

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ
ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ
МОДЕЛЬ
КОНЦЕНТРАТОРА ИНФОРМАЦИИ ИВС ЕДИНОГО НАЗЕМНОГО
ИК**

А.В. Николаев
(представил проф. А.В. Королёв)

Рассмотрена математическая модель концентратора информации – универсального элемента физической структуры информационно-вычислительной сети (ИВС) единого наземного измерительного комплекса (ИК). При синтезе модели был применен подход, отличный от широко распространенного метода на основе теории систем массового обслуживания. Созданная модель учитывает многочисленные линии связи концентратора информации с измерительными системами, переменный размер кадра, вариацию межкадрового интервала, ограничения на емкость буфера, многоуровневый характер программного обеспечения и влияние сбоев в линии связи: концентратор информации – вычислительный центр (ВЦ).

Концентратор информации (КИ) является устройством, которое обеспечивает интеграцию измерительных систем (ИС), предназначенных для выполнения измерений траекторий полета летательных аппаратов (ЛА), в ИВС единого наземного измерительного комплекса (ЕНИК). ЕНИК адаптивно управляет ИС на основании поступающей информации о траектории полета ЛА. На рис. 1 представлено место КИ в преобразованной информационно-вычислительной сети (ИВС) ЕНИК.

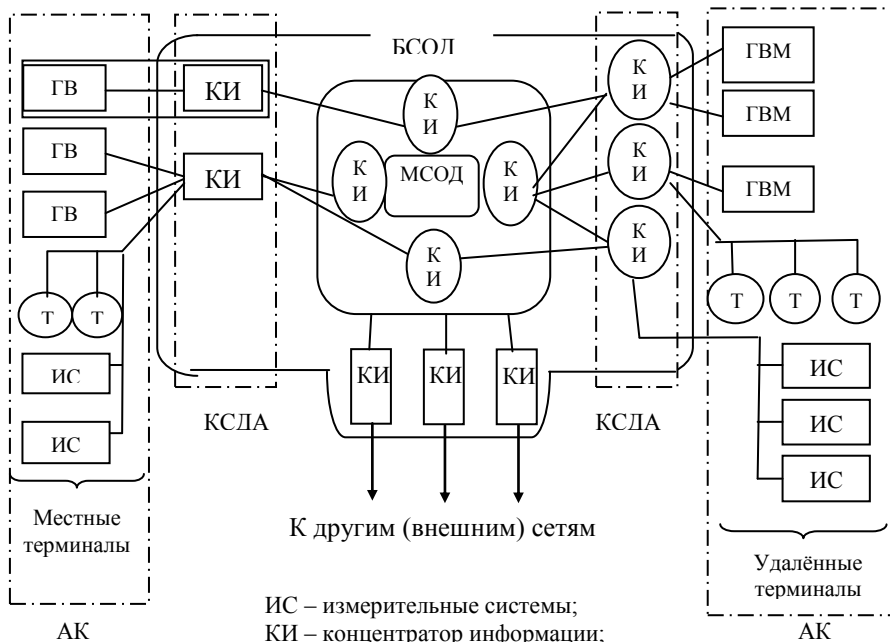
Использование КИ позволяет заменить одним универсальным элементом большинство элементов физической структуры ИВС [1]:

- комплексы сетевого доступа абонентов (КСДА);
- комплексы сетевого доступа к главной вычислительной машине индивидуальные (КСДМ-И);
- комплексы сетевого доступа групповые (КСДМ-Г);
- концентраторы терминалов (КТ);
- узлы коммутации (УК);
- шлюзы.

Для анализа динамических характеристик и пропускной способности КИ необходимо разработать адекватную математическую модель.

Исходные данные. КИ является устройством с промежуточным накоплением. КИ соединен с несколькими ИС посредством телефонных и телеграфных линий связи. В то же время, КИ подключён к телефонной линии связи, которая соединяет КИ, расположенный на измеритель-

ном пункте, с КИ, расположенным в вычислительном центре космодро-



ма, как показано на рис. 2.

