P2P аутсорсинга в задачах управления проектами на предприятии нефтегазовой отрасли // Вестник Волжского университета им. Татищева. – 2013. – № 2 (21). – 2013. – С. 35–42.
7. *Городецкий В.И.* Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2012. – № 2. – С. 92–120.
8. *Maturana F.P., Norrie D.H.* A generic mediator for multi-agent coordination in a distributed manufacturing system // Systems, Man and Cybernetics, IEEE International Conference. – 1995. – Vol. 1. – P. 952–957.
9. *Lin H.* Architectural design of multi-agent systems: technologies and techniques // ed. Hong Lin, Idea Group Inc (IGI) Global. – 2007. – 421 pp.
10. *Pinninck A.P., Sierra C., Schorlemmer W.M.* A multiagent network for peer norm enforcement // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2010, № 21(3). – P. 397–424.
11. Decentralized mediator in an Open Multi-Agent System. Rapport de stage. 2006. Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, URL: <http://www.les.inf.puc-rio.br/wiki/images/e/e8/FinalRapport.pdf>
12. *Ivaschenko A., Minaev A.* Multi-agent solution for adaptive data analysis in sensor networks at the intelligent hospital ward // Lecture Notes in Computer Science LNCS 8610, Proceedings of the 10th International Conference on Active Media Technology AMT 2014, Warsaw, Poland, August 11–14, 2014, Springer International Publishing Switzerland. – 2014. – P. 453–463.

Статья поступила в редакцию 15 января 2015 г.

AUTONOMOUS INTERMEDIARY PROCESSING OF BIG DATA FOR INTERNET OF THINGS

A.V. Ivaschenko¹, A.A. Minaev², O.V. Dvoynina¹, S.Yu. Ledneva²

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

² S.P. Korolyov Samara State Aerospace University
34, Moskovskoye sh., Samara, 443086, Russia

In this paper there is proposed a concept for autonomous diagnostics devices balancing in a distributed system for Big Data processing, developed according to the principles of Internet of Things. Specialized software for data collection devices is considered that implements both direct appropriation and data transmission between the external devices. In the capacity of problem definition there is proposed to provide measurement events' scheduling (the schedule should be actualized and adaptively updated according to the current situation changes in real time) with optimization of measurements' number that characterizes the network load. To solve this problem there is proposed software architecture of data collection and processing distributed network that implements autonomous intermediary functioning of diagnostic devices. As an example there is described a hardware and software complex for a distributed system of medical diagnostics based of a network of autonomous sensors. Successful implementation of this solution in autonomous system for optical control over the intravenous infusion, as well as the results of its practical use confirms the benefit of described results.

Keywords: *Internet of things, intermediary agency, distributed architecture, multi-agent technologies, medical diagnostics.*

*Anton V. Ivaschenko (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Anton A. Minaev, Postgraduate Student.
Olga V. Dvoynina, Postgraduate Student.
Svetlana Yu. Ledneva, Senior Lecture.*

УДК 629.78.086

МЕТОД АДАПТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СЕАНСОВ СВЯЗИ ЦУП С ГРУППИРОВКОЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО КРИТЕРИЯМ НАДЕЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧНОСТИ СВЯЗИ*

*Д.А. Калашиников¹, В.А. Соловьев¹, П.О. Скобелев⁵, Е.В. Симонова²,
И.В. Майоров³, О.И. Лахин⁴, Д.И. Тихонов⁵, В.Н. Ворожейкин⁵*

¹ ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва»

Россия, 141070, Московская область, Мытищинский район, г. Королёв, ул. Ленина, 4а

² Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королёва

Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

³ Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук

Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

⁴ Научно-производственная компания «Разумные решения»

Россия, 443013, г. Самара, Московское ш., 17 (ТОЦ «Вертикаль»), оф. 1201

⁵ Самарский государственный технический университет

Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: esib@samgtu.ru

Предложен метод адаптивного планирования сеансов связи центра управления полетами (ЦУП) с группировкой космических аппаратов (КА) по критериям надежности и экономичности связи. Данный метод, в отличие от экспертного подхода, позволяет при использовании мультиагентных технологий строить гибкое самоорганизующееся расписание группировки КА по приему/передаче данных. Метод позволяет разрешать ситуационные конфликты и осуществлять поиск компромиссов между участниками с учетом гибко изменяемых весов критериев. Разработана математическая модель, позволяющая реализовать метод сопряженных взаимодействий для сети отдельных командно-измерительных комплексов (ОКИК), предложена общая схема построения расписания сеансов связи сети технических средств ОКИК с группировкой КА. Предложена архитектура и определены основ-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Дмитрий Алексеевич Калашиников, начальник отдела анализа работы и обеспечения эксплуатации бортовых радиотехнических систем и технических средств наземного комплекса управления космических аппаратов и средств выведения ОАО «РКК «Энергия».

Владимир Алексеевич Соловьев (д.т.н., проф.), член-корреспондент Российской академии наук, первый заместитель генерального конструктора.

Петр Олегович Скобелев (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Электронные системы и информационная безопасность».

Елена Витальевна Симонова (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Информационные системы и технологии».

Игорь Владимирович Майоров, ведущий специалист научно-исследовательского отдела научно-исследовательской группы лаборатории интеллектуальных технологий.

Олег Иванович Лахин, руководитель направления.

Денис Игоревич Тихонов, аспирант.

Владимир Николаевич Ворожейкин (к.т.н., доц.), заместитель заведующего кафедрой «Электронные системы и информационная безопасность».

ные компоненты прототипа мультиагентной системы для реализации и экспериментального исследования разработанного метода.

Ключевые слова: *космический аппарат (КА), отдельный командно-измерительный комплекс (ОКИК), оптимизация, надежность моделирования, экономичность, сеансы связи, группировка КА, ЦУП, мультиагентные технологии.*

Планирование сеансов связи ЦУП с группировкой КА неразрывно связано с задачей управления группировкой КА. Решение задачи управления как одного КА, так и группировки КА нашли отражение в работах [1-8]. Однако эти работы носят общий характер и рассматривают отдельные моменты, связанные с управлением группировки КА. В работах [9, 10] освещены методы планирования сеансов связи наземного комплекса управления (НКУ) с группировкой КА исходя из ситуационного анализа задействования наземных ОКИК, применения экспертных методов бесконфликтного управления КА в условиях ресурсных ограничений.

В основе вышеуказанных методов лежит один и тот же подход, а именно:

- разработка в Главной оперативной группе управления (ГОГУ) КА детального плана полета (ДПП) каждым КА на сутки полета, включающего его сеансы связи с ОКИК, задания на работу спецаппаратуры, параметры работы двигателя для корректировки орбиты КА и др.;

- создание на основе разработанных ДПП планов задействования средств НКУ (ПЗС), включающих привлекаемые технические средства на ОКИК, режимы их работы, зоны радиовидимости, виды передаваемой информации и представляющие собой циклограммы работы с каждым КА;

- наложение полученных циклограмм выполнения рабочих программ каждым КА друг на друга и определение узких мест при планировании сеансов связи с группировкой КА;

- решение вопроса устранения узких мест, т. е. разрешения конфликтов, экспертным путем, с привлечением специалистов.

В результате такого подхода формируются расписания сеансов связи, закладываемые на борт каждого КА из группировки.

Однако нарушение выполнения детального плана полета хотя бы одного КА по различным причинам может потребовать коррекции программ полета всех КА из группировки, что повлечет за собой изменение планов задействования средств НКУ, приведет к потере оперативности и повышению стоимости выполнения задач, решаемых группировкой КА.

Для решения задачи построения расписаний сеансов связи и передачи данных и обеспечения контролируемой надежности и экономичности сеансов связи в постановке, изложенной в работе [11], предлагается мультиагентный подход, на основе которого строится модель сети агентов потребностей и возможностей (ПВ-сети) мира [12] передачи данных между группировкой КА и сетью наземных станций, расположенных на ОКИК, а также развивается метод сопряженных взаимодействий.

В данном методе расписание самоорганизуется агентами ПВ-сети в ходе их взаимодействий, агенты заключают «контракты» на обслуживание на виртуальном рынке примерно так же, как это делают диспетчеры в ходе переговоров. Аналогичным образом агенты оценивают ситуацию и договариваются о размещении заказов по ресурсам в расписании, делая взаимные уступки при возникновении конфликтов, а не следуют одному жесткому централизованному алгоритму, что делает расписание гибким для последующей перестройки при воз-

никновении непредвиденных событий.

Все агенты характеризуются своими функциями удовлетворенности, имеющими вид суммы по компонентам, каждая из которых описывает зависимость изменения уровня (степени) удовлетворенности агента при отклонении заданного критерия от предполагаемого идеального значения.

Кроме того, для каждого агента предлагается функция бонусов и штрафов, показывающая премию агента за относительное улучшение или достижение конечного идеального результата или, напротив, штраф за отклонение, выраженные в виртуальных деньгах, отражающих затраты на планирование (могут быть конвертированы в реальные деньги).

Различные версии метода сопряженных взаимодействий позволяют либо сразу строить «наилучшее» по противоречивым критериям расписание, либо начинать с «грубого» (но быстро получаемого) расписания, а потом «вытягивать» и улучшать его отдельные важные показатели.

Детализация и окончательный выбор рекомендуемых параметров возможно варианта метода будут выполнены по результатам моделирования и исследования качества и эффективности процессов решения различных рассматриваемых задач на реальных данных.

Мир агентов обеспечения надежности и экономичности сеансов связи ЦУП с группировкой КА

Агент задачи (агент потребностей) содержит описания задач (затопление КА, коррекция орбиты КА, информационная поддержка научных программ и т. д.) и требования на проведение передачи данных, включая требуемый или желаемый момент времени начала и длительность, объем передачи данных и т. д.

