

УДК 656.7.084.17(08)

**И. М. УСТИМЕНКО**

**ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» «Аэронавигация Центральной Сибири»,  
Красноярск, Россия**

## **ИНФОРМАЦИОННО-КИБЕРНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ АЭРОНАВИГАЦИОННЫХ СТРУКТУР**

*Ориентируясь на сформулированные ИКАО признаки так называемой безопасной организации, предложен информационно-кибернетический подход к проактивному исследованию эффективности коммуникаций в аэронавигационных структурах. Оценена официальная топология функциональной организации службы движения Красноярского центра обслуживания воздушного движения, представленной в виде информационных цепей и электрических схем, совместимых с его целями, характеристиками актуальной окружающей среды и отображающих существующую организацию связей для обмена управляющей информацией между ее составными, активными элементами с учетом соответствующей степени сложности, стандартизированных процедур, централизованного принятия решений. Возможности системы и ограничения на реализацию намеченных целей и основных направлений ее развития оценены информационными напряжениями, информационными сопротивлениями, силами информационных токов.*

**Ключевые слова:** безопасность аэронавигационных систем, информационные цепи систем управления, служба движения, источники управляющей информации, стратифицированная форма представления структур.

### **Постановка проблемы**

Единая система (ЕС) организации воздушного движения (ВД) Российской Федерации (РФ) – важная составляющая транспортного комплекса страны, обеспечивающая государственное регулирование использования воздушного пространства (ВП), безопасность и регулярность полетов воздушных судов (ВС). Аэронавигационная система (АНС) РФ – крупнейшая в мире: ВП страны охватывает 26 млн. кв. км; протяженность воздушных маршрутов составляет 532 тыс. км, из них 150 тыс. км – международные воздушные трассы. В ВП РФ ежегодно выполняется более 1 млн. полетов. Увеличение интенсивности полетов (только в 2013 г. – более чем в 2 раза) требуют соответствующего технического обеспечения, введения в эксплуатацию принципиально новых технологий, бортовых, наземных и космических средств и систем аэронавигации. При этом основополагающей стратегией развития отрасли является Концепция создания и развития АНС с максимальным исключением стагнации показателей безопасности полетов (БП) и их экономичности, а также дальнейшее совершенствование существующей системы.

Изложенное определяет объектом стратегических преобразований в АНС РФ уже не отдельные процессы, а всю архитектуру организации, от выбора которой существенно зависит результативность и эффективность всей системы. В настоящее время в

рамках международных договоренностей реализуются мероприятия по укрупнению центров ЕС организации ВД (ОрВД), совершенствованию аэронавигационного обслуживания в районе аэродромов и на воздушных трассах, модернизации сети авиационной электросвязи и передачи данных.

В соответствии со Стандартами и Рекомендуемой практикой ИКАО в АНС внедряется система управления безопасностью ВД, где анализ состояния БП и разработка конкретных мероприятий по ее обеспечению должны осуществляться на системной основе. Поэтому каждый внедряемый элемент АНС должен рассматриваться с точки зрения влияния на БП как в виде отдельного элемента, так и в виде компонента более крупной целостной системы.

ИКАО разработала требования к безопасной организации [1]. В соответствии с ними любой институт управления в гражданской авиации (ГА), в том числе и АНС, как система должен иметь развитую структуру, разработанную с учетом [1-8]:

- соответствующего уровня сложности;
- стандартизированных процедур управления;
- централизованного принятия решений (ПР);
- совместимости с целями организации и характеристиками окружающей социальной среды.

Одним из путей достижения базовых требований ИКАО является гармонизация АНС, подразумевающая ее полную и всестороннюю проверку с точки зрения количественного и качественного сопоставления затраченных ресурсов с получаемым эффектом.

## 1. Анализ исследований и публикаций

Опираясь на категории и дефиниции системного анализа, в контексте наших исследований АНС:

а) под *системой* в соответствии с [9, 10] будем понимать упорядоченное некоторым образом множество элементов (подразделений, отделов, сотрудников и т.п.), взаимосвязанных между собой (в соответствии с должностными инструкциями, назначением рабочих мест (постов), особенностями организации деятельности, в т.ч. обособленными подразделениями и т. под.) и создающих некоторую общность, владеющую системным свойством эмерджентности [11];

б) под *структурой* же системы (организации) будем понимать совокупность элементов и связей между ними, определенных исходя из распределения функций и целей, поставленных перед системой [1, 9-14]. Поэтому одним из главных заданий структурного анализа является построение наглядной формальной модели, которая отображала бы существующую систему взаимодействия элементов, как между собой, так и с внешней средой;

в) под *сложностью* структуры управления будем понимать: во-первых, определение необходимого числа уровней управления; во-вторых, необходимость распределения труда и специализация по видам работ (структурные подразделения, отделы); в-третьих, степень распределения или централизации персонала; в-четвертых, степень автоматизации, облегчающей связь между уровнями управления.