Рис. 1. Физическая структура ИВС ЕНИК

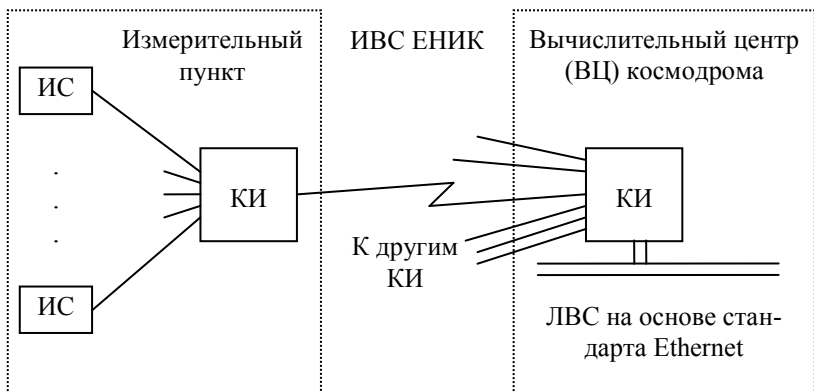


Рис. 2. Структурная схема внешних связей КИ

Аппаратно КИ состоит из ПЭВМ с набором устройств сопряжения, которые выполняют согласование физических параметров связи: количество бит в информационной посылке (5 для телеграфа, 7 или 8 для телефона), длину стоп-бита (1; 1,5; 2), скорость передачи данных в канале, количество синхросимволов, коды синхросимволов и т.д. В качестве устройства сопряжения известны: «устройство сопряжения» [4], прибор НИ-526Б, НИ-557 и др. Устройства сопряжения выполняют также и согласование протоколов звена передачи данных, например: BSC, SLIP, HDLC и т.д. В качестве ПЭВМ, входящей в состав КИ, обычно используется IBM-совместимая ПЭВМ. Программное обеспечение (ПО) использует UNIX-подобную операционную систему, полный набор утилит и служб, электронную почту, протоколы сетезависимых уровней (например, TCP/IP или X/25), набор сетезависимых протоколов, ориентированных на задачи, выполняемые ИВС ЕНИК (сеансного, представительного, прикладного уровней). Таким образом, КИ является устройством, которое вобрало в себя достижения вычислительных сетей последних лет:

- выполняет коммутацию пакетов;
- коммутирует кадры измерительной информации (ИИ);
- предоставляет услуги электронной почты;
- предоставляет полный набор служб современных сетей и операционных систем и т.д.

Архитектура ПО КИ, предназначенного для интегрирования ИС в ЕНИК, представлена на рис. 3. Обеспечивая интегрирование ИС в ИВС ЕНИК, в ПЭВМ КИ организовывается функционирование прикладных программных процессов.

Каждый процесс организует буфер и поддерживает протокол обмена со своим ИС. Накопленные сообщения процессы передают в общий буфер – очередь сообщений. Процесс обслуживания линии связи КИ – ВЦ космодрома выполняет чтение сообщений из очереди и передачу их в линию связи. Передача в линию связи выполняется так, что кадр ИИ перед выдачей в линию связи оказывается упакованным в конверты всех уровней эталонной модели взаимодействия открытых систем.

В табл. 1 показано увеличение длины сообщения, содержащего кадр ИИ ИС «Вега», в процессе передачи в ИВС ЕНИК.

Таблица 1

Увеличение длины сообщения в процессе передачи между двумя элементами ИВС (на примере ИС “Вега”)

Уровень ПО КИ	Длина заголовка (байт)	Длина хвостовика (байт)
Прикладной	-	-
Представительный	6	1
Сеансный	11	1
Транспортный	20-24	-
Сетевой	20-24	-
Звена перед. данных	1	1
Физический	-	-

В процессе прохождения уровней сверху-вниз кадр измерительной информации вкладывается в дополнительные конверты, что увеличивает длину сообщений.

Длина сообщений на выходе из КИ различная и зависит от конкретных кодов сообщения, т.к. определённые коды могут заменяться Esc-последовательностями как, например, в протоколе SLIP: 0xC0 в Esc 0xDC, Esc в Esc 0xDD, 0x10 в 0x10 0x10.