Агент задачи считывает описание технологического процесса выполнения задачи из базы знаний системы и создает агентов заказа на отдельные операции, а в дальнейшем координирует их взаимодействие.

В конечном счете агенты заказов на операции находят ОКИК с соответствующими техническими средствами, наиболее надежным и экономичным образом решающие поставленную задачу.

Агенты задач привносят с собой виртуальные деньги, которыми оплачиваются услуги ОКИК.

Агент задачи характеризуется оцениваемым объемом данных V_c , минимальной надежностью передачи данных R_c , предельным количеством сеансов N_c , предельным временем полного выполнения заказа d , стоимостью всего заказа C , приоритетом (срочностью) w .

Функция удовлетворенности в зависимости от отклонений перечисленных выше параметров от требуемых имеет вид

$$u_{task}(V, R, N, d) = w * (\alpha_1 f_v(v - V_c) + \alpha_2 f_r(r - R_c) + \alpha_3 f_n(n - N_c) + \alpha_4 f_t(t - d)),$$

где $f_v(v - V_c)$ – компонент функции удовлетворенности по объему данных;

$f_r(r - R_c)$ – компонент функции удовлетворенности по надежности передачи данных;

$f_n(n - N_c)$ – компонент функции удовлетворенности по количеству сеансов;

$f_i(t-d)$ – компонент функции удовлетворенности по времени выполнения заказа.

Весовые коэффициенты параметров α_i могут быть динамически изменены в процессе моделирования, они нормируются в сумме на 1:

$$\sum_i \alpha_i = 1.$$

Параметры V , N минимизируются.

Надежность передачи данных R максимизируется, но разные ОКИК дают разные значения.

Бонусно-штрафные функции имеют аналогичный вид, где могут уходить в отрицательную область (штрафы), а максимальное значение бонуса задается вручную или нормируется на максимальную стоимость услуги, в частном случае на первоначальную стоимость C всей решаемой задачи; чем ближе к идеалу – тем выше бонус, тем больше средств может быть использовано на удовлетворение уступок от других агентов.

Штраф-бонусные функции более отдельно не оговариваются, но далее будут вычисляться или аналогично функциям удовлетворенности, или по специальным законам, индивидуально задаваемым как потребностям, так и возможностям, или настраиваться вручную.

Значения бонусов и штрафов у каждого агента используются при подсчете выгоды и потерь, а также возможных компенсаций во взаиморасчетах агентов при поиске консенсуса.

Агент ОКИК (агент возможностей) соответствует имеющимся в системе типам наземных станций.

Характеризуется собственным расписанием работы, каждый интервал которого соответствует сеансу приема информации от одного агента КА.

Агент ОКИК имеет тип агента ресурса (агента возможности) и имеет ограничения:

- циклограмма взаимной видимости между группировкой КА и ОКИК;
- скорость передачи информации данного типа по выбранному каналу связи.

Агент стремится получить как можно больше прибыли p_m за продажу своих ресурсов и одновременно поддерживать достаточный уровень загруженности L_m , поэтому компоненты функции удовлетворенности имеют вид

$$u_{ОКИК} = \alpha_1 f_p(p - p_m) + \alpha_2 f_p(1 - L_m),$$

где $f_p(p - p_m)$ – компонент функции удовлетворенности по прибыли;

$f_p(1 - L_m)$ – компонент функции удовлетворенности по загруженности.

Наземные станции характеризуются наличием различной специальной аппаратуры ($C1$, $C2$, ... и др.) для сброса данных (голосовых, телеметрии и т. д.) на землю и другими параметрами.

Каждый блок аппаратуры будет иметь свое расписание передачи данных, представленное в виде списка интервалов времени, в котором размещены непесекающиеся периоды включения аппаратуры.

Услуги ОКИК по передаче данных имеют тарифы, учитывающие тип используемой аппаратуры.

Тарифы в общем случае зависят от типа аппаратуры i , от времени t (на разных витках может быть различная стоимость по тарифной сетке), от длительно-

сти сеанса T и постоянной стоимости включения аппаратуры C_{0i} :

$$C_i = CV_i(t) * T + C_{0i}(t),$$

где $CV_i(t)$ – стоимость единицы времени работы i -го типа аппаратуры. В простом случае CV_i и C_{0i} могут быть константами.

Стоимость по тарифу и реальная стоимость передачи данных могут различаться, поскольку тарифы назначаются по средней статистике, а на деле все зависит от ситуации. Например, передача минимального кванта информации, когда нет других заказов, никак не окупит работу ОКИК, что приводит к возможности для любого ресурса в подобной системе динамически устанавливать тарифы (т. е. с учетом нагрузки).

С другой стороны, в условиях жестких тарифов заказы могут работать по принципу «разделяемых расходов» (shared costs), когда заказы полностью берут на себя оплату за ресурс, т. е. делят между собой расходы. Это означает, что приход новой задачи на ресурс может уменьшать стоимость для ранее пришедших ресурсов, вызывая постоянные пересчеты в системе.

Эти возможности будут специальным образом исследованы в работе для выбора наиболее подходящей модели микроэкономики.

При отсутствии запланированных сеансов прибыль ОКИК от реализации тарифов равна нулю. Если же планирование происходило и агентам заказов хватало денег на оплату, то суммарная прибыль от продажи услуг будет определяться суммированием по всем типам аппаратуры i и всем запланированным задачам j :

$$P_{KA} = \sum_i \sum_j (CV_i(t) \cdot T_{ij} + C_{0i}(t)).$$

В первой версии системы предлагается в ходе планирования выполнять расчет себестоимости передачи по модели SharedCosts; например, если ОКИК рассмотрел только один сеанс передачи на задачу, вся стоимость ОКИК ложится на этот заказ, который, возможно, получится очень дорогим, по цене выше тарифа, т. е. убыточным для постановщика задачи.

Учет тарифов, выбор модели динамических или статических цен, а также методики расчета реальной себестоимости, учитывающей особенности ситуации, будет иметь большое значение для принятия решений.

Удовлетворенность агента КА может быть выражена через удовлетворенности агентов ресурсов передачи $u_{r,i}$:

$$U_{KA} = \sum_i u_{r,i}.$$

Агент ОКИК стремится максимально продать свои услуги и быть полностью использованным по всем типам размещенной на нем аппаратуры.

Агент заказа сеанса передачи (агент потребности). Как уже было отмечено выше, агент задачи на проведение передачи должен порождать агентов заказов на операции передачи данных, которые обеспечат передачу требуемых данных для поставленной задачи (голос, телеметрия и т. д.).

В простейшем случае требуется осуществить один сеанс передачи информации определенного типа, для чего может потребоваться привлечение одного или нескольких технических средств ОКИК, которые данный агент должен забронировать в соответствующий интервал работы. Агенты заказа сеанса передачи

стремятся найти лучшую, наиболее быструю и самую дешевую возможность провести сброс данных.

Функция удовлетворенности (и соответствующие штраф-бонусные функции) описывается через конкретные значения параметров передачи: предельное время выполнения d , предельный объем V_C , минимальная надежность передачи R_C :

$$u_c = (V, R, d, p) = \alpha_1 f_v(v - V_C) + \alpha_2 f_r(r - R_C) + \alpha_3 f_t(t - d) + \alpha_4 f_p(p - p_m),$$

где компоненты имеют тот же смысл, что и у агента задачи, но 4-й параметр явным образом описывает удовлетворенность через прибыль p (в смысле разницы стоимости заказа и оплаты ресурсов), $p_m = C/N$, C – стоимость всего заказа, N – число сеансов. Пример функции удовлетворенности прибылью приведен на рис. 1.

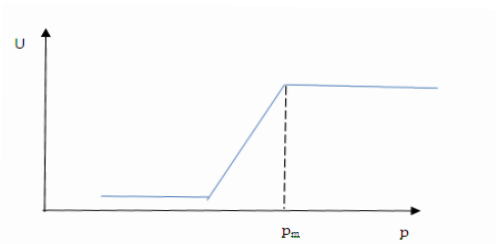


Рис. 1. Функция удовлетворенности прибылью

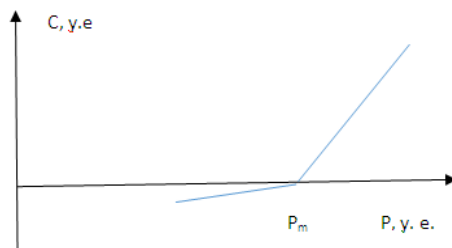


Рис. 2. Бонус-штрафная функция по прибыли

Соответствующая бонус-штрафная функция может иметь линейный вид, позволяющий агенту стремиться к максимизации прибыли (рис. 2).

Бонус начинает предоставляться с момента, когда прибыль становится больше некоторого заранее заданного порога P_m .

Агент ресурса аппаратуры ОКИК для передачи (агент возможности) должен выделить агенту потребности в передаче некоторый нужный ему интервал на требуемой аппаратуре.

Агент возможности передачи в начальный момент будет представлять весь доступный интервал для передачи на данной аппаратуре данного ОКИК, но далее будет постепенно выделять из него порции (кванты) времени по запросам на процесс.

Этого агента можно интерпретировать как агента аппаратуры, который следит за своим использованием, что в дальнейшем может потребовать динамического изменения цены на услуги ОКИК с учетом его востребованности на рынке космических услуг.

Агент ресурса передачи получает окна видимости от агента ОКИК.

Агент ресурса связи динамически оптимизирует надежность передачи и стоимость единицы затрат времени, увеличивая и уменьшая их значения в зависимости от уровня загрузки.

Параметр удовлетворенности уровнем загрузки имеет вид

$$u_{ress}(d, L_m) = \alpha_1 f_d(t - d) + \alpha_2 f_l(1 - L_m),$$

где L_m – уровень загрузки агента передачи, принятый за минимальный (например 0,5).