Отличительной особенностью любой сложной, открытой активной системы является набор функций, необходимых и достаточных для ее реализации, а именно: связь, регистрация, передача информации, перемещение ее в пространстве; память, хранение информации, перенос ее во времени; расчет, обработка данных, получение новой информации; рассудок, разум; политика. АНС РФ содержит в себе весь набор этих функций и при этом является сложной, высокотехнологичной (*социотехнической*, ведь она в основном построена на связи «человек - машина»), открытой системой, то для исследования закономерностей ее функционирования и развития должен использоваться подход, при котором происходит постепенное накопление информации о системе на основе набора функций («ген» Ф. Е. Темникова), необходимого для системы данного класса, который возможно детализировать, представить в стратифицированной форме на каждом последующем уровне, с изучением каждой страты подсистемы, возможностью удаления, редактирования, добавления новых страт, но при условии сохранения концепции верхней страты [15]. С другой стороны, для разработки и анализа официальных авиационных структур могут быть применены методы диа-

лектической логики, математизированной на информационной основе к тем или иным конкретным системам. Причем позитивная черта такого подхода заключается в минимальном потребном объеме априорной информации о структуре системы (организации) в виде наличия связи и ее направленности.

Внутри системы осуществляется перманентное взаимодействие ее подсистем и элементов, поэтому особенностью коммуникативности при взаимодействии АНС со сложной средой является [16]: 1) система – это целостный комплекс взаимосвязанных элементов; 2) система образует особое единство со средой; 3) любая исследуемая система представляет собой элемент системы более высокого порядка; 4) элементы любой исследуемой системы выступают как системы более низкого порядка. Анализ научных источников [17-20 и др.] показывает, что применение методов теории систем и системного анализа в аэронавигационных системах позволяет существенно повысить уровень БП при обслуживании ВД (ОВД).

## 2. Постановка задачи исследований

При проведении проактивной оценки коммуникативной эффективности Красноярского центра ОВД [19, 20] выявлено, что нагрузка на руководителя полетов (РП) районного центра (РЦ ЕС ОрВД) на 36% превышает допустимый норматив и вплотную приближена к «коэффициенту неэффективности». Учитывая влияние ЧФ на БП [1, 7, 8], перманентно актуален поиск решений, позволяющих снизить интеллектуальную нагрузку на РП РЦ.

Следствием вышеизложенного является необходимость применения прикладной теории информации в целях дальнейшей адаптации и развития методов системного анализа для структурно-функционального исследования официальной топологии авиационных организаций. Суть ее заключается в следующем. На основе структурно-функциональной схемы подразделения предприятия составляется электрическая схема, в которой направление токов соответствует направлению движения информации между ее членами. Расчет электрических цепей производится путем записи системы линейных алгебраических уравнений, в которой неизвестными являются потенциалы в узлах цепи. В результате определяются потенциалы во всех узлах цепи, а также, при необходимости, токи во всех ветвях.

Таким образом, *целью* статьи является применение методов информационно-кибернетического анализа цепей управления в оценке эффективности функционирования социотехнических систем, таких как официальные авиационные структуры, а именно АСР, на примере Красноярского центра ОВД, для повышения безопасности его функционирования.

### 3. Анализ структурно-функциональной схемы Красноярского центра обслуживания воздушного движения

Эффективность достижения целей, поставленных перед организацией, существенным образом зависит от организации ее структуры, т.е. от характера соединения подструктур, исполнителей. При этом сама организация, как система управления,

независимо от составляющих ее элементов и от цели ее образования всегда, по существу, является системой передачи и переработки информации. Особенно это выражено в АНС, где информационные цепи представляют собой сложные, сильно разветвленные многоконтурные иерархические структуры.

Если рассматривать структурную схему Красноярского центра ОВД (рис. 1), то она, как иерархическая, коммуникационная система состоит как из от-