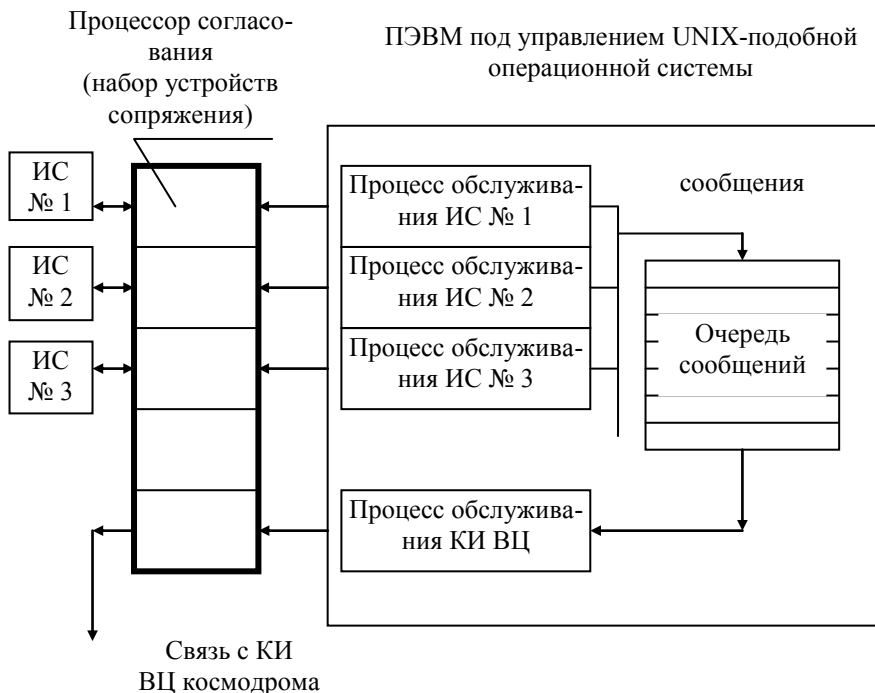


Рис. 3. Архитектура программного обеспечения КИ

Разработка математической модели КИ. В последнее время разработаны математические модели устройств, которые массово выпускаются зарубежной промышленностью, например, коммутатора Gigabit Ethernet [2]. Однако, отсутствуют модели устройств, позволяющих интегрировать ИС в ЕНИК. КИ отличается от всех известных элементов ИВС по целому ряду признаков:

- каждая ИС физически и логически соединена с КИ своей линией связи телефонной или телеграфной;
- архитектура КИ построена на основе ПЭВМ и набора адаптеров, соединённых в прибор – процессор согласования;
- ПО КИ использует многозадачную ОС типа UNIX;

– передача траекторной информации выполняется из КИ в линию связи с использованием полного стека протоколов эталонной модели взаимодействия открытых систем;

– очередь сообщений ПО КИ имеет ограничения как по количеству байт всех сообщений, хранящихся в очереди (MSGMNB), так и по количеству этих сообщений (MSGTQL).

Рассмотрим функциональную диаграмму процесса передачи кадров в канале, которая представлена на рис. 4, где k – номер кадра измерительной информации, который будет состоять из двух фаз: «р+» – межкадровая пауза, а «р-» – передача кадра; $\tau_p[k]$ – длительность межкадрового интервала; $\tau_f[k]$ – длительность передачи кадра ИИ; $t_g^b[k]$ – момент начала передачи кадра ИИ; $t_g^e[k]$ – момент окончания передачи кадра ИИ; $\tau_p[k]$ – длительность паузы до начала передачи кадра ИИ с порядковым номером k ; $\tau_f[k]$ – длительность передачи кадров ИИ; $I_f[k]$ – длина кадра ИИ; $\Delta l_{сн}$ – длина заголовков и концевиков конвертов сетезависимых уровней; $\Delta l_{сз}$ – длина заголовков и концевиков конвертов сетезависимых уровней.

