

УПРАВЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТЬЮ БОРТОВОЙ ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ В ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ АЭРОУЗЛА

Сергей Водопьянов, Людмила Харлай, Елена Толстикова, Владимир Боровик

Проблема устойчивости функционирования авиационных бортовых сетей в зоне аэроузла стоит особенно остро в связи с необходимостью безусловного обеспечения безопасности полетов, исключения летных происшествий и предпосылок к ним. Эта проблема усугубляется из-за непрерывной смены структуры сети – одни самолеты как сетевые элементы входят в зону ответственности аэроузла, другие выходят. Этот процесс является существенно нестационарным. Для обеспечения безопасности сети при наличии внешних и внутренних мешающих воздействий необходимо не просто повышать энергетические и информационные ресурсы, а применять оптимальные методы управления реконфигурацией сети. В работе предложены математические модели марковских процессов гибели и размножения с нестационарными вероятностями перехода, которой описывается текущее состояние локальной авиационной бортовой сети аэроузла. Выведена система уравнений Колмогорова – Чепмена для нестационарных вероятностей состояния сети. Применен метод гауссовой аппроксимации распределения координат системы в пространстве состояний.

Ключевые слова: авиационная бортовая сеть, уравнения Колмогорова – Чепмена, марковский процесс, процесс гибели и размножения.

І. Введение. В настоящее время активно внедряются локальные компьютерные сети различного масштаба типа сотовых информационно-коммуникационных и вычислительных систем с самоорганизацией. Они имеют смешанную структуру "борт – борт" или "борт – земля". Благодаря таким системам обеспечиваются быстрый и экономичный доступ на протяжении полетов средней и малой протяженности. Для реализации "беспроводной" технологии [1] при построении интегрированной сети аэроузла, прежде всего, необходимо определиться с коммутационными устройствами – их принципами построения, сетевыми протоколами и спецификой обработки данных. Например, при применении спутниковых сегментов в составе информационно-вычислительной сети необходимо учитывать задержки доставки данных. Для спутников, которые находятся на высоких геостационарных орбитах, только задержки на распространение сигнала от пользователя к спутнику и назад составляют около 250 миллисекунд. Поэтому в интегрированных коммутационных узлах, построенных на базе маршрутизаторов, коммутаторов обычных (*Switch*) и программных (*Softswitch*), систем передачи данных через IP-сети (*IP Multimedia Subsystem – IMS*) наборы протоколов доставки данных должны быть дополнены протоколами длительного хранения и гарантированной доставки данных (по типу протоколов сетей с толерантностью к задержкам – *Delay-Tolerant Networks – DTN*). Кроме того, необходимо обеспечивать взаимодействие между унаследованными сетями *ATN* на основе эталонной модели *OSI* и буду-

щими сетями *ATN/IPS* на основе стандарта *IPv6*. В последующем планируется внедрять модифицированные архитектуры протоколов и интерфейсов [2] для применения в интегрированных аэроузловых сетях.

Как показано в работе [3], проблема защиты авиационных бортовых сетей от несанкционированных вторжений стоит особенно остро в связи с необходимостью безусловного обеспечения безопасности полетов, исключения летных происшествий и предпосылок к ним. В зависимости от загруженности зоны полетов в районе аэроузла – аэроузел - совокупности близко расположенных аэродромов, организация и выполнение полетов с которых требуют специального согласования и координации. Если рассматривать аэроузел как автономный элемент авиатранспортной инфраструктуры, то одним из важнейших автономных сетевых сегментов аэроузла, соответственно, является авиационная бортовая сеть с мобильными узлами. Принципиальной особенностью сети с мобильными узлами является ее переменная структура. Вследствие перемещения летательных аппаратов (ЛА) в зоне аэроузла текущая топология и количество сетевых элементов непрерывно меняются: одни ЛА входят в зону ответственности аэроузла, другие, наоборот, из нее выходят.