Вид функции удовлетворенности ресурса в зависимости от загрузки приведен на рис. 3.

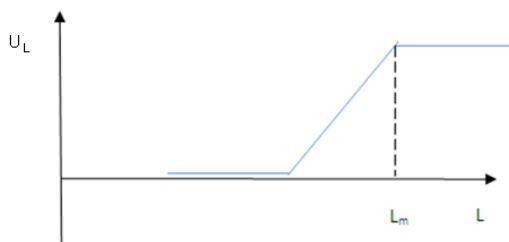


Рис. 3. Зависимость удовлетворенности ресурса от загрузки

Агент ресурса аппаратуры ОКИК для передачи стремится быть максимально использованным.

Штабной агент ищет «узкие места» в получаемом расписании работы системы агентов заказов на передачу, агентов ресурсов и агентов ОКИК и способствует их разрешению, обеспечивая обратную связь между всеми агентами системы и оценивая функцию удовлетворенности всей системы при разрешении конфликтов.

Развитие метода сопряженных взаимодействий для сети ОКИК

Гармонизация целей агентов ПВ-сети. Построение расписаний сеансов связи между группировкой КА и сетью ОКИК в рамках подхода, изложенного выше, предлагается выполнять путем самоорганизации агентов ПВ-сети, выявление и разрешение конфликтов между которыми обеспечит «гармонизацию» индивидуальных «эгоистических» целей отдельных агентов путем проведения переговоров между ними и взаимных уступок.

Такая гармонизация достигается за счет использования критерия удовлетворенности, показывающего отклонение текущего состояния от идеала по некоторым заданным для каждого агента критериям, причем как для отдельных агентов, так и для системы в целом.

Отметим, что удовлетворенность системы в целом может представляться суммой удовлетворенностей отдельных агентов системы или обеспечиваться с учетом специального агента системы, формирующего итоговую оценку удовлетворенности.

Таким образом, система работает в направлении максимизации удовлетворенности всего множества агентов, при этом общая удовлетворенность системы складывается как сумма удовлетворенности всех агентов ПВ-сети, т. е. суммирование производится по всем агентам возможностей (res) и потребностей (dem).

Задание целей отдельных агентов. Каждый агент потребности j имеет несколько индивидуальных критериев x_i и предполагаемых идеальных значений x_{ij}^{id} . У каждого агента потребности j подсчитывается нормированная функция удовлетворенности по компоненте i , задаваемая, например, в виде кусочно-линейной функции $f_{ij}^{dem}(x_i - x_{ij}^{id})$. В большинстве случаев эта функция имеет колоколообразную форму с максимумом в точке предполагаемого идеального значения. В качестве суммарной ценности результата для каждого агента потребности оценивается сумма удовлетворенностей по каждому критерию i с заданными ве-

совыми коэффициентами α_{ij}^{task} .

Надлежащим выбором знаков и вида функций можно свести задачу каждого агента потребности к задаче увеличения (максимизации) удовлетворенности u_j^{dem} агента потребности j (верхний индекс $task$ означает, что величины относятся к агентам заказов):

$$u_j^{dem} = \sum_i \alpha_{ij}^{dem} \cdot f_{ij}^{dem}(x_i - x_{ij}^{id}),$$

где α_{ij}^{dem} – весовые коэффициенты нормируются: $\sum_i \alpha_{ij}^{task} = 1$.

Аналогично может быть сформулирована задача нахождения таких состояний агентов x_{ij} заказов j , чтобы максимизировать суммарную удовлетворенность всех агентов потребностей:

$$u^{dem} = \sum_j \beta_j^{dem} u_j^{dem} = \sum_j \beta_j^{dem} f_{ij}^{dem}(x_i - x_{ij}^{id});$$

$$u^{dem*} = \max_{x_i} (u^{dem}),$$

где β_j^{task} – вес заказа, позволяющий устанавливать и динамически менять приоритеты.

Симметричным образом своя целевая функция может быть задана и со стороны ресурсов-исполнителей по критериям z_k с бонус-штрафными функциями $f_{kl}^{res}(z_k - z_{kl}^{id})$, весом α_{kl}^{res} критерия k для ресурса l и значимостью ресурса β_l^{res} для системы (что аналогично весу потребностей для функций агентов потребностей):

$$u^{res} = \sum_l \beta_l^{res} \cdot u_l^{res} = \sum_l \beta_l^{res} \sum_k \alpha_{kl}^{res} \cdot f_{kl}^{res}(z_k - x_{kl}^{id});$$

$$u^{res*} = \max_{z_k} (u^{res});$$

$$z_k \in D^K, x_i \in D^I \forall i, k, I = Dim(D^I), K = Dim(D^K).$$

Переменные x и z принадлежат некоторым областям пространства критериев для потребностей и возможностей (ресурсов), I, K – размерности соответствующих пространств критериев. Верхний индекс res означает, что величины относятся к агентам ресурсов.

Тогда общая удовлетворенность системы имеет вид

$$u = u^{dem} + u^{res} + u^{res}.$$

Построение расписания в ПВ-сети. В разрабатываемом подходе агенты ПВ-сети формируют динамическое расписание в итерационном процессе переговоров, непрерывно улучшая свои показатели через увеличение значений функций удовлетворенности. В результате происходит увеличение и суммарной удовлетворенности системы, что в дальнейшем позволяет локально перестраивать существующее расписание в случае появления непредвиденных событий, таких как появление новой задачи, задержка в выполнении задачи, поломка ресурса или любые другие.

Предлагаемая общая схема построения расписания на основе модели ПВ-сети и метода сопряженных взаимодействий имеет следующий вид.

1. Фиксируется множество сопряженных (в общем случае неоднородных) элементов (агентов) системы, каждый из которых обладает определенными воз-

возможностями и потребностями в ресурсах.

2. Описываются индивидуальные цели и критерии принятия решения агентами системы, а также их предпочтения и ограничения.

3. Определяются правила принятия решений и протоколы (регламенты) сопряженных взаимодействий между агентами, позволяющие выявлять конфликты и находить компромиссы между элементами.

4. С помощью мультиагентной платформы адаптивного планирования создаются конструкции агентов и протоколы сопряженных взаимодействий.

5. Создается мультиагентная система адаптивного планирования, формирующая исходную ПВ-сеть с начальным распределением заказов и ресурсов.

6. Функционирование ПВ-сети осуществляется следующим образом:

6.1. При приходе новой задачи создается агент задачи, который получает требования к решению задачи (сроки начала/окончания и т. д.).

6.2. Агент задачи считывает из базы знаний (онтологии) технологический процесс выполнения задачи и создает агентов заказов на каждую операцию.

6.3. Агенты заказов на операции начинают по сцене искать наиболее подходящие им ОКИК с требуемыми ресурсами (составом технических средств).

6.4. Если найденный ресурс уже занят (забронирован), начинаются переговоры с целью разрешения конфликта, в ходе которых уже размещенная операция (если, например, может подождать) делает попытку сдвинуться по времени или переместиться на другой ресурс (аппаратуру).

6.5. В ходе такого перемещения выясняется виртуальная цена, которую новой задаче требуется оплатить уже размещенным операциям, чтобы они сдвинулись или переместились на другие ресурсы.

6.6. Если необходимые финансовые ресурсы имеются у агента задачи (операции), сделка совершается и все операции получают новое размещение (предлагаемые изменения единовременно применяются к сцене), если же нет – задача запоминает результат и ищет себе другое размещение.

7. Даже при успешном размещении новой задачи выполняется фаза проактивности, когда и потребности, и возможности делают попытки улучшить свои состояния.

8. Если состояние ресурсов или потребности в них изменяются с приходом новых событий, то ПВ-сеть перестраивается путем переговоров между агентами с целью разрешения конфликтов в той части, которая непосредственно связана с изменениями.

9. При этом на фоне текущего состояния делается попытка изменить распределение ресурсов, и решение принимается только в том случае, если возрастает глобальный показатель системы в целом, при этом общий показатель пересчитывается только в изменяемой части (без полной перестройки).

10. Решение задачи распределения ресурсов считается найденным, когда ни один агент ПВ-сети не может улучшить свое собственное состояние и глобальное состояние сети.

В развитие базового метода предлагаются следующие доработки:

1. Каждый агент системы имеет индивидуальный набор критериев, причем, возможно, разных (например, заказ стремится увеличить надежность и экономичность, а ресурс – быть максимально занятым).

2. Общее решение системы рассчитывается агентом системы на основе решений отдельных агентов, агент системы знает, какой из агентов лучше или хуже по каждому своему критерию (может исходить из наиболее худших для поиска

направлений улучшения).

3. У агентов задач имеются как идеальные, так и текущие значения показателей своих критериев, по которым рассчитывается степень «удовлетворенности» агентов текущим состоянием (планом).

4. Имеются динамические величины весовых коэффициентов скаляризации целевой функции виртуального денежного эквивалента.

5. Каждый показатель (критерий) имеет свой коэффициент пересчета в виртуальные деньги, обеспечивая бонусы и штрафы агентам ПВ-сети.

6. Текущий виртуальный бюджет может использоваться агентами для улучшения локального места в расписании (чем больше виртуальных денег, тем большее число других агентов может «подвинуть» данный агент).

7. Агент системы может инвестировать в худшие фрагменты расписания (кредитовать) для инициации его перестройки.

8. Агенту целесообразно использовать бюджет на улучшение того критерия, который в данный момент имеет наихудшее значение.

9. Агенты работ итерационно «подтягивают» свои критерии к локально-оптимальным значениям, компенсируя убытки других агентов за счет своего бюджета (прибыли).