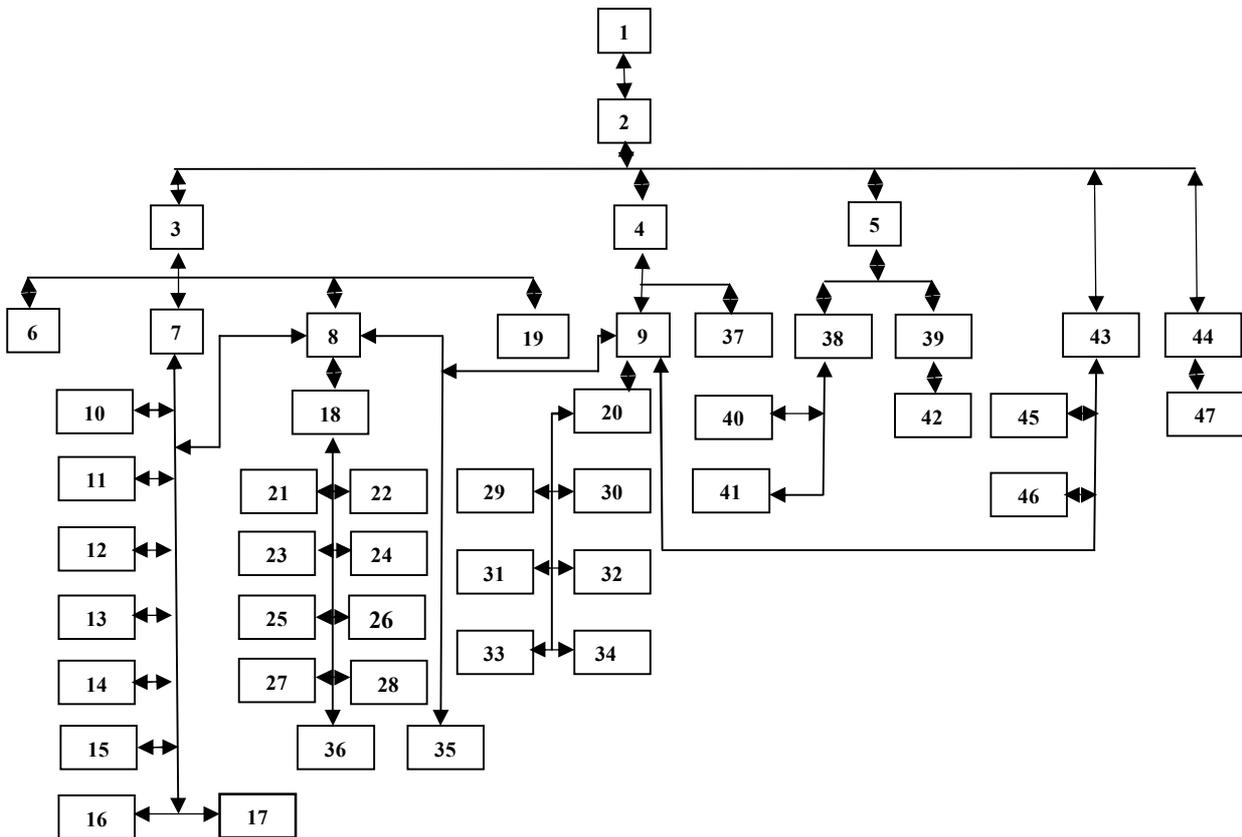


Рис. 1. Структурная схема Красноярского центра ОВД филиала «Аэронавигация Центральной Сибири» ФГУП «Госкорпорация по ОрВД»: 1 – начальник центра обслуживания воздушного движения; 2 - начальник службы движения (СД); 3 – начальник районного центра (РЦ); 4 – начальник аэродромного диспетчерского центра (АДЦ); 5 – начальник центра поддержания квалификации (ЦПК); 6 – специалист по аэронавигационной информации; 7 – заместитель начальника районного центра по планированию воздушного движения; 8 – руководитель полетов (РП) районного центра; 9 – руководитель полетов аэродромного диспетчерского центра; 10 – инженер-программист; 11 – ведущий специалист; 12 – штурман; 13 – старший специалист; 14 – старший специалист базы данных; 15 – специалист базы знаний; 16 – специалист по планированию полетов вне воздушных трасс; 17 – специалист по планированию полетов по воздушным трассам; 18 – старший диспетчер районного центра, осуществляющий непосредственное УВД; 19 – диспетчер-инструктор районного центра; 20 – старший диспетчер аэродромного диспетчерского центра, осуществляющий непосредственное УВД; 21 ÷ 28 – сектора районного центра; 29 – диспетчерский пункт (ДП) подхода; 30 – диспетчерский пункт круга; 31 – вспомогательный стартовый диспетчерский пункт; 32 – стартовый диспетчерский круг; 33 – пункт диспетчера старта – руления; 34 – диспетчерский пункт руления; 35 – командный диспетчерский пункт местных воздушных линий; 36 – местный диспетчерский пункт; 37 – диспетчер-инструктор аэродромного диспетчерского центра; 38 – старший диспетчер-инструктор тренажера; 39 – ведущий специалист английского языка; 40 – диспетчер-инструктор тренажера, осуществляющий непосредственное УВД; 41 – диспетчер-инструктор тренажера, не осуществляющий непосредственное УВД; 42 – специалист английского языка; 43 – специалист группы взаимодействия и планирования воздушного движения (ГВ и ПВД); 44 – диспетчер-инспектор по безопасности полетов; 45 - специалист аэропорта «Черемшinka»; 46 – специалист аэропорта «Емельяново»; 47 – техник по анализу средств объективного контроля