Целью данного исследования является построение математической модели авиационной бортовой сети как стохастического управляемого объекта. Для управления безопасностью сетевых структур необходимо разработать уравнения и структурные схемы систем с использованием ме-

тодов теории марковских процессов и теории систем с переменной структурой. Рассмотрим типовую структуру и параметры авиационной бортовой сети с мобильными узлами.

II. Постановка задачи

На рис. 1 изображена схема авиационной бортовой сети для обмена данными по направлениям "борт – борт" и "борт – земля", в которую входят мобильные сетевые коммутационные узлы – маршрутизаторы или коммутаторы.

Реальные динамические системы, и, в частности, системы управления сетевой безопасностью имеют случайно изменяющиеся элементы, а процессы в них определяются уравнениями со случайными параметрами. Случайные изменения параметров являются медленными по сравнению

с временами процессов управления, протекающих в системе. Следовательно, эти изменения рассматриваются не как статические нелинейности, а как малые параметры возмущения. На малом интервале наблюдения изменения параметров также малы и с приемлемой для практики точностью аппроксимируются линейными функциями. Соответствующие системы классифицируются как линейные параметрические. Практически при анализе таких систем следует учитывать случайные изменения параметров в ансамбле однотипных систем. Структура уравнений, которыми описывается их состояние, одинакова для всех систем, а параметры систем рассматриваются как случайные величины, а не как случайные функции.

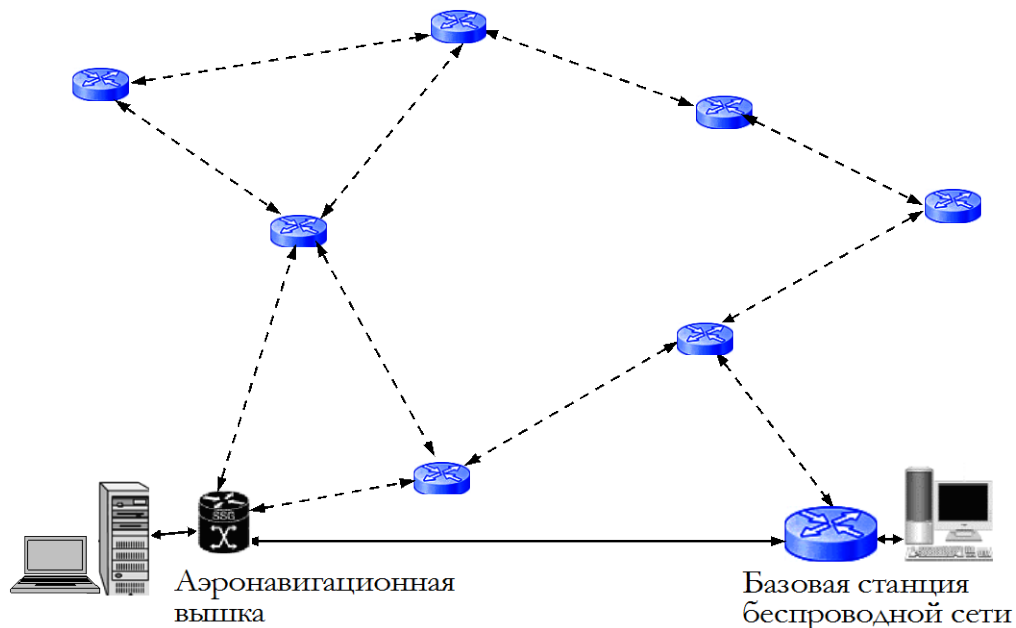


Рис. 1. Пример текущей структуры авиационной бортовой сети

Одной из основных проблем организации и функционирования авиационных бортовых сетей является обеспечение их безопасности и защиты информации, циркулирующей в сети. Поскольку авиационные бортовые сети в принципе могут быть только беспроводными, их уязвимость к несанкционированному доступу (вторжениям) является достаточно высокой. При этом угрозы могут быть как внешними, так и внутренними (например, от пассажиров, находящихся на борту воздушного судна (ВС) и получающих сервисную и медийную информацию через интерфейс общего доступа [4]).