Входные и выходные данные для работы метода. Входными данными разрабатываемой системы являются следующие:

- начальная конфигурация сети станций ОКИК;
- параметры орбиты КА, зоны радиовидимости и другие параметры КА;
- конфигурация аппаратуры сеансов передачи данных для каждого ОКИК;
- список задач с привязками к моментам времени;
- список требований к каждой задаче и др.

В ходе работы метода формируются следующие результаты, которые могут быть использованы для оценки качества и эффективности:

- расписание сеансов связи работы бортовой аппаратуры КА и технических средств ОКИК;
- значения ключевых показателей надежности, экономичности и др.;
- текущее состояние и график изменения удовлетворенности всех участников ПВ-сети;
- текущее состояние и график изменения финансовых ресурсов участников ПВ-сети;
- журнал переговоров и принятия решений агентов, позволяющий восстановить историю взаимодействий и принятия решений;
- журнал передачи сообщений и др.

Указанные данные представляются в табличном и графическом виде.

Полученные данные могут использоваться для моделирования процесса построения планов сеансов передачи данных между КА и сетью наземных ОКИК или в дальнейшем для управления сеансами связи в реальном времени.

При этом обеспечивается возможность ввода событий различных классов для адаптивной перестройки расписания:

- поступление новой задачи;
- изменение порядка операций для выполнения задачи;
- отзыв уже запланированной (и далее – исполняемой) задачи;
- возникновение нештатной ситуации на технических средствах на ОКИК;
- выход из строя ОКИК целиком (отключение питания и т. д.);

– изменение цены услуги ОКИК.

Кроме того, предусматриваются настройки моделей, методов и алгоритмов для управления процессом поиска решения (расписания).

Архитектура прототипа системы

Для реализации рассмотренной модели и метода предполагается разработка и исследование макета-прототипа системы. Упрощенная архитектура прототипа системы представлена на рис. 4.

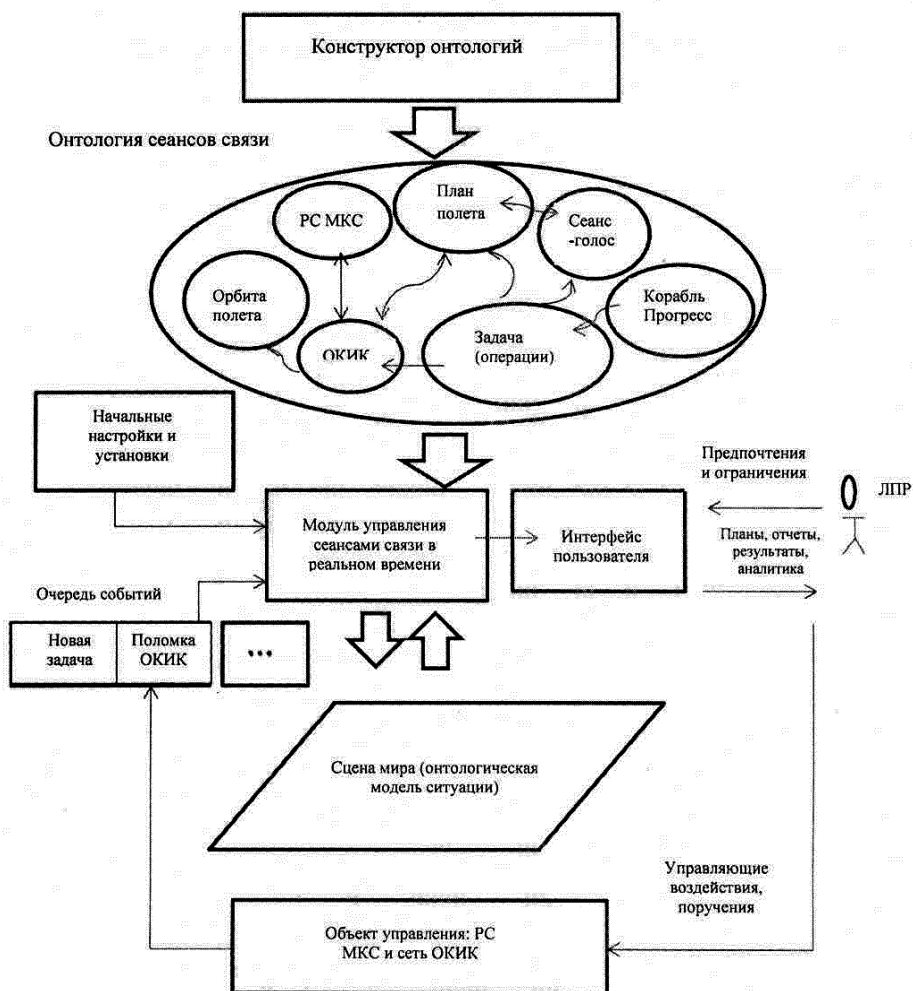


Рис. 4. Архитектура системы

В состав прототипа системы предполагается включить следующие модули:

- конструктор онтологий для создания онтологии сети сеансов связи;
- модуль управления сеансами в реальном времени;
- очередь событий, поступающих в систему;
- сцена мира для представления онтологической модели ситуации;
- модуль интерфейса пользователя.

Перечисленные модули могут использовать различные компоненты ранее разработанных мультиагентных систем [13-14], а также применять новые компо-

ненты, создаваемые совместно со СГАУ в проекте Минобрнауки РФ по реализации мультиагентной платформы адаптивного планирования.

Заключение

Таким образом, в данной работе предложен метод оптимального решения задачи планирования сеансов связи ЦУП с группировкой КА по критериям надежности и экономичности связи. Данный метод, в отличие от экспертного подхода, позволяет строить гибкое самоорганизующееся расписание группировки КА по приему передачи данных с использованием мультиагентных технологий. Метод позволяет разрешать ситуационные конфликты и осуществлять поиск компромиссов между участниками. Разработана математическая модель для реализации метода сопряженных взаимодействий для сети ОКИК. Предложена общая схема построения расписания сеансов связи сети ОКИК с группировкой КА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Соловьев В.А.* Управление космическими полетами: Учеб. пособие. В 2 ч. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 476 с.
2. *Бетанов В.В., Демидов А.С., Ступак Г.Г., Янчик А.Г.* Теоретические основы построения автоматизированной системы организационно-технического управления космическими средствами. – М: Военная академия РВСН им. Петра Великого, 2002. – 154 с.
3. *Макаров М.И., Медведев А.А.* Наземные комплексы управления космическими аппаратами. – М.: Наука и технологии в промышленности, № 1, 2012. – 9 с
4. *Галантерник Ю.М., Горюхи А.В., Калинин А.Ф.* Командно-измерительные системы и наземные комплексы управления космическими аппаратами: Монография. – М.: МГУП, 2003.
5. *Кащеев Н.А., Чаплинский В.С., Панферов В.В.* Наземно-космические информационные сети управления низкоорбитальными космическими аппаратами и обмена сообщениями между различными абонентами: принципы создания и применения, методы оценки эффективности // Новые наукоемкие технологии в технике. Энциклопедия. Под общ. ред. К.С. Касаева. – М.: НИИ «ЭНЦИТЕХ», 2006.
6. *Молотов Е.П.* Наземные радиотехнические системы управления аппаратами. – М: Физматлит, 2004. – 256 с.
7. *Кирилин А.Н., Ахметов Р.Н., Сологуб А.В., Макаров В.П.* Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии. – М.: Машиностроение, 2010. – 384 с.
8. *Лысенко Л.Н., Бетанов В.В., Иванов Н.М., Соловьев В.А.* Математическое моделирование реализации технологического цикла баллистико-навигационного обеспечения при управлении космическим полетом // Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики. – 2000. – № 1. – С. 37-44.
9. *Дудко А.Н., Литвиненко А.О., Сохранный Е.П.* Использование метода актуального анализа при планировании задействования технических средств наземного автоматизированного комплекса управления с целью обеспечения управления орбитальной группировкой космических аппаратов научного и социально-экономического назначения // Космонавтика и ракетостроение. – 2012. – № 4 (69). – С. 44-51.
10. *Артюшенко В.М., Кучеров Б.А.* Повышение оперативности бесконфликтного управления группировкой космических аппаратов в условиях ресурсных ограничений // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – Т. 9. – № 3. – С. 59-66.
11. *Калашников Д.А., Соловьев В.А., Скобелев П.О., Симонова Е.В., Майоров И.В., Грачев С.П., Тихонов Д.И., Ворожейкин В.Н.* Особенности постановки задачи оптимизации показателей надежности и экономичности сеансов для передачи разнородных данных группировки КА и ЦУП через сеть наземных станций // Вестник Самарского государственного технического университета. – 2014. – № 4(44). – С. 52-61.
12. *Скобелев П.О.* Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений // Автометрия. – 2002. – № 6. – С. 45-61.
13. *Скобелев П.О.* Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 12. – С. 33-46.
14. *Скобелев П.О.* Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: прин-

Статья поступила в редакцию 8 октября 2014 г.

METHOD FOR COMMUNICATION SESSIONS BETWEEN CONTROL TOWER AND SWARM OF SPACECRAFTS ADAPTIVE SCHEDULING BY COMMUNICATION RELIABILITY AND EFFICIENCY CRITERIA

D. Kalashnikov¹, V. Solovyov¹, P. Skobelev⁵, E. Simonova², I. Mayorov³, O. Lakhin⁴, D. Tichonov⁵, V. Vorosheykin⁵

¹JSC “S.P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”
4A, Lenin Street, Korolev, Moscow Region, 141070, Russia

²Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev (National Research University)
34, Moskovskoeshosse, Samara, 443086, Russia

³Institute for the Control of Complex Systems, Russian Academy of Sciences
61, Sadovaya street, Samara, 443020, Russia

⁴Software Engineering Company “Smart Solutions” Ltd.
17, Moskovskoe shosse, office center “Vertikal”, office 1201, Samara, 443013, Russia

⁵Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya street, Samara, 443100, Russia

Method for communication sessions between control tower and swarm of spacecrafts adaptive scheduling by communication reliability and efficiency criteria is considered in this paper. Unlike the expert approach, this method allows to build a flexible self-organized schedule of a swarm of transceiving spacecrafts based on the multi-agent technologies. This method allows to solve situational conflicts and search for compromise between the participants, considering flexibly changing criteria weights. A mathematical model that allows to implement the compensation method for separate command-measuring complex (SKMC) network is developed. Also, a general scheme of communication sessions schedule in the network of SKMC technical devices with swarm of spacecrafts is suggested. Multi-agent experimental system architecture is suggested and its basic components for the implementation and experimental research of the developed method are defined.