дельных исполнителей, так и из объединенных в группы и работающих на предписанных рабочих постах исполнителей. Исполнители имеют возможность производить обмен информацией либо непосредственно, либо через выделенный канал связи, обеспечивающий возможность взаимодействия в обоих направлениях в пределах системы. При этом руководящие органы верхнего и среднего звена имеют право абсолютно-го приоритета (непосредственного вмешательства) в деятельность исполнителей, вплоть до глубины самого нижнего уровня. Они так же выступают в качестве источников управляющей информации (информационной нагрузки) для исполнителей низшего уровня, которые в свою очередь обеспечивают обратный поток информации (в виде докладов, отчетов и т.д.) к верхним уровням системы и при этом сами служат источниками информационной нагрузки для исполнителей смежной, отдельной системы (систем). Примером изложенного служит передача информации диспетчерами управления ВД (УВД) экипажам ВС, ДП смежных зон, другим службам, обеспечивающим полеты ВС и контроль над ее исполнением (обработка результатов данных).

Таким образом, под *информационной цепью* понимается совокупность взаимодействующих источников, преобразователей и потребителей информации [12]. Так, элементарная информационная цепь состоит из одного *источника информации*, одного *потребителя информации* (информационной нагрузки) и связывающих их проводников информации (информационных каналов) (рис. 2). Такая информационная цепь всегда замкнута на источник или посредством каналов прямой и обратной связи или, если отсутствует один из них, посредством логических связей между источником и нагрузкой.



Рис. 2. Структура информационной цепи

Состояние окружающей систему материи характеризуется некоторой *неопределенностью*, или *энтропией*

$$H_0 = -\log P_0, \quad (1)$$

выступающей в роли информационного потенциала события с априорной вероятностью  $P_0$ . Целью и смыслом всякого управления является изменение в ту или иную сторону этой априорной вероятности события до некоторого нового значения  $P_{\text{усл.}}$ , кото-

рому соответствует новое значение потенциала

$$H_{\text{усл.}} = -\log P_{\text{усл.}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{усл.}}$  – вероятность управляемого события.

Итак, сущность управления, проводимого источником информации, может быть охарактеризована некоторым *информационным напряжением*

$$\Delta H = \log \frac{P_{\text{усл.}}}{P_0}. \quad (3)$$

В управленческой деятельности исследуемой системы ОВД, источником информации являются отдельные люди, коллективы людей и технические устройства. Так, РП, управляющий сменой диспетчеров, является источником управляющей информации, напряжение которого равно логарифму отношения вероятности успешной работы к вероятности успешной работы диспетчерской смены при отсутствии РП, а руководство службы ОВД I и II уровня является источником управляющей информации для уровней с III по VI включительно (рис. 3) [20]. Из выражения (3) так же следует, что информационное напряжение источника  $\Delta H$  может быть положительным, если его целью является увеличение вероятности события (например, повышение уровня БП при ОВД) и отрицательным, когда целью является снижение вероятности события (например, снижение вероятности ошибочных действий при ОВД, отказов радиотехнических средств, отсутствие необходимых указаний или информации, подлежащей использованию при УВД). В рассматриваемой по отношению к БП подсистеме АНС эти два аспекта конвергентны.  $H=0$  если напряжение источника равно нулю:

$$P_{\text{усл.}} = P_0, \quad (4)$$

то роль источника в управлении незначительна и он не имеет смысла, следовательно, его либо исключают из системы, либо на него возлагают часть функций другого источника управляющей информации имеющего большое информационное напряжение близкое к перегрузке.

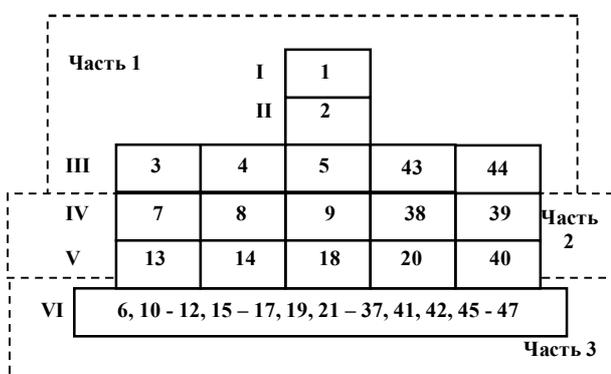


Рис. 3. Стратифицирование структурной схемы Красноярского центра обслуживания воздушного движения