Процесс изменения топологии и структуры бортовой авиационной сети представим в виде процесса "гибели и размножения". Событие появления нового сетевого узла рассматривается как размножение, выход узла из зоны покрытия

сети – как гибель. Кроме того, примем предположение о том, что вероятность одновременной смены двух и более узлов – величина второго порядка малости и здесь не рассматривается.

Следуя [5], применительно к задаче организации авиационной бортовой сети рассмотрим состояния и параметры входящих в нее сетевых узлов. Одно из состояний соответствует полному отсутствию узлов (самолетов в зоне аэроузла), а другие – функционированию с разным их количеством. Перенумеровав все структуры в возможной последовательности от отсутствия элементов сети к состоянию максимального разрешенного их количества в зоне аэроузла, получим конечное число N возможных структур. Переход системы из одного состояния в любое другое характеризуется соответствующими вероятностями. Можно показать [5], что этот процесс является марков-

ким с конечным числом состояний. Переходные вероятности не зависят от поведения системы до момента времени t и определяются только вероятностью состояния системы и длительностью интервала Δt – величины второго порядка малости.

Таким образом, получаем систему с переменной структурой или мультиструктурную систему, математическая модель которой описывается марковским процессом гибели и размножения [6]. Без какой-либо потери общности описания примем $0 \leq N \leq 7$, т.е. общее число элементов сети в моменты времени t_i может меняться от нуля (отсутствие самолетов в зоне аэроузла) до 7 (максимально разрешенное количество самолетов в зоне аэроузла). При переходе из состояния j в состояние $j \pm 1$ конфигурация сети меняется

соответствующим образом с интенсивностью реконфигурации, равной μ_p . При этом считается, что вероятность перехода из состояния j в состояние $j \pm m$, $m \geq 1$ есть величина второго порядка малости.

Руководствуясь приведенными выше соображениями, построим математическую модель системы управления безопасностью сети.

III. Разработка математической модели системы управления безопасностью авиационной бортовой сети с переменной структурой

На рис. 2. изображена схема модели гибели и размножения.

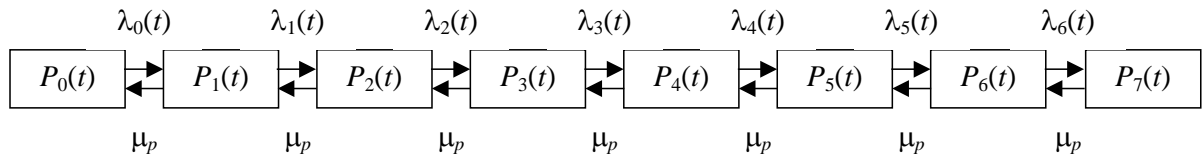


Рис. 2. Модель процесса функционирования авиационной бортовой сети. λ_i , $i = \overline{0,7}$ – интенсивности переходов; μ_p – интенсивность реконфигурации сети при изменении ее параметров.

Вероятности нахождения сети в определенном j -м состоянии P_{kj} в рамках модели гибели и размножения определяются из уравнений Колмогорова-Чепмена [6] с учетом условия нормировки $\sum_{k=0}^{N-1} P_k(t) = 1$:

$$\begin{cases} -P_0(t)7\lambda_d + P_1(t)\mu_p = 0; \\ P_0(t)7\lambda_d - P_1(t)(\mu_p + 6\lambda_d) + P_2(t)\mu_p = 0; \\ P_1(t)6\lambda_d - P_2(t)(\mu_p + 5\lambda_d) + P_3(t)\mu_p = 0; \\ P_2(t)5\lambda_d - P_3(t)(\mu_p + 4\lambda_d) + P_4(t)\mu_p = 0; \\ P_3(t)4\lambda_d - P_4(t)(\mu_p + 3\lambda_d) + P_5(t)\mu_p = 0; \\ P_4(t)3\lambda_d - P_5(t)(\mu_p + 2\lambda_d) + P_6(t)\mu_p = 0; \\ P_5(t)2\lambda_d - P_6(t)(\mu_p + \lambda_d) + P_7(t)\mu_p = 0; \\ P_6(t)\lambda_d - P_7(t)\mu_p = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где λ_d – интенсивность отключения того или иного элемента сети по какой-либо причине (ослабление сигнала при удалении самолета от зоны покрытия, появление помех данному абоненту и пр.).