Keywords: *spacecraft, separate command-measuring complex (SKMC), optimization, simulation reliability, efficiency, communication sessions, swarm of spacecrafts, control tower, multi-agent technologies.*

Dmitry A. Kalashnikov, Head of “Operation Analysis and Support of the On-Board Radio Engineering Systems and Technical Means of Ground Control of Spacecraft and Launch Vehicles” Department at RSC “Energia”.

Vladimir A. Solovyov, First Deputy General Designer, Deputy Director of Prime Design Bureau in charge of flight operational use, testing rocket-space complexes and systems of RSC “Energia” named after S.P. Korolev”.

Petr O. Skobelev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Elena V. Simonova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Igor V. Mayorov, Senior Specialist.

Oleg I Lakhin, Head of Department.

Denis I. Tichonov, Postgraduate Student.

Vladimir N. Vorosheykin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

УДК 681.5:621.315

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИЗОЛИРОВАНИЯ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ ДОСТИЖЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ*

В.Н. Митрошин, Д.И. Кулешова

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Предлагается методология разработки системы управления процессом изолирования кабелей связи, обеспечивающей достижение требуемого эксплуатационного качества продукции с учетом полосы частот передаваемого по кабелю сигнала. Структура проектируемой системы регулирования и ее параметры определяются на основании анализа предварительно проведенного обследования автоматизируемого технологического процесса. Анализ спектральной плотности мощности исследуемого процесса позволил сделать вывод о наличии источника гармонических нерегулярностей управляемой величины с частотой, определяемой скоростью вращения шнека экструдера. Предложена структура двухконтурной системы управления процессом наложения кабельной изоляции, качественно улучшающей показатели процесса изолирования.

Ключевые слова: производство кабелей, автоматизация, эксплуатационный параметр качества.

В структурированных кабельных системах (СКС) в настоящее время используются несколько типов передающих сред – волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), а также проводные кабели связи (КС) – коаксиальные кабели, кабели UTP (Unshielded Twisted Pair) – на основе витых пар без экранирующего покрытия и кабели STP (Shielded Twisted Pair) – на основе экранированных витых пар с общим внешним экраном в виде оплетки.

Проводные КС помимо СКС широко используются также в локальных вычислительных сетях, системах управления инженерным обеспечением зданий, в разнообразных системах промышленной автоматизации, системах пожарной и охранной сигнализации, телефонных сетях, оконечных участках сетей доступа и т. д.

Производство проводных КС является непрерывным, многооперационным технологическим процессом, в полной мере обладающим признаками сложной системы. При этом качество изготавливаемого кабеля формируется на всех промежуточных технологических операциях его производства и может быть измерено лишь на готовом изделии.

Современные коаксиальные КС, так же как и кабели на основе витых пар, рассчитаны на передачу сигналов в широкой полосе передаваемых частот. Так,

* Работа поддержана грантами РФФИ (проекты 15-08-01347-а и 15-08-04209-а).

Владимир Николаевич Митрошин (д.т.н.), заведующий кафедрой «Автоматика и управление в технических системах».

Дарья Игоревна Кулешова, магистрант кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

коаксиальный кабель марки РК 75-3,7-361 рассчитан на передачу сигналов в полосе частот до 800 МГц, а кабели STP категории 7a – на передачу сигналов в полосе частот до 1200 МГц. Это накладывает очень жесткие ограничения как на величину неоднородностей формируемого эксплуатационного параметра качества изготавливаемого кабеля [1], так и на его частотные свойства, что обусловлено шириной полосы частот передаваемого по кабелю сигнала.

Отсюда возникает задача осуществлять перед проектированием систем регулирования процессов изготовления КС предварительное обследование технологических процессов, и лишь на основе анализа полученных экспериментальных данных формулировать технические требования к проектируемым системам регулирования.

Важнейшей операцией изготовления КС, во многом определяющей качество кабеля как канала связи, является операция изолирования – наложения изоляции на токопроводящую жилу, осуществляемая на экструзионных линиях.

Авторами проведен анализ экспериментальных данных, полученных на экструзионной линии NOKIA-80, на которой осуществлялось изолирование токопроводящей жилы коаксиального радиочастотного кабеля РК 75-3,7-361. На рис. 1 показаны результаты экспериментального обследования процесса изолирования: фрагмент измеренной с помощью датчика диаметра модели LG1010 фирмы Beta Instrument Company Limited кривой нерегулярности диаметра изоляции кабельной жилы $\Delta D_{из}$ по ее длине L .

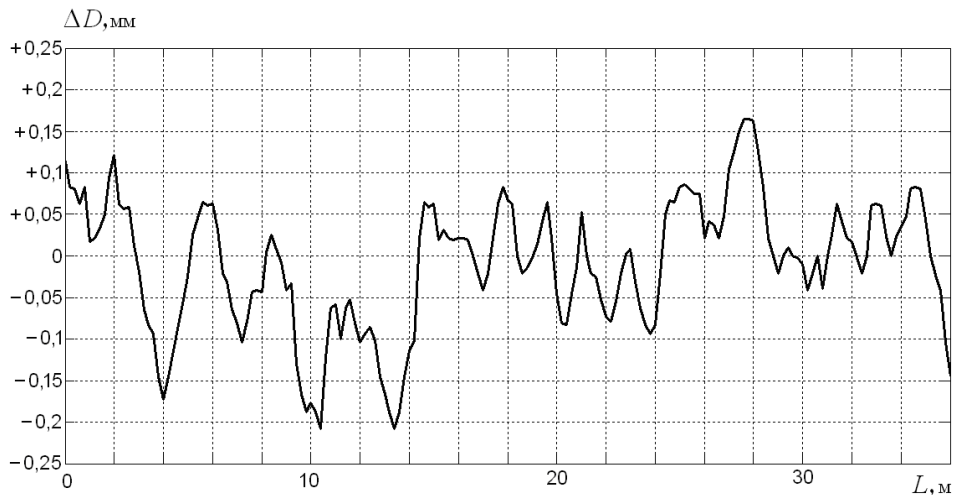


Рис. 1. Нерегулярность диаметра изоляции кабельной жилы

Предварительный анализ полученных результатов позволяет, во-первых, сделать вывод о нестационарном характере процесса, а во-вторых – о наличии высокочастотных гармонических нерегулярностей контролируемого параметра. Для подтверждения либо отклонения данной гипотезы была проведена статистическая обработка экспериментальных данных.

По полученным экспериментальным данным была определена спектральная плотность мощности (рис. 2) центрированного процесса путем преобразования Фурье его корреляционной функции [2]. Расчеты были выполнены на кафедре информационных систем и технологий Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королёва.

Анализ спектральной плотности мощности исследуемого процесса позволяет

сделать вывод о наличии источника гармонических нерегулярностей с частотой $f = 0,43$ Гц. Полученные результаты полностью совпадают с предположением, высказанном в [3], что имеющиеся «высокочастотные» периодические неоднородности диаметра накладываемой кабельной изоляции обусловлены периодическими пульсациями давления расплава в кабельной головке, вызываемыми вращающимся шнеком экструдера. Действительно, при снятии экспериментальных данных на экструзионной линии NOKIA-80 скорость вращения шнека экструдера n составляла 25 об/мин. В пересчете на частоту получаем:

$$f = \frac{n}{60} = \frac{25}{60} = 0,42[\text{Гц}].$$

Таким образом, можно считать доказанным, что наличие «высокочастотных» нерегулярностей диаметра накладываемой на экструзионной линии изоляции кабельной жилы определяется периодическими пульсациями давления расплава полимера в кабельной головке, вызываемыми вращающимся шнеком экструдера. Пульсирующий градиент давления расплава полимера должен рассматриваться в качестве сильного измеряемого возмущающего воздействия системы управления процессом наложения кабельной изоляции. Его параметры легко определить экспериментально в соответствии с методикой, описанной в [3].

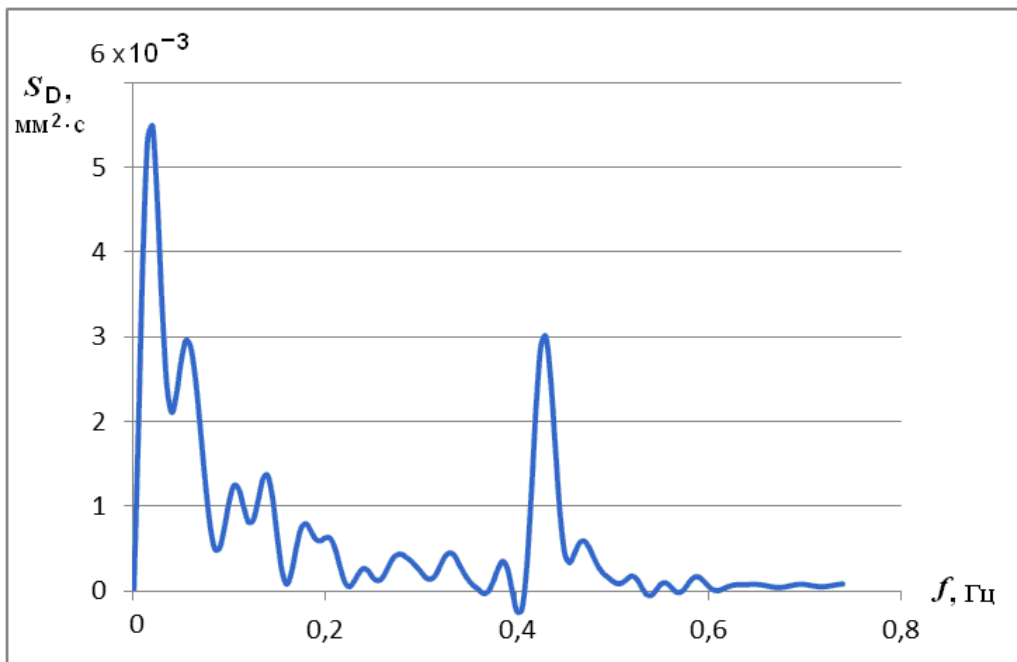


Рис. 2. Спектральная плотность мощности диаметра изоляции кабельной жилы

Динамическая компенсация возмущающих воздействий в виде управления по прямой связи может заблаговременно компенсировать сильные измеряемые помехи [4].