Выданная источником информация, поступающая к исполнительным органам и системам, являющимися *информационной нагрузкой источника*, возвращается в источник в форме *информации обратной связи*. И если поставленная источником цель достигнута, то время соответствующего цикла (время реакции исполнительской системы на полученную от источника информацию – время исполнения) *является информационным сопротивлением*. Эта характеристика является единственной в случае, если исполнительная система не обладает ни привычками, ни памятью. Так, в системе управления службы движения, где распоряжения отдаются в устной форме непосредственно, по телефону, на бумажных носителях или посредством внутренней компьютерной сети, *информационное сопротивление системы исполнения равно времени исполнения* от момента, когда распоряжение сформулировано, до момента поступления доклада об его исполнении. При этом время, необходимое для ПР, для его доведения до исполнителя и для осмысленного доклада об исполнении, *является внутренним информационным сопротивлением источника информации*, обратным его пропускной способности  $I_{\text{макс}}$ . Таким образом, для системы без привычек и памяти (рис. 4), актуален информационный закон Ома

$$I = \frac{\Delta H}{\tau_{\text{и}}}, \quad (5)$$

где  $\tau_{\text{и}} = \tau - \tau_{\text{вт}}$  – информационное сопротивление нагрузки;  $\tau$  и  $\tau_{\text{вт}}$  – информационное сопротивление всей цепи и внутреннее сопротивление источника, соответственно;  $I$  – информационный ток в цепи нагрузки.

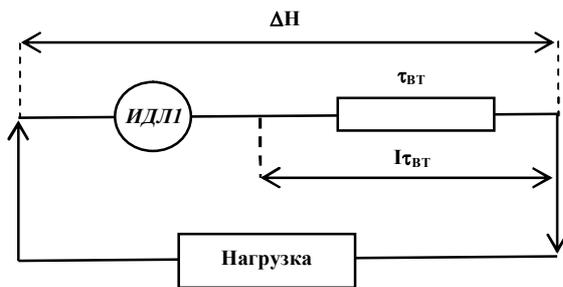


Рис. 4. Простейшая информационная сеть

Из (5) следует, что при достижении цели *однократно*, сквозь систему проходит информация  $J_{\text{ц}}$ , которая численно равна напряжению источника

$$\Delta H = I_{\text{ц}} = I\tau_{\text{и}}. \quad (6)$$

При длительной же работе системы в течение времени  $T$  сквозь нее протекает информация  $J$

$$J = \int_0^T I dt = \int_0^T \frac{\Delta H}{\tau} dt. \quad (7)$$

Примером может служить указание РП (источ-

ник управляющей информации) диспетчеру (исполнительный орган) производить промежуточные доклады о выполнении поставленной задачи и в этом процессе РП может вносить коррективы в выданную ранее управляющую информацию, например, для ее детализации. Поэтому эффективность источника управляющей информации напрямую зависит от скорости выдачи им управляющей информации при изменении состояния нагрузки, а запаздывание (задержка) формирования и выдачи информации непосредственно по причине самого источника, обесценивает выданную им управляющую информацию и выполняет функции внутреннего информационного сопротивления источника.

Если же РП вносит коррективы в выданную ранее управляющую информацию, выполнение которой лимитировано по времени (скажем, при стрессовых ситуациях вызванных возникновением особого случая в полете, при УВД), и при этом возникает постоянная задержка по каким-либо причинам, то вполне вероятно, что в определенный момент, при выдаче очередной порции информации, достижение поставленной цели исполнителем окажется не актуальным, т.е. напряжение такого источника упадет практически до нуля, и он окажется бесполезен. Хотя при рутинной ситуации, чисто теоретически, РП выдавал бы управляющую информацию без запаздываний и на «холостом ходу», при отсутствии стрессовых ситуаций, обладал бы достаточно высоким напряжением. Это напряжение источника, которым он обладает без учета внутреннего сопротивления (на «холостом ходу»), будем называть *информационно-движущей логикой источника* (ИДЛ).

При наличии нагрузки информационный ток  $I$  создает падение напряжения на внутреннем сопротивлении  $\tau_{\text{вт}}$  (рис. 4), которое снижает ИДЛ до рабочего напряжения на величину  $I\tau_{\text{вт}}$ , следовательно

$$\Delta H = h - I\tau_{\text{вт}}, \quad (8)$$

где  $h$  – ИДЛ источника.

Таким образом, чем больше времени у РП занимает процесс переработки информации и ПР, тем меньше его напряжение по сравнению с ИДЛ, следовательно, тем меньше он способен изменить вероятность достижения цели управления диспетчерами.

Исследуемая система – СД Красноярского центра ОВД, рассматриваемая как онтологическая система низкого порядка АНС, в соответствии с распределением основных функций по подразделениям организационной структуры стратифицирована, по принципу актуальной иерархичности (рис. 3). При этом номера страт соответствуют номерам сотрудников (отделов, подразделений), а уровни управления обозначены римскими цифрами.