Принципиальным отличием системы уравнений (1) от уравнений обычной модели гибели и размножения является нестационарность вероятностей перехода $P_i(t)$ на интервале наблюде-

ния. Решение в замкнутой форме для такой системы невозможно получить в принципе, поэтому необходимо применять приближенные (численные) методы анализа. Для каждого типа структуры сети, интенсивности отключения сетевого элемента и заданного критерия связности базовой станции беспроводной сети с этим элементом $l_{wn} \geq l_{qos}$ ($l_{wn} \geq 1$ или $l_{wn} \geq 2$) проводится расчет коэффициента защищенности элемента, которым характеризуется вероятность его нахождения в состоянии с заданным числовым показателем качества сервиса l_{qos} .

В мультиструктурной системе с матричными функциями поглощения и восстановления реализаций $\mathbf{v}(t)$ типа стохастических матриц [7,8] вероятности состояния $p_i(t)$ определяются из уравнения типа (2.3) независимо от решения уравнений для выходных переменных состояния. Эти функции определяются из уравнений

$$\begin{aligned} p'_l(t) &= p_l(t) \sum_{r=1}^N v_{lr}(t) + \sum_{r=1}^N p_r(t) v_{rl}(t), \\ p_l(t_0) &= p_{l0}, \quad l = \overline{1, N} \end{aligned} \quad (2)$$

Вероятности состояния системы определяются только матрицами потоков поглощения и

восстановления $\mathbf{v}(t)$, не зависящей от состояний системы. Если все интенсивности переходов на интервале наблюдения постоянны ($\nu_{lr} = \text{const}$, $\nu_{rl} = \text{const}$), то решение уравнений (3.12) есть разрешение полной проблемы собственных значений [6]. Оно полностью определяется начальными условиями и корнями характеристического уравнения

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 + \sum_{r=1}^N \nu_{1r} & -\nu_{21} & \cdots & -\nu_{N1} \\ -\nu_{12} & \lambda_2 + \sum_{r=1}^N \nu_{2r} & \cdots & -\nu_{N2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\nu_{1N} & -\nu_{2N} & \cdots & \lambda_N + \sum_{r=1}^N \nu_{Nr} \end{pmatrix} = 0. \quad (3)$$

Для нестационарного случая ($\nu_{lr}(t) = \text{var}$, $\nu_{rl}(t) = \text{var}$) матрица в левой части уравнения (3) является несимметричной. Однако и в этом случае численное решение уравнения (3) не представляет непреодолимых трудностей. Существуют хорошо разработанные методы вычисления собственных значений и собственных векторов несимметричной матрицы путем приведения ее к верхней почти треугольной форме Гессенберга и применения методов LR- или QR-итераций. В связи с нагнетанием вычислительных мощностей в сетевое коммутационное оборудование такая задача может решаться в реальном времени даже на пограничных узлах сетевого периметра.

Как следует из уравнения (2), система защиты как объект управления описывается уравнением N -го порядка. Из теории систем с переменной структурой [6] следует, что система является полностью управляемой, если для объекта управления, описываемого уравнением N -го порядка применяется управляющее устройство с $N-1$ звеном переменной структуры.