Предлагается для управления процессом наложения кабельной изоляции на экструзионных линиях использовать систему, функциональная схема которой приведена на рис. 3. В данной системе независимо регулируются давление расплава полимера в зоне дозирования экструдера путем изменения скорости вращения шнека и диаметр изоляции – скоростью протяжки кабельной жилы. Кон-

тур регулирования давления расплава полимера предназначен для устранения более высокочастотных нерегулярностей изоляции, а контур регулирования диаметра – низкочастотных.

На рис. 3 P_1 и P_2 – регуляторы контуров регулирования давления и диаметра соответственно; $ИМ_1$ – исполнительный механизм экструдера (привод шнека); $ИМ_2$ – исполнительный механизм тянущего устройства (привод кабестана); ФНЧ – низкочастотный фильтр.

Физические величины, указанные на рисунке: Q^* – весовая производительность экструдера; $D'_{из}$ – диаметр изоляции в месте измерения (на выходе кабельной головки); $D'_{изн}$ – номинальное значение диаметра изоляции в месте измерения; $D^*_{из}$ – диаметр изоляции на выходе экструзионной линии; N, n – обороты привода шнека и привода кабестана соответственно; V – скорость изолирования (протяжки кабельной жилы); P – давление расплава полимера в кабельной головке; P^* – давление расплава полимера в зоне дозирования; $U_i, \Delta U_i$ – напряжения на выходах устройств; U_{P3} – напряжение, соответствующее заданному значению давления расплава полимера; f – возмущение; F_1, F_2 – аналитические зависимости, связывающие соответствующие параметры. $D'_{из1}$ и $D'_{из2}$ – составляющие диаметра изоляции, формируемые в зависимости от весовой производительности экструдера и скорости протяжки кабельной жилы соответственно.

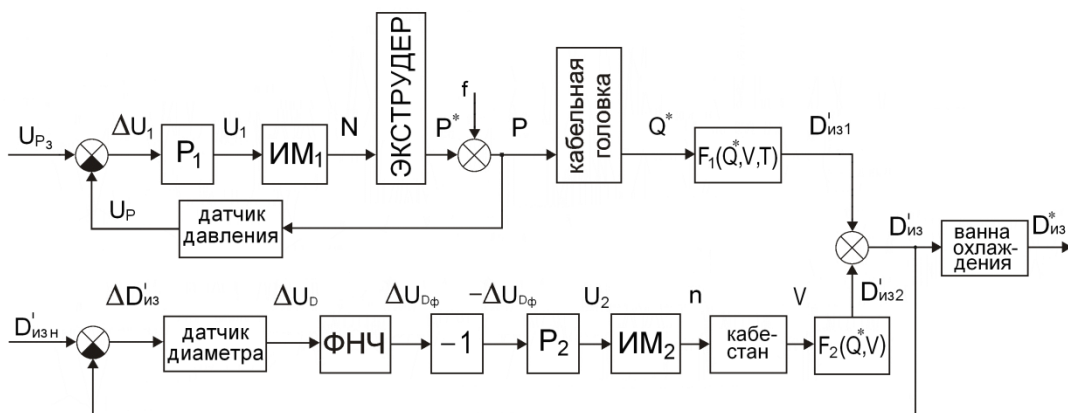


Рис. 3. Функциональная схема системы управления процессом наложения кабельной изоляции

Передаточная функция W_3 экструдера совместно с кабельной головкой, где выходом является весовая производительность, а входом – обороты шнека, представляет собой передаточную функцию апериодического звена первого порядка [5, 6]:

$$W_3 = \frac{k_1}{1 + T_1 p}. \quad (1)$$

Коэффициент передачи и постоянная времени объекта легко определяются экспериментальным путем по его переходной функции для конкретных конструктивных характеристик экструдера, технологических режимов его работы и

типоразмера изготавливаемого кабеля и пригодны для использования только в окрестностях рабочей точки.

Как утверждается в [7], объемная производительность экструдера прямо пропорциональна давлению расплава полимера на выходе зоны дозирования.

Система регулирования давления расплава полимера на выходе экструдера с использованием высокоскоростного привода шнека описана в [8]. В [7] отмечается, что если использовать высокоскоростной привод шнека, то удается компенсировать колебания давления примерно за 80 мс. При этом отклонение давления расплава при непрерывной эксплуатации экструзионной установки составляет лишь 0,3 % от заданного значения давления.

Как отмечается в [4], в основу целеполагания построения систем автоматического управления производством КС должно быть положено обеспечение требуемого эксплуатационного показателя изготавливаемого кабеля как канала связи с учетом полосы частот пропускаемого сигнала. Ванна охлаждения является звеном транспортного запаздывания. Его передаточная функция W_B может быть представлена в виде

$$W_B = k_B \cdot \exp^{-p\tau}, \quad (2)$$

где k_B – коэффициент усадки кабельной изоляции при охлаждении; τ – величина транспортного запаздывания: $\tau = L_B/V$, здесь L_B – длина ванны охлаждения, V – скорость изолирования.

Поэтому при управлении процессом изолирования для уменьшения влияния звеньев с транспортным запаздыванием на динамические характеристики системы регулирования необходимо располагать датчики контролируемых параметров либо в самом экструдере (как датчик давления), либо в непосредственной близости от экструдера [4]. Например, для контроля количества выдавливаемого пресом полимера с помощью измерения диаметра изолированной жилы лазерный датчик диаметра нужно располагать непосредственно на выходе кабельной головки. При этом на основе использования уравнения сохранения массы, если известен номинальный диаметр изолированной жилы $D_{из}^*$ при температуре окружающей среды (например, 20 °С), можно легко получить формулу для установки датчика диаметра $D'_{изн}$ в месте его установки на выходе кабельной головки:

$$D'_{изн} = \sqrt{\left(D_{из}^*\right)^2 \cdot \frac{\rho^*}{\rho_0} + d^2 \cdot \frac{(\rho_0 - \rho^*)}{\rho_0}}, \quad (3)$$

где d – диаметр медного проводника; ρ_0 – плотность полимера при температуре его выхода из кабельной головки; ρ^* – плотность полимера при температуре окружающей среды.

Зависимость плотности полиэтилена высокого давления низкой плотности (ПЭНП) марки 153-01, обычно применяемого для изолирования кабелей связи, приведена в частности в [4].

ФНЧ с супернизкой частотой среза 0,2 Гц может быть реализован лишь в цифровой форме в виде КИХ-фильтра на базе, например, цифрового сигнального процессора [9].

Регулирование диаметра изолированной жилы может осуществляться разными способами. Во многих источниках, например в [10], это предлагается осу-

ществлять путем изменения скорости изолирования V .

При этом передаточная функция W_T тянущего устройства (кабестана) описывается, как правило, передаточной функцией апериодического звена первого порядка [11]:

$$W_T = \frac{k_2}{1 + T_2 p}. \quad (4)$$

Необходимо отметить, что на работу системы регулирования давления расплава полимера в выходной зоне экструдера оказывает большое влияние стабильность температуры расплава полимера. Поэтому необходимо стабилизировать ее с максимально возможной точностью. В [12] описана система распределенного управления температурой расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера, обеспечивающая поддержание температуры расплава на выходе зоны дозирования с отклонением от требуемого значения не более ± 1 °С.

Предлагаемая методология разработки системы управления процессом изолирования кабелей связи, обеспечивающей достижение требуемого эксплуатационного качества продукции с учетом полосы частот передаваемого по кабелю сигнала, позволяет существенно повысить качество выпускаемой продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Митрошин В.Н., Митрошин Ю.В. Использование системного подхода при автоматизации непрерывных технологических процессов кабельного производства // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – Самара: СамГТУ, 2010. – № 7(28). – С. 26–31.
2. Прохоров С.А., Графкин А.В., Графкин В.В. и др. Прикладной анализ случайных процессов / Под ред. С.А. Прохорова. – Самара: СНЦ РАН, 2007. – 582 с.
3. Митрошин В.Н. Регулирование давления расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера при пульсирующем градиенте давления // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 1(29). – С. 39–44.
4. Митрошин В.Н. Многопараметрическое управление производством кабелей связи на основе прогнозирующих моделей // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 4(40). – С. 37–44.
5. Laurich K., Muller G., Bluckler B., Wallau H. Untersuchung einer Zweigroßenregelstrecke an einer kabelummantelungsanlage. – Mess. – Steuern – Regeln, 1979, 22, №1, s. 28–31.
6. Chan D., Lee L.J. Dynamic modeling of a single screw plasticating extruder. – ANTEC'84, 1984, p. 77–80.
7. Reiner T., Bohmann J. Prozessorgeregeltes ummanteln elektrischer Leiter. – Drahtwelt, 1986, Jg. 72, № 5, s. 138–141.
8. Митрошин В.Н. Синтез системы стабилизации давления расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 3(31). – С. 237–239.
9. Митрошин В.Н., Узенгер А.А. Однокристальные микроконтроллеры и цифровые сигнальные процессоры. – Изд. 2-е. – Самара: СамГТУ, 2012. – 131 с. – ISBN 978-5-7964-1604-4.
10. Carr D. Controlling coating equipment with microprocessor-based systems. – Wire J. Int., 1984, vol. 16, № 7, p. 36–38.
11. Laurich K., Muller G., Wallau H. Automatisierungssystem fur kabelummantelungsanlagen. – Mess. – Steuern – Regeln, 1979, 22, № 7. – s. 370–374.
12. Митрошин В.Н., Нечаев А.С. Структурное и численное моделирование распределенного управления температурой расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 2(38). – С. 26–32.