Сотрудники, относящиеся к уровням I, II и III являются *группой долгосрочного, стратегического*

планирования и управления (Ч. 1, рис. 3). В эту группу входят: начальник центра ОВД, начальник СД, начальник районного центра, начальник аэродромного диспетчерского центра, начальник ЦПК, старший специалист группы взаимодействия и планирования, инспектор по БП. Участники этой группы принимают весьма важные, ответственные, но относительно не частые решения. Это в основном обусловлено тем, что на стратегическое планирование отводится достаточно времени, следствием чего являются малые информационные токи и несущественные потери напряжения  $I_{\tau_{вт}}$ , даже при значительных внутренних сопротивлениях  $\tau_{вт}$ , которые характеризуют только быстроту соображения человека. У участников верхних уровней управления быстрота мышления не играет существенной роли, а высокая вероятность достижения цели обеспечивается только талантом и опытом индивида, т.е. ИДЛ.

$$\Delta H \approx h \quad \text{и} \quad P_{\text{усл}} \approx Ph. \quad (9)$$

Сотрудники, относящиеся к уровням IV и V являются группой предтактического планирования и управления (Ч. 2, рис. 3). Эту группу составляют: заместитель начальника РЦ по планированию ВД, РП районного центра, РП АДЦ, старший специалист базы данных, старший диспетчер районного центра, старший диспетчер АДЦ, ведущий специалист английского языка и старший диспетчер-инструктор тренажера. Участники данной группы также принимают важные, ответственные решения, но значительно чаще. При этом на планирование у них отводится значительно меньше времени, что увеличивает информационные токи и потери напряжения  $I_{\tau_{вт}}$ .

И наконец, сотрудники, относящиеся к VI уровню (Ч. 3, рис. 3), являются группой тактического или оперативного планирования и управления. Они часто ПР, причем зачастую в очень ограниченное время. Это люди решительные, с хорошей реакцией, обладающие низким информационным сопротивлением, способные при ограниченных значениях информационных токов обеспечить успешное оперативное управление. При этом сотрудники уровня III являются связующим звеном между сотрудниками Ч. 1 и Ч. 2, а сотрудники уровня V являются связующим звеном между сотрудниками Ч. 2 и Ч. 3.

Схематически непосредственный обмен управляющей информацией в исследуемой системе при длительной ее работе можно представить в виде многозвенного программного реле времени, определяющего цикличность работы системы (рис. 5).

Движение управляющей информации (информационного тока) I, по спирали от центра к периферии между уровнями системы (источниками управляющей информации) и группами стратегического, предтактического и тактического планирования и управления отражает увеличение внутреннего ин-

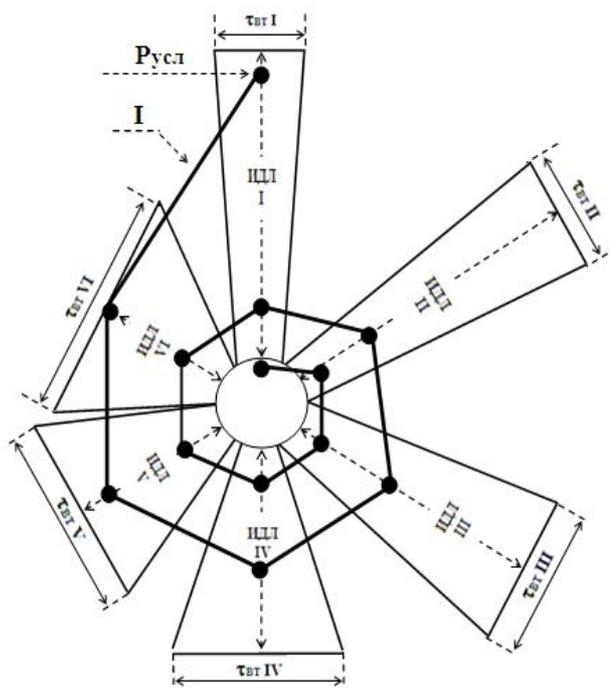


Рис. 5. Обмен управляющей информацией в системе

формационного сопротивления и падение напряжения  $\Delta H$  в каждом источнике в зависимости от его уровня положения в системе, при нарастании степени детализации и корректировки управляющей информации для увеличения вероятности достижения цели  $P_{\text{усл}}$  при условии, что участники системы обладают ИДЛ, соответствующей их положению на ступенях управленческой иерархии. При этом следует отметить, что высокая вероятность достижения цели  $P_{\text{усл}}$  возрастает, несмотря на то, что с увеличением информационной нагрузки внутреннее информационное сопротивление участников каждого уровня увеличивается, а ИДЛ вследствие падения напряжения на внутреннем сопротивлении снижается до рабочего уровня с каждым витком детализации управляющей информации, что в свою очередь обеспечивает балансировку всей системы. Ключевую роль играет то, каким образом, *параллельно* или *последовательно*, произведено соединение элементарных источников информации в системе, от чего напрямую зависит уровень их пропускной способности или ИДЛ, поскольку параллельное соединение увеличивает пропускную способность, а последовательное - ИДЛ.