Уравнения системы реконфигурации сети имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} R(p)Y &= -k[U + X] + R(p)f; \\ U &= \sum_{j=1}^{N-1} u_j, \quad u_j = \frac{1}{2} [s_{21}^{(j)} Y_j + s_{12}^{(j)} |Y_j| \text{sgn } g]; \\ Y_j &= p^{j-1} Y, \quad g = Q(p)Y, \end{aligned} \right\} (4)$$

где

$$R(p) = \sum_{j=0}^N a_j p^j, \quad Q(p) = \sum_{j=1}^N c_j p^{j-1}, \\ s_{21}^{(j)} = l_{1j} + l_{2j}, \quad s_{12}^{(j)} = l_{1j} - l_{2j},$$

$X(t)$ – случайная помеха с параметрами, в общем случае зависящими от времени: средним значением $m_x(t)$ и спектральной плотностью $s_x(\omega, t)$; $f(t)$ – детерминированная функция управления; p – оператор Лапласа. Звенья управления представляют собой переключатели на ту или иную структуру, наиболее эффективную в текущий момент. Переключение осуществляется при смене знака управляющего сигнала.

Для получения асимптотических оценок эффективности системы управления защитой сети целесообразно использовать метод гауссовой аппроксимации функции распределения координат в пространстве состояний. Правомерность такого подхода, как отмечалось выше, обуславливается нормализацией процессов, протекающих в сложных системах. Тогда можно применять статистическую линеаризацию нелинейностей u_i , которая заключается в следующем.

Предполагается, что в малой ε -окрестности изображающей точки распределение вероятности фазовых координат можно аппроксимировать гауссовским распределением. Тогда, разложив вектор состояния (фазовых координат) Y , в ряд Тейлора с удержанием первых двух членов, достаточно составить уравнения для вектора математических ожиданий и корреляционной матрицы фазовых координат системы.

Для рассматриваемого случая вектор Y системы защиты заменяется его математическим ожиданием m_1 , вычисленным путем статистического усреднения в ε -окрестности, а элементы векторов u и X – произведения их математических ожиданий на соответствующие элементы корреляционной матрицы:

$$\left. \begin{aligned} R(p)m_1 &= -\frac{k}{2} \sum_{j=1}^{n-1} [s_{21}^{(j)} m_j + s_{22}^{(j)} \varphi_{0j}] + R(p)f; \\ m_g &= Q(p)m_1, \quad m_j = p^{j-1} m_1, \end{aligned} \right\} (5)$$

где φ_{0j} – коэффициенты разложения векторов Y_{0j} , описываемых уравнением (3.16), в виде линеаризованной зависимости $\varphi_j(Y_1, Y_2) = \varphi_{0j} + k_1 Y_{01} + k_2 Y_{02}$; коэффициенты k_1 и k_2 выбираются, исходя из условия нормировки по переменным состояния системы.

IV. Выводы. В соответствии с поставленной целью работы получены уравнения и структурные схемы систем управления безопасностью

сетевых структур. Для достижения поставленной цели применен математический аппарат методов теории марковских процессов и теории систем с переменной структурой.

Специфика авиационных бортовых сетей заключается в непрерывном изменении структуры и состава пользователей сети и в повышенных требованиях к защите от внешних и внутренних воздействий. Для реализации различных сценариев эволюции мобильных сетевых структур в условиях не только параметрической и структурной неопределенности, но и неопределенности целей конфликта целесообразно использовать наиболее универсальные методы статистического описания исходных данных и собственно процессов противоборства. В то же время необходимо получать решения в замкнутой форме – в виде систем функциональных уравнений, алгоритмов и схем, асимптотических оценок. Универсальным аппаратом для решения этих задач служит теория марковских процессов, в частности, процессов гибели и размножения, которыми с достаточной для практики адекватностью и точностью описываются процессы развития конфликта.