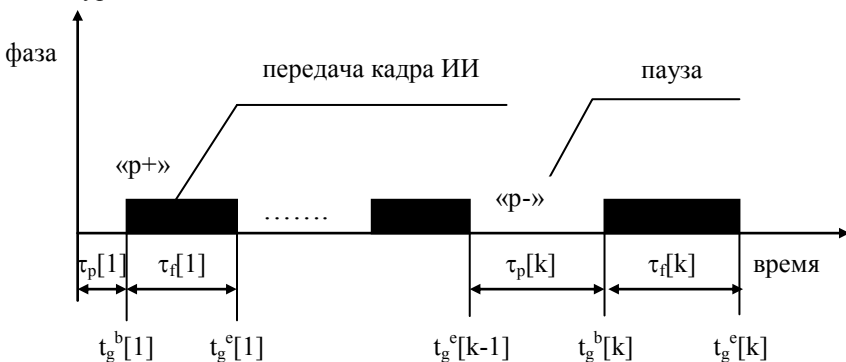


Рис. 4. Функциональная диаграмма процесса передачи кадров ИИ

В общем случае вектор состояния канала КИ – ВЦ можно выразить следующим образом:

$$X[k] = \begin{pmatrix} \tau_p[k] \\ I_f[k] \\ \Delta l_{сн}[k] \\ \Delta l_{сз}[k] \\ \text{сбои в линии связи} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Длительность межкадрового интервала ($\tau_p[k]$) зависит от интенсивности потока кадров ИИ, типов и количества подключённых ИС к КИ, типа

кадров ИИ, а также скоростей передачи данных в линиях связи. Длина кадров ИИ ($\mathbf{I}_l|\mathbf{k}$) зависит от типа данных, типа ИС и типа ИИ. Длина заголовков и концевиков конвертов сетнезависимых уровней зависит от конкретной реализации ПО КИ и включает в себя такие параметры как: дата и время, номер изделия, номер испытания, глобальный номер ИС и т.д.

Так как входной буфер КИ имеет ненулевую и конечную емкость, то модель относится к классу систем с ожиданием и потерями. Поэтому необходимо составить систему уравнений, выражающую закон баланса, и отражающую два ограничения по количеству байт (MSGMNB) и количеству сообщений (MSGTQL) в очереди:

$$\begin{cases} S_q(t) = Q_g(t) - Q_l(t) - Q_{sw}(t); \\ M_q(t) = K_g(t) - K_l(t) - K_{sw}(t), \end{cases} \quad (2)$$

где $S_q(t)$ – длина очереди в битах; $Q_g(t)$ – количество поступивших битов; $Q_l(t)$ – количество потерянных битов; $Q_{sw}(t)$ – количество скоммутированных битов; $M_q(t)$ – текущая длина очереди, измеряемая в количестве кадров ИИ; $K_g(t)$ – количество поступивших кадров ИИ; $K_l(t)$ – количество потерянных кадров ИИ; $K_{sw}(t)$ – количество скоммутированных кадров ИИ.

Определим функции $Q_*(t)$ и $K_*(t)$ как интегралы от функции состояния $F_*(\bullet)$ в промежутке $[0, t]$:

$$Q_g(t) = v_{шины} \int_0^t F_g(\bullet) dt; \quad (3) \quad K_g(t) = \int_0^t F_g(\bullet) dt; \quad (4)$$

$$Q_l(t) = v_{шины} \int_0^t F_l(\bullet) dt; \quad (5) \quad K_l(t) = \int_0^t F_l^{mes}(\bullet) dt; \quad (6)$$

$$Q_{sw}(t) = V_{л.с.} \int_0^t F_{sw}(\bullet) dt; \quad (7) \quad K_{sw}(t) = \int_0^t F_g(\bullet) dt; \quad (8)$$

Символ \bullet означает неопределённость параметров функций на данном этапе синтеза модели. Здесь параметры $v_{шины}$ – это скорость коммутации принятых кадров ИИ; $V_{л.с.}$ – скорость линии связи КИ – ВЦ. На основании свойств интеграла и формул (3) – (8), систему уравнений (2) перепишем в следующем виде:

$$\begin{cases} S_q(t) = \int_0^t [v_{шины} F_g(\bullet) - v_{шины} F_l(\bullet) - V_{л.с.} F_{sw}(\bullet)] dt; \\ M_q(t) = \int_0^t [F_g(\bullet) - F_l^{mes}(\bullet) - F_{sw}(\bullet)] dt. \end{cases} \quad (9)$$

Дальнейший синтез модели предусматривает определение функций $F_g(\bullet)$, $F_l(\bullet)$, $F_l^{mes}(\bullet)$, $F_{sw}(\bullet)$.