Применим метод информационных цепей для исследования структурной схемы Красноярского центра ОВД (рис. 1). Каждый член схемы (отдельный исполнитель или исполнители, объединенные в группы) является одновременно приемником и источником информации, обменивается информацией практически с каждым из остальных членов, образуя

при этом сложное переплетение информационных связей. При этом уже из визуального анализа коммуникационной структуры схемы вытекает, что все исполнители (рабочие посты) являются связанными, из чего следует отсутствие фактора изолированности рабочих постов [19, 20]. Для упрощения задачи, дальнейший анализ структурной схемы будет проводиться по частям, в которые объединены источники, выполняющие однородные задачи и функции.

Часть 1 - группа долгосрочного, но стратегического планирования и управления. Элементы этой части соединены по комбинированной схеме: *параллельно* и *последовательно*. Последовательное соединение присутствует между источниками 1 и 2 (рис. 6), с целью увеличения ИДЛ и, как следствие, вероятности достижения цели  $P_{усл.}$ . Через эти источники протекает один и тот же информационный ток  $I$ , а их общее информационное напряжение равно сумме напряжений отдельных источников

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2. \quad (10)$$

Помимо всего прочего, источник 1 (начальник центра ОВД) управляет и иными сферами жизни Центра ОВД (бытовая, экономическая, охрана труда, воспитание коллектива). В его отсутствии эти функции управления осуществляет источник 2 (начальник службы движения). Они работают в непосредственном контакте друг с другом (практически являются взаимозаменяемыми единицами) и решения, подготовленные одним из них, согласовываются, так как по отношению к каждой нагрузке они соединены попарно последовательно (рис. 6).

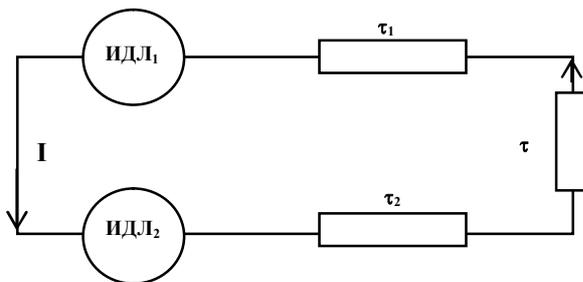


Рис. 6. Планарная электрическая схема соединения источников 1 и 2 группы стратегического планирования управления.

Однако их последовательное соединение приводит к увеличению суммарного внутреннего сопротивления  $\tau_{вт} = \tau_1 + \tau_2$ . Поэтому обязательно принимается, что суммарная задержка ПР в каждом источнике должна быть значительно меньше информационного сопротивления общей нагрузки  $\tau$  (время реакции исполнительного органа), то есть  $\tau \gg \tau_{вт}$ . В противном случае последовательное соединение этих источников неэффективно, так как информационный ток не увеличится [12]. По отношению к дру-

гим участникам группы долгосрочного, стратегического планирования и управления источник 2 (начальник службы движения) соединен параллельно.

Источники 3 (начальник РЦ), 4 (начальник АДЦ), 5 (начальник ЦПК), 43 (специалист ГВ и ПВД), 44 (диспетчер-инспектор по БП) параллельно обеспечивают выполнение различных частей единой общей цели для службы движения, работают как параллельные источники управляющей информации на одну нагрузку (рис. 7). Это должно способствовать сокращению выработки ими управляющих решений из-за значительного снижения их внутренне-го сопротивления.

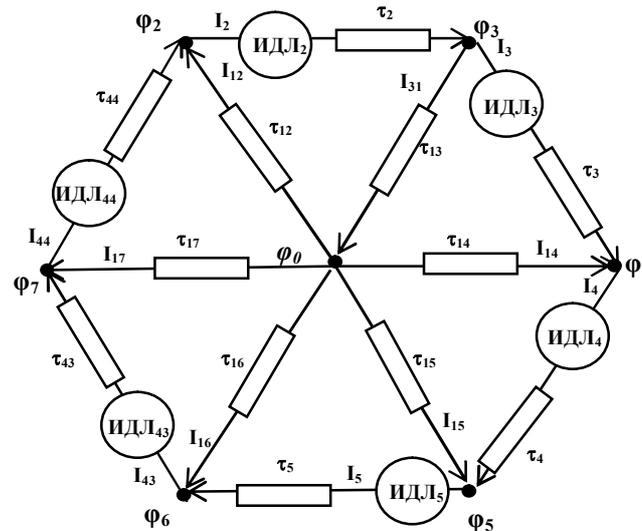


Рис. 7. Планарная эквивалентная электрическая схема соединения источников 2, 3, 4, 5, 43, 44 группы стратегического планирования управления

Для определения токов в планарной эквивалентной электрической схеме соединения источников 2, 3, 4, 5, 43, 44 группы стратегического планирования управления применим один из основных и широко используемых на практике методов – метод узловых потенциалов (узловых напряжений) [21, 22]. Данный метод позволяет так формализовать правила Кирхгофа и закон Ома, чтобы их можно было применить к любой электрической цепи. В результате применения метода определяются потенциалы  $\phi_i$  во всех узлах цепи и токи во всех звеньях.