Нелинейности в переключаемых ячейках целесообразно аппроксимировать методом статистической линеаризации. Правомерность такого подхода обусловлена эффектами нормализации в сложных динамических системах и статистической устойчивости вероятностных распределений суммарных потоков входных воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Future Aeronautical Communications / Edited by Simon Plass. - Institute of Communications and Navigation, German Aerospace Center (DLR), Germany. – Published by InTech Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia. – InTech, 2011. – 378 pp.
- [2]. Виноградов Н.А., Дрововозов В.И., Лесная Н.Н., Зембицкая А.С. Анализ нагрузки на сети передачи данных в системах критичного применения // «Зв'язок». - 2006. - №1. – С.9-12.
- [3]. С.В. Водопьянов, В.И. Дрововозов, Е.В. Толстикова – защита авиационных бортовых сетей от атак методами теории конфликта с применением медовых ловушек/ Захист інформації, Том 17, №3 липень-вересень 2015р., С.255-263.
- [4]. Mohd. Junedul Haque. An Approach for Intrusion Detection using HoneyPots to Improve Network Security // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology

(IJRASET). - Volume 3 Issue IV, April 2015. - pp. 1029 - 1033.

- [5]. Виноградов Н. А., Данилина Г. В., Домарев Д. В., Милокум Я. В. Управление псевдосервисами в защищенных информационных системах на основе теории конфликта // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2014. – №6(34). – С.5 - 12.
- [6]. Казаков И.Е. Статистическая динамика систем с переменной структурой / И.Е. Казаков – М.: Наука, 1977. – 416 с.
- [7]. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц / Гантмахер Ф.Р.– М.: Наука, 1966. – 576 с.
- [8]. Ланкастер П. Теория матриц / П. Ланкастер. – М.: Наука, 1978. – 280 с.

REFERENCES

- [1]. Future Aeronautical Communications / Edited by Simon Plass. - Institute of Communications and Navigation, German Aerospace Center (DLR), Germany. – Published by InTech Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia. – InTech, 2011., 378 p.
- [2]. Nick A. Vinogradov, Vlad I. Drovovozov, Nathalie N. Lesnaya, Aline S. Zembitskaya. The Analysis of Load on Data Transfer Networks in the Systems of Critical Application // «Telecommunications». - 2006. - №1., pp. 9-12.
- [3]. Sergey V. Vodop'yanov, Vlad I. Drovovozov, Elena V. Tolstikova – защита авиационных бортовых сетей от атак методами теории конфликта с применением медовых ловушек (Захист інформації, Том 17, №3 липень-вересень 2015р., С.255-263). The protection of airborne nETworks from attacks by the methods of conflict theory with application honeypots)
- [4]. Mohd. Junedul Haque. An Approach for Intrusion Detection using HoneyPots to Improve Network Security // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). - Volume 3 Issue IV, April 2015., pp. 1029 - 1033.
- [5]. Nick A. Vinogradov, Gallina V. Danilina, Dmitriy V. Domarev, Jana V. Milokum Control pseudo-services in protected information systems on the basis of conflict theory //Scientific notes of Ukrainian scientific and research institute of telecommunication. – 2014. – №6(34)., pp. 5 - 12.
- [6]. Igor Je. Kazakov. Statistic Dynamics of Structure-variable Systems / Казаков И.Е. Статистическая динамика систем с переменной структурой / Igor Je. Kazakov – Moscow, Science publ., 1977. – 576 с.
- [7]. Felix. R Gantmakher. Matrix Theory. / – Moscow, Science publ., 1966, 576 p.
- [8]. Peter Lancaster. Matrix Theory. / – Moscow, Science publ., 1978, 280 p.

УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ БОРТОВОЇ ЛОКАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ В ІНФОРМАЦІЙНО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНІЙ СИСТЕМІ АЕРОВУЗЛА

Проблема стійкості функціонування авіаційних бортових мереж в зоні аеровузла стоїть особливо гостро у зв'язку з необхідністю безумовного забезпечення безпеки польотів, виключення льотних подій і передумов до них. Ця проблема посилюється через безперервну зміну структури мережі – одні літаки як мережні елементи входять в зону відповідальності аеровузла, інші виходять. Цей процес є істотно нестационарним. Для забезпечення безпеки мережі за наявності зовнішніх і внутрішніх дій, що заважають, необхідно не просто підвищувати енергетичні і інформаційні ресурси, а застосовувати оптимальні методи управління реконфігурацією мережі. У роботі запропоновані математичні моделі марковських процесів загибелі і розмноження з нестационарною вірогідністю переходу, якій описується поточний стан локальної авіаційної бортової мережі аеровузла. Виїдена система рівнянь Колмогорова – Чепмена для нестационарної вірогідності стану мережі. Застосований метод гауссової апроксимації розподілу координат системи в просторі станів.

Ключові слова: авіаційна бортова мережа, рівняння Колмогорова – Чепмена, марківський процес, процес загибелі і розмноження.

THE CONTROL SAFETY OF AIRBORNE LOCAL NETWORK IN THE INFORMATION AND CALCULATING SYSTEM OF AIR CLUSTER

The problem of stability of functioning of aviation airborne networks in the area of air cluster stands especially sharply in connection with the necessity of the absolute providing of safety of flights, exception of flying incidents and pre-conditions to them. This problem is aggravated from the continuous change of network structure are one airplanes as network elements are included in the area of responsibility of air cluster, other go out. This process is substantially non-stationary. For providing of safety of network at presence of external and internal preventing influences it is necessary not simply to promote power and information resources, but apply the optimum methods of control of reconfiguration of network. The mathematical models of Markov birth and death processes with non-stationary probabilities of transition are offered in work, which current status of local aviation airborne network of air cluster is described. The system of the Kolmogorov – Chapman equations for non-stationary probabilities of the state of network is eaten away. The method of Gaussian approximation of distributing of co-ordinates of the system in state space is applied.

Keywords: aviation airborne network, the Kolmogorov – Chapman equations, Markov process, birth and death process.

Водопьянов Сергей Вячеславович, соискатель, кафедра компьютерных систем и сетей Учебно-научного института Компьютерных информационных технологий Национального авиационного университета.

E-mail: s.vodopianov@abris-print.com

Водоп'янов Сергій Вячеславович, здобувач, кафедра комп'ютерних систем та мереж Навчально-наукового інституту Комп'ютерних інформаційних технологій Національного авіаційного університету.

Vodopianov Sergey, applicant, of the computer systems and network department of educational and research institute of computer information technologies of National Aviation University (Kyiv, Ukraine).

Харлай Людмила Алексеевна, соискатель, кафедра компьютерных систем и сетей Учебно-научного института Компьютерных информационных технологий Национального авиационного университета.

Харлай Людмила Олексіївна, здобувач, кафедра комп'ютерних систем та мереж Навчально-наукового інституту Комп'ютерних інформаційних технологій Національного авіаційного університету.

Harlay Lydmila, applicant, of the computer systems and network department of educational and research institute of computer information technologies of National Aviation University (Kyiv, Ukraine).

Толстикова Елена Владимировна, доцент кафедры прикладной информатики Учебно-научного института Компьютерных информационных технологий Национального авиационного университета.

E-mail: tolstikova_alena@mail.ru

Толстікова Олена Володимирівна, доцент кафедри прикладної інформатики Навчально-наукового інституту Комп'ютерних інформаційних технологій Національного авіаційного університету.

Tolstikova Elena, associate professor of the applied informatics department of educational and research institute of computer information technologies of National Aviation University (Kyiv, Ukraine).

Боровик Владимир Николаевич, доцент кафедры прикладной информатики Учебно-научного института Компьютерных информационных технологий Национального авиационного университета.

E-mail: vborovik@ukr.net

Боровик Володимир Миколайович, доцент кафедри прикладної інформатики Навчально-наукового інституту Комп'ютерних інформаційних технологій Національного авіаційного університету.

Borovik Vladimir, associate professor of the applied informatics department of educational and research institute of computer information technologies of National Aviation University (Kyiv, Ukraine).