Для определения функции состояния источников трафика будем учитывать, что во время проведения летного эксперимента на измерительном пункте несколько ИС выполняют выдачу кадров измерительной информации в КИ. Так, для двух линий связи ИС с КИ, как это представлено на рис. 5, первым в обработку будет взят кадр ИИ, у которого, так как $t_{gi}^e < t_{gj}^e$, раньше закончится прием в КИ последнего бита информации

$$t_g^b[k] = t_{gi}^e + \tau_{pr}, \quad (10)$$

где τ_{pr} – время реакции процессора на прерывание при заполнении i -го буфера.

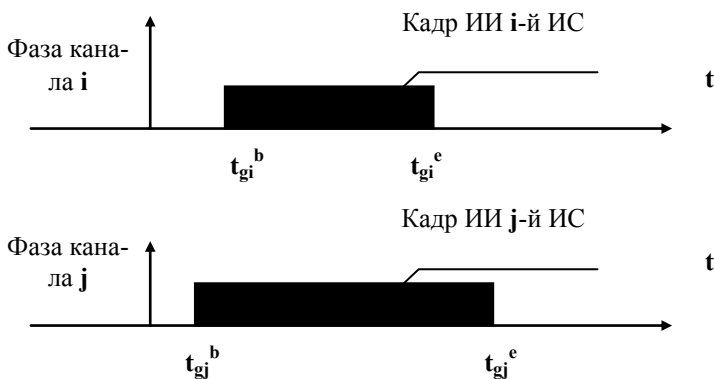


Рис. 5. Функциональная диаграмма процесса передачи кадров ИИ в КИ от двух ИС

Время окончания кадра запишется следующим образом:

$$t_g^e[k] = t_g^b[k] + l_f / v_{шины}, \quad (11)$$

где l_f – это длина кадра ИИ.

Каждый кадр ИИ принимается своим процессом (реализованным программно в многозадачной ОС типа UNIX). По получению всего кадра ИИ в момент времени t_g^e производится обработка процессором, добавление заголовков сетнезависимых уровней (прикладного, представления, сеансного) и запись этого сообщения, со скоростью шины ПЭВМ, в очередь сообщений. Формирование потока кадров от разных ИС в один поток сообщений, предназначенных для записи кадров ИИ в очередь сообщений КИ, можно производить выбирая по минимальному времени окончания кадров ИИ:

$$t_g^b[k] = \min \{t_{g1}^e, t_{g2}^e, \dots, t_{gn}^e\} + \tau_{pr}. \quad (12)$$

Теперь поток кадров ИИ, поступающих на вход очереди сообщений, можно рассматривать так, как на рис. 4, т.е. все кадры ИИ от всех ИС перестраиваются из параллельного потока в последовательный поток кадров ИИ.

Функция $F_g(\bullet)$ определяет состояние источника трафика следующим образом: $F_g(\bullet) = 0$ при фазе «р-» (межкадровая пауза), и $F_g(\bullet) = 1$ при фазе «р+» (передача кадра). Учитывая дискретность процесса генерации кадров,

моменты времени наступления t_g^b и окончания t_g^e фазы «р+» равны:

$$t_g^b[k] = t_g^e[k-1] + \tau_p[k]; \quad t_g^e[0] = 0; \quad (13)$$

$$t_g^e[k] = t_g^b[k] + I_f / v_{шины}, \quad (14)$$

где k – номер обрабатываемого кадра, $k \in K$, $k = 1, 2, 3, \dots$.

Из выражений (13) и (14) следует, что $F_g(\bullet) = 1$ на промежутке $t_g^b < t < t_g^e$, вне – $F_g(\bullet) = 0$. Теперь можем записать функцию состояния источника трафика в терминах непрерывного времени t :

$$F_g(t_g^b, t_g^e, t) = \sum_{k \in K} [1 - \Phi(t_g^b[k] - t)] [1 - \Phi(t - t_g^e[k])], \quad (15)$$

где $\Phi(\bullet)$ – функция Хевисайда.