Статья поступила в редакцию 25 января 2015 г.

DEVELOPMENT OF ISOLATION PROCESS CONTROL SYSTEM OF COMMUNICATION CABLES, TO ENSURE ACHIEVEMENT OF THE REQUIRED QUALITY OF PRODUCT

V.N. Mitroshin, D.I. Kuleshova

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russia

A methodology for communication cables insulation process control systems is presented. It ensures achieving the desired quality of the product, taking into account the operational frequency bands of the signal transmitted through the cable. The structure of the control system designed and its parameters are determined on the basis of the preliminary survey analysis of the automated process. The power spectral density analysis of the analyzed process leads to the conclusion that there is a controlled values harmonic-irregularities having a frequency determined by the extruder screw rotational speed. The structure of a double-circuit control system of applying cable insulation which considerably improves the insulation process indices is proposed.

Keywords: *cable manufacture, automation, operational quality setting.*

УДК 681.391:543/545

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ С ЦЕЛЬЮ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ МУЛЬТИДЕТЕКТОРНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ

Р.Т. Сайфуллин, С.С. Александров

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматривается процесс формирования сигналов в мультиканальной хроматографической системе. Число каналов определяется либо числом используемых детекторов (газовая хроматография), либо числом длин волн, на которых выходные хроматографические сигналы регистрируются (жидкостная хроматография). Алгоритм обработки мультиканальных сигналов с использованием метода главных компонент состоит из следующих этапов: регистрация многоканальных хроматограмм на выходе хроматографа; формирование матрицы отсчетов; получение из матрицы отсчетов факторов; на основе расчета и анализа коэффициентов парной корреляции сравнение факторов и принятие решения.

***Ключевые слова:** хроматограмма, мультиканальный сигнал, главные компоненты, коэффициент корреляции.*

Внедрение в исследовательскую практику многопараметрических информационно-измерительных систем (ИИС) на порядок увеличивает объем регистрируемой информации, при этом существенно усложняется анализ полученных данных. Особое место в структуре многопараметрических ИИС занимают приборы, позволяющие регистрировать данные большим количеством датчиков (детекторов) в течение длительного времени. Актуальным при этом является процесс автоматизации анализа и классификации огромного массива полученной информации. Одной из сфер применения подобного рода ИИС являются аналитические измерения.

Современные аналитические приборы могут производить огромное количество измерений. Однако из-за мультиколлинеарности доля полезной информации в таком массиве данных может быть относительно невелика. Для выделения значимой информации используются методы сжатия данных, основанные на представлении исходных данных через новые переменные существенно меньшей размерности, чем число исходных переменных. Сжатие данных позволяет представить полезную информацию в более компактном виде, удобном для визуализации и интерпретации. Одним из основных способов сжатия данных является метод главных компонент (МГК) [1]. Заметим, что следует различать главную компоненту (жен. род), определяемую в МГК, и химический компонент (муж. род), присутствующий в исследуемом образце. В первом случае это абстрактная величина, характеризуемая вектором нагрузок; во втором это реальное вещество, имеющее свой спектр. МГК является разновидностью мультикорреляционного

Раухат Талгатович Сайфуллин (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Информационно-измерительная техника».

Сергей Сергеевич Александров, аспирант.

анализа и основан на обработке корреляционных матриц большой размерности.

При использовании МГК предполагается, что несколько измеряемых переменных сильно коррелируют друг с другом. Это означает, что либо они взаимно определяют друг друга, либо связь между ними обуславливается третьей величиной, которую непосредственно измерить нельзя [2]. Модель главных компонент в большей степени связана с этим предположением и дает возможность получить числовые значения этих третьих величин в виде набора линейно-независимых факторов (ЛНФ), которые описывают и воспроизводят исходную матрицу данных с необходимой точностью.

Алгоритм обработки мультисканальных сигналов с использованием МГК состоит из следующих этапов:

- регистрация многоканальных хроматограмм на выходе хроматографа;
- формирование на основе многоканальных хроматограмм матрицы отсчетов;
- получение факторов из матрицы отсчетов;
- сравнение факторов между собой на основе анализа и расчета коэффициентов парной корреляции.

Пусть в результате эксперимента сформирована матрица данных X . Это могут быть, например, многоканальные хроматограммы, регистрируемые на выходах многоволнового детектора на основе диодной матрицы (жидкостная хроматография) [2], либо сигналы на выходах детекторов разного принципа действия, соединенных последовательно или параллельно (газовая хроматография) [3] (см. рисунок). Число каналов определяется либо числом используемых детекторов, либо числом длин волн, на которых регистрируются выходные хроматографические сигналы.

ИИС для мультidetекторной хроматографии с параллельно подключенными детекторами представлена на рис. *а*, с последовательно подключенными детекторами – на рис. *б*.

Автоматический пробоотборник подает в поток газа-носителя определенное количество анализируемой смеси. В хроматографической колонке осуществляется разделение смеси на отдельные составляющие компоненты, попадающие в детектор. Детектор регистрирует присутствие веществ, отличающихся по физическим или физико-химическим свойствам от газа-носителя, и преобразует возникающие изменения в электрический сигнал.

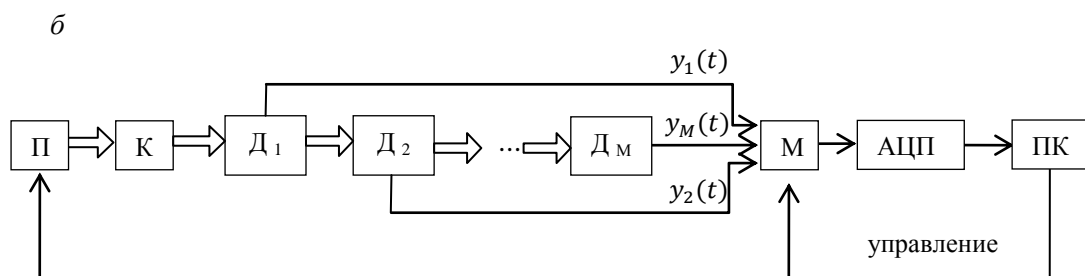
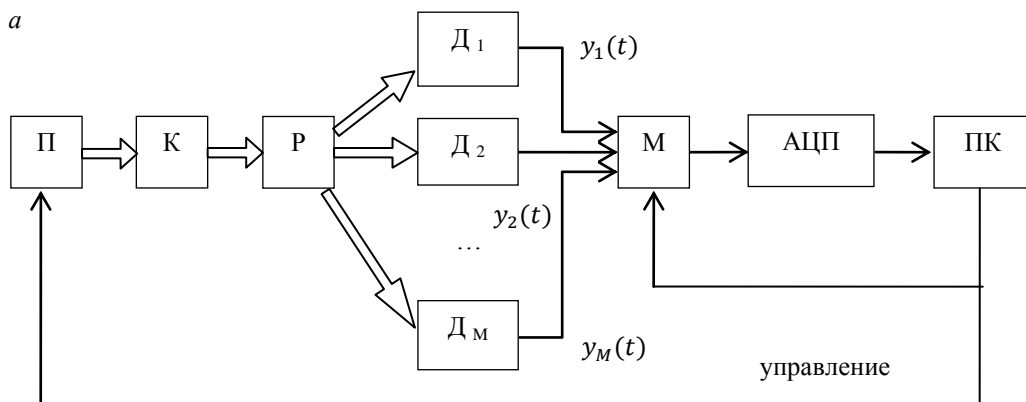
Используют следующие типы детекторов: ПИД – пламенно-ионизационный детектор, ДТП – детектор по теплопроводности (катарометр), ЭЗД – электронно-захватный детектор, ПФД – пламенно-фотометрический детектор, ТИД – термоионный детектор, ФИД – фотоионизационный детектор. Детекторы могут объединяться в аналитическом модуле в различных комбинациях.

Далее происходит нормировка и аналого-цифровое преобразование полученного сигнала. В мультidetекторном хроматографе выходные сигналы детекторов поступают на вход АЦП через мультиплексор, который осуществляет циклический поочередный опрос всех каналов хроматографа. Для каждого из детекторов ПК формирует зависимости сигнала от времени (хроматограммы).

Сигнал каждого из детекторов с номерами $t \in \{1, 2, \dots, M\}$ (M – общее число детекторов) представляется в виде совокупности дискретных отсчетов, взятых в моменты времени с номерами $n = 1, 2, \dots, N$, где N – общее число отсчетов. Тогда в векторной форме сигнал может быть представлен как

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_n, \dots, X_N) = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} & \dots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} & \dots & x_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{M1} & x_{M2} & \dots & x_{Mn} & \dots & x_{MN} \end{pmatrix},$$

где $X_n = (x_{1n}, \dots, x_{mn}, \dots, x_{Mn})^T$ – значение сигнала в момент времени с номером $n \in \{1, 2, \dots, N\}$; x_{mn} – значение m -й компоненты сигнала в указанный момент времени, $m \in \{1, 2, \dots, M\}$; T – знак транспонирования.