Через функцию $F_I(\bullet)$ определяется состояние КИ теряющего кадры ИИ из-за переполнения очереди сообщений как по количеству бит, так и по количеству накопившихся сообщений. Функция $F_I(\bullet) = 1$ в случае потери кадра ИИ из-за переполнения очереди сообщений, $F_I(\bullet) = 0$ в случае нормальной передачи данных. Состояние сброса характеризуется истинностью следующих двух выражений:

$$I_{cn}[k] > S_q^i - S_q(t_g^b[k]); \quad (16)$$

$$\Phi(M_q^i - M_q(t_g^b[k])) = 0, \quad (17)$$

где S_q^i – емкость очереди кадров ИИ в битах, $S_q(t_g^b[k])$ – текущая длина очереди в битах, M_q^i – емкость очереди в количестве кадров ИИ, $M_q(t_g^b[k])$ – текущая длина очереди в кадрах ИИ, $I_{cn}[k]$ – длина сообщения, включающая длину кадра ИИ (I_f) и длину заголовков и концевиков конвертов сетезависимых уровней ПО (ΔI_{cn}):

$$I_{cn}[k] = I_f[k] + \Delta I_{cn}. \quad (18)$$

Принимая во внимание вышесказанное, функцию сброса кадров ИИ, в зависимости от наступления предела по количеству бит в очереди, можно представить в виде

$$F_I(S_q^i, F_g, I_{cn}, t) = F_g(t) \Phi(S_q(t_g^b[k]) + I_{cn}[k] - S_q^i). \quad (19)$$

Учитывая ограничения по количеству сообщений в очереди, функцию сброса кадров ИИ можно представить в виде

$$F_I^{mes}(M_q^i, F_g, I_{cn}, t) = F_g(t) \{ \Phi(M_q^i - M_q(t_g^b[k])) + \Phi(I_{cn}[k]) \}, \quad (20)$$

при этом потеря кадров ИИ начинается в момент времени $t_g^b[k]$ и заканчивается в момент $t_g^e[k]$.

Передача сообщений в линию связи в КИ ВЦ космодрома предваряется прохождением сообщений также и через сетезависимые уровни ПО КИ. Длина сообщения при этом увеличивается на длину конвертов сетезависимых уровней ПО КИ – ΔI_{c3} , (например, табл. 1), при этом полная длина сообщения ($I_{c3}[k]$) будет равна:

$$I_{c3}[k] = I_f[k] + \Delta I_{cn} + \Delta I_{c3}; \quad (21)$$

$$\tau_{sw}[k] = I_{c3}[k] / V_{л.с.} \quad (22)$$

Время обработки кадра ИИ $\tau_w [k]$ состоит из $\tau_{pr} [k]$ – времени собственно обработки а) добавления заголовков и хвостовиков в сообщение, содержащее, во-первых, кадр ИИ и, во-вторых, конверты сетезависимых уровней, б) проверки наличия запрещённых комбинаций и замены их на разрешенные [3]); $\tau_{st} [k]$ – времени занятости порта ввода-вывода другими процессами, например, программой телеконференции talk; $\tau_{sw} [k]$ – времени коммутации (при выполнении выдачи сообщения в одном направлении это будет время выдачи в линию связи). Длительность обработки выразим в зависимости от составляющих времени обработки, а также наличия или отсутствия потери кадров ИИ на входе в КИ:

$$\tau_w [k] = [1 - F_1(t_g^b [k])] (\tau_{pr}[k] + \tau_{st} [k] + \tau_{sw}[k]). \quad (23)$$

Учитывая дискретность процесса передачи сообщений в линию связи, момент начала обработки сообщения, содержащего кадр ИИ, можем выразить следующим образом:

$$t_w^b [k] = t_w^e [k-1] + (t_g^e [k] - t_w^e [k-1]) \Phi(t_g^e [k] - t_w^e [k-1]). \quad (24)$$

Из выражения (24) следует, что сообщение начинает обрабатываться либо когда пришло сообщение k , либо когда закончилась обработка предыдущего сообщения, а сообщение k уже находилось в очереди.