ИИС для мультidetекторной хроматографии:

a – параллельное подключение детекторов; *б* – последовательное подключение детекторов;
 П – автоматический пробоотборник, К – колонка, Р – распределитель (делитель потока), Д₁–
 Д_М – детекторы, М – мультиплексор, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ПК – персональ-
 ный компьютер

Таким образом, зарегистрированные хроматограммы могут быть представ-
 лены в виде матрицы отсчетов X . Например, при средней длительности хромато-
 граммы 17,05 мин, интервале дискретизации $\Delta = 1$ с, использовании 8 детекто-
 ров ($M=8$) формируется матрица X размера (8×1024) . В терминах МГК для матри-
 цы исходных данных X размерностью $M \times N$ M – число образцов (число объек-
 тов наблюдения), N – число переменных.

Исходная матрица данных X подвергается предварительной обработке, кото-
 рая включает операции центрирования и нормирования. Тогда для матрицы Z
 центрированных и нормированных значений переменных элементы матрицы Z
 вычисляются по формуле

$$z_{mn} = \frac{x_{mn} - \bar{x}_n}{s_n},$$

где x_{mn} – m -е значения n -й компоненты вектора X_n , $m=1, 2, \dots, M$; $n=1, 2, \dots, N$;

\bar{x}_n – оценка математического ожидания компонент вектора X_n :

$$\bar{x}_n = \frac{\sum x_{mn}}{M},$$

s_n – оценка среднеквадратического отклонения компонент вектора X_n :

$$s_n = \sqrt{\frac{\sum (x_{mn} - \bar{x}_n)^2}{M - 1}}.$$

МГК заключается в нахождении для исходных данных такого их ортогонального преобразования в новую систему координат, для которого выполняются следующие условия:

- выборочная дисперсия данных максимальна вдоль первой координаты;
- выборочная дисперсия данных вдоль k -й координаты максимальна при условии ортогональности первым $(k-1)$ координатам.

Следовательно, направления базисных векторов будут выбраны так, что коэффициент ковариации между проекциями исходного набора данных на различные координатные оси будет равен нулю.

В векторной форме проекция многоканального хроматографического сигнала на главные компоненты может быть представлена в виде

$$Y = AZ,$$

где Z – исходный многоканальный сигнал (центрированный и нормированный) размерности $(M \times N)$; A – матрица преобразования размерности $(K \times M)$ (матрица нагрузок); Y – некоррелированный многомерный временной ряд (размерности $(K \times N)$), представляющий собой проекцию исходного сигнала на K главных компонентов.

Процедура построения матрицы A включает в себя следующие шаги.

1. Для исходного многоканального хроматографического сигнала Z производится расчет ковариационной матрицы $C = \{c_{ij}\}_{M \times M}$. Элементы ковариационной матрицы определяются как

$$c_{ij} = \text{cov}(Z_i, Z_j) = \frac{1}{N-1} Z_i Z_j^T, \quad i, j = \{1, 2, \dots, M\},$$

где Z_i и Z_j – строки матрицы Z .

2. Осуществляется поиск собственных значений λ_i и собственных векторов F_i ковариационной матрицы C .

3. Матрица преобразования A формируется из первых K собственных векторов F_i , расположенных в порядке убывания соответствующих собственных значений λ_i ковариационной матрицы C :

$$A = (F_1, F_2, \dots, F_K)^T,$$

где $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_K \geq 0$, $0 < K \leq M$.

МГК работает как фильтр: сигнал содержится в основном в проекции на первые главные компоненты, а в остальных компонентах пропорции шума намного выше. Оценку числа главных компонент будем производить по правилу «сломанной трости» [4].

Набор нормированных собственных чисел $\frac{\lambda_i}{trC}$, $i=1, 2, \dots, M$ (trC – след матрицы C) сравнивается с распределением длин обломков трости единичной длины, сломанной в $(M-1)$ -й случайно выбранной точке (точки разлома выбираются независимо и равномерно распределены по длине трости). Пусть L_i ($i=1, 2, \dots, M$) – длины полученных кусков трости, занумерованные в порядке убывания длины: $L_1 \geq L_2 \geq \dots \geq L_M$.

Математическое ожидание \bar{L}_i

$$l_i = \bar{L}_i = \frac{1}{M} \sum_{j=i}^M \frac{1}{j}.$$

По правилу сломанной трости K -й собственный вектор (в порядке убывания собственных чисел λ_i) сохраняется в списке главных компонент, если

$$\frac{\lambda_1}{trC} > l_1 \ \& \ \frac{\lambda_2}{trC} > l_2 \ \& \ \dots \ \& \ \frac{\lambda_K}{trC} > l_K.$$

Сравнение многокомпонентных хроматограмм, соответствующих анализируемым образцам, осуществляется путем сравнения наборов расчетных ЛНФ с помощью матрицы коэффициентов корреляции ЛНФ исследуемых образцов и контрольного образца.

Основным показателем сходства или различия факторов при их сравнении может быть выбран коэффициент корреляции. Пусть сравниваются факторы F_1 и F_2 . Коэффициент корреляции $R_{F_1F_2}$ показывает, являются ли сравниваемые величины линейно зависимыми, т. е. справедливость выполнения уравнения

$$F_1(i) = a + bF_2(i), \tag{1}$$

где $F_1(i)$ и $F_2(i)$ – сравниваемые факторы, a и b – некоторые коэффициенты.

Чем меньше коэффициент корреляции, тем менее похожи сравниваемые объекты; чем больше – тем более похожи.

Согласно Джаффе [5] корреляция считается удовлетворительной, если $0,94 < R_{F_1F_2} < 0,97$; хорошей, если $0,97 < R_{F_1F_2} < 0,99$, и отличной при $R_{F_1F_2} > 0,99$. При $R_{F_1F_2} > 0,995$ уравнение (1) можно считать аналитической зависимостью.

Исходные матрицы мультidetекторных хроматограмм обычно описываются тремя-четырьмя ЛНФ. Максимальный вклад четвертого, пятого факторов, как правило, находится на уровне ошибок проведения хроматографического эксперимента. При идентификации образцов целесообразно ограничиться числовыми значениями первых трех факторов. Таким образом, критерием идентичности образца являются коэффициенты парной корреляции, соответствующие данному

образцу факторов $F_1 \div F_3$. Полностью идентичными образцами можно считать образцы, для которых коэффициенты парной корреляции факторов F_1 не ниже 0,99; F_2 не ниже 0,98; F_3 не ниже 0,96.

Пусть в результате эксперимента получены факторы F_1^1, F_2^1, F_3^1 для первого образца и факторы F_1^2, F_2^2, F_3^2 для второго образца. Пусть коэффициенты корреляции факторов, полученные для этих двух образцов, имеют значения, представленные в таблице:

Значения коэффициентов парной корреляции

Фактор	F_1^1	F_2^1	F_3^1	F_1^2	F_2^2	F_3^2
F_1^1	1,000	0,000	-0,220	0,996	-0,015	-0,125
F_2^1	0,000	1,000	-0,305	-0,012	0,984	-0,184
F_3^1	-0,220	-0,305	1,000	-0,270	-0,471	0,960
F_1^2	0,996	-0,012	-0,270	1,000	-0,015	-0,180
F_2^2	-0,015	0,984	-0,471	-0,015	1,000	-0,358
F_3^2	-0,125	-0,184	0,960	-0,180	-0,358	1,000

Следовательно, коэффициенты парной корреляции соответствующих факторов таковы: коэффициент корреляции между факторами F_1^1 и F_1^2 равен 0,996; между факторами F_2^1 и F_2^2 равен 0,984; между факторами F_3^1 и F_3^2 равен 0,960.

Значения этих коэффициентов могут быть использованы для выявления идентичности образцов. Критерии сходства могут быть установлены по Джаффе: похожими считаются образцы, для которых коэффициенты парной корреляции соответствующих факторов выше 0,94.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Померанцев А.Л. Метод главных компонент // Российское хемометрическое общество. – 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rcs.chph.ras.ru/>
2. Гаврилина В.А., Сычев С.Н. Исходные гипотезы для распознавания многокомпонентных физико-химических систем комбинацией «высокоэффективная жидкостная хроматография – метод главных компонент» // Сорбционные хроматографические процессы. – 2012. – Т. 12. – Вып. 5. – С. 798-805.
3. Сайфуллин Р.Т., Александров С.С. Определение качественного и количественного состава компонентов сложных смесей с использованием мультidetекторного хроматографа // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 4 (40). – С. 77-83.
4. Cangelosi R., Goriely A. Component retention in principal component analysis with application to DNA microarray data // Biology Direct. – 2007. – 2:2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biology-direct.com/content/2/1/2>
5. Jaffe H.H. Reexamination of the Hammett equation // Chem. Rev., 1953. – V. 53. – № 2. – p. 191-254.

Статья поступила в редакцию 15 января 2015 г.

USING THE PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS FOR SIGNAL PROCESSING IN THE MULTIDETECTOR IMS CHROMATOGRAPHY

R.T. Saifullin, S.S. Aleksandrov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

The process of signal formation in a multichannel chromatographic system is treated. The number of channels is determined either by the number of detectors (gas chromatography) or by the number of wavelengths of spectrometric detector signal (liquid chromatography). The algorithm of multi-channel signals processing using the principal-component method consists of the following stages: registrating chromatographic detector output (multi-channel chromatograms); forming a matrix of samples; obtaining the parameters from the matrix samples on the basis of the pair-correlation coefficients analysis and calculation, comparing the parameters, decision-making.

Keywords: *chromatogram, multichannel signal, the main components, correlation coefficient.*