Время окончания обработки – это время начала обработки плюс время, затраченное собственно на обработку:

$$t_w^e [k] = t_w^b [k] + \tau_w [k]; \quad t_w^e [0] = 0. \quad (25)$$

Моменты времени собственно начала и окончания выдачи сообщения в линию связи, с учётом функции потери кадров ИИ, можно выразить следующим образом:

$$t_{sw}^b [k] = t_w^e [k] - [1 - F_1(t_g^b [k])] \tau_{sw} [k]; \quad (26)$$

$$t_{sw}^e [k] = t_w^e [k]. \quad (27)$$

При наличии идеальной линии связи между КИ и ВЦ космодрома, т.е. без сбоев, функцию состояния выдачи в линию связи можно выразить следующим образом:

$$F_{sw}^{идеал}(t_{sw}^b, t_{sw}^e, \tau_w, t) = \sum_{k \in K} [1 - \Phi(t_{sw}^b [k] - t)][1 - \Phi(t - t_{sw}^e [k])] \Phi(\tau_w [k]). \quad (28)$$

В реальной линии связи неизбежно возникают сбои. Поэтому, получаемые от КИ сообщения в КИ ВЦ космодрома неизбежно, на одном из сетезависимых уровней, подвергаются анализу с целью контроля целостности передаваемой информации. При нарушении целостности КИ ВЦ выдаёт отрицательное подтверждение передающей стороне, которое требует от КИ повторной посылки этого сообщения. Обычно, кадр измерительной информации незначительной длины: от 16 до 88 байт, поэтому при появлении сбоя в линии связи КИ – ВЦ выполняется переповтор всего сообщения. При наличии сбоя в момент времени $t_{сб}$ функция состояния КИ в процессе выдачи кадра ИИ в линию связи с ВЦ (F_{sw}) в терминах непрерывного времени определится следующим образом:

$$F_{sw} = F_{sw}^{\text{идеал}} \{1 - [1 - \Phi(t_{sw}^b[k] - t_{c6})][1 - \Phi(t_{c6} - t_{sw}^e[k])]\}. \quad (29)$$

Окончание выдачи сообщения в линию связи при наличии сбоя определяется выражением:

$$t_{sw}^{\text{сбой}}[k] = t_{sw}^e[k] + [I_{сз}[k] / V_{л.с.}] [\Phi(t_{c6} - t_{sw}^b[k]) \times \Phi(t_{sw}^e[k] - t_{c6})] + \tau_{\text{реакции}}[k], \quad (30)$$

где $\tau_{\text{реакции}}[k]$ – это период времени принятия решения КИ ВЦ о повторной передаче всего сообщения, включая кадр ИИ.

Используя вышеназванные математические выражения, можно привести полную структуру математической модели КИ ЕНИК, которая представлена на рис. 5.

Выводы. 1. Построение математической модели КИ завершено, т.к. все функции раскрыты как по аргументам, так и по структуре: выявлены все функциональные зависимости.

2. Математическая модель КИ позволяет для каждого конкретного применения определить динамические характеристики, задающие качество обслуживания, например, вероятность потери кадров ИИ из-за переполнения буфера; величину задержки при коммутации кадра ИИ; отклонение в задержках соседних кадров; рост межкадрового интервала.

3. Дальнейший анализ математической модели КИ позволит выработать оптимальную стратегию удаления кадров ИИ с целью сохранения режима реального масштаба времени получения наиболее точной информации о траектории полёта летательного аппарата.

Анализ математической модели КИ системы «Сбор» и программно-аппаратных средств управления из единого центра был выполнен при личном участии автора и под его руководством, что позволило в короткие сроки выполнить проектирование и создание ИВС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Протоколы информационно-вычислительных сетей: Справочник / С.А. Аничкин, С.А. Белов, А.В. Бернштейн и др. – М.: Радио и связь, 1990. – 504 с.*
2. *Макаренко А.В. Модель динамики коммутатора Gigabit Ethernet // Радиоэлектроника (Интернет-публикация). – 2001. – № 11. – <http://jre.cplire.ru/jre/nov01/2/text.html>*
3. *Джамса К., Коун К. Программирование для Internet в среде Windows / Перев. с англ. – С.Пб.: Питер, 1996. – 688 с.*
4. *Мокринский М.А., Николаев А.В., Шипша И.М. Патент Украины на изобретение «Пристрій сполучення» № 25664 А серия G06f 13/00 от 30.10.98. с приоритетом от 21.05.97. Держатель патента Николаев А.В.*

Поступила 26.07.2002

НИКОЛАЕВ Андрей Вадимович, нач. сектора НИИРИ (г. Харьков). В 1983 году окончил ХАИ. Область научных интересов – информационно-вычислительные сети и АСУ, диспетчерские системы на основе спутниковой навигации.