Любая электрическая цепь, состоящая из  $P$  ребер (ветвей, участков, звеньев) и  $Y$  узлов, может быть описана системой уравнений в соответствии с 1-м и 2-м законами Кирхгофа. Поскольку независимыми переменными в цепи считаются токи ребер, а по формуле Эйлера, для плоского графа число узлов, ребер и независимых контуров связаны соотношением  $Y - P + K = 1$  или  $P = Y + K - 1$ , то число уравнений Кирхгофа равно числу переменных и система разрешима. *Метод узловых потенциалов*

способствует сокращению избыточного числа уравнений в системе Кирхгофа. Уравнения записываются для всех узлов, кроме базового. При этом уравнения для контуров в системе не составляются.

Итак, *узел* – это любое пересечение или разветвление проводников информации, и условимся, что обозначенные на рис. 8 направления токов в ветвях (*ветвь* – последовательное соединение элементов между двумя ближайшими узлами), являются положительными, если они направлены к узлу, и отрицательными, если они направлены от него.

В матричном виде система уравнений для метода узловых потенциалов имеет такой вид [22]:

$$A \cdot Y \cdot A^T \cdot U_0 = A \cdot (J + Y \cdot E), \quad (11)$$

где  $A$  – матрица соединений размера  $(q-1) \times r$  ( $q$  – количество узлов,  $r$  – количество ребер), в которой

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$i$ -я строка соответствует узлу  $i$ , а  $j$ -й столбец соответствует ребру  $j$ , причем элемент  $A_{ij}=0$ , если ребро  $j$  не присоединено к узлу  $i$ ; и  $A_{ij}=1$ , если ребро выходит из узла; если ребро входит в узел, то  $A_{ij}=-1$ ;  $Y$  – диагональная матрица проводимостей размера  $r \times r$ , в которой диагональный элемент  $Y_{ii}$  равен проводимости  $i$ -го ребра, а недиагональные элементы равны нулю;  $A^T$  – транспонированная матрица соединений;  $U_0$  – матрица-столбец узловых потенциалов;  $J$  – матрица-столбец источников тока, где каждый элемент равен току соответствующего источника;  $E$  – матрица-столбец источников ЭДС, где каждый элемент равен ЭДС соответствующего источника.

Для рассматриваемой схемы базисным принимаем узел № 0 (рис. 7.), тогда матрицы имеют вид:

$$U_0 = \begin{pmatrix} \Phi_2 \\ \Phi_3 \\ \vdots \\ \Phi_7 \end{pmatrix}; \quad A^T = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$Y = \begin{pmatrix} Y_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{12} \end{pmatrix}; \quad J = \begin{pmatrix} J_2 \\ J_3 \\ J_4 \\ J_5 \\ J_{42} \\ J_{44} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad E = \begin{pmatrix} E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \\ E_{42} \\ E_{44} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Перемножаем полученные матрицы в соответствии с матричным уравнением (11):

$$AY = \begin{pmatrix} -Y_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_6 & Y_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Y_1 & -Y_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Y_8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_2 & -Y_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_3 & -Y_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_4 & -Y_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_5 & -Y_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{12} \end{pmatrix};$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{A}^T &= \begin{pmatrix} (Y_1 + Y_6 + Y_7) & -Y_1 & & & & & -Y_6 \\ -Y_1 & (Y_1 + Y_2 + Y_8) & -Y_2 & & & & \\ & Y_2 & (Y_2 + Y_3 + Y_9) & -Y_3 & & & \\ & & -Y_3 & (Y_3 + Y_4 + Y_{10}) & -Y_4 & & \\ & & & -Y_4 & (Y_4 + Y_5 + Y_{11}) & -Y_5 & \\ -Y_6 & & & & -Y_5 & (Y_5 + Y_6 + Y_{12}) & \end{pmatrix} \\
 \mathbf{A} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{U}_0 &= \begin{pmatrix} (Y_1 + Y_6 + Y_7) \cdot \varphi_2 - Y_1 \cdot \varphi_3 - Y_6 \cdot \varphi_6 \\ -Y_1 \cdot \varphi_2 + (Y_1 + Y_2 + Y_8) \cdot \varphi_3 - Y_2 \cdot \varphi_4 \\ -Y_2 \cdot \varphi_3 + (Y_2 + Y_3 + Y_9) \cdot \varphi_4 - Y_3 \cdot \varphi_5 \\ -Y_3 \cdot \varphi_4 + (Y_3 + Y_4 + Y_{10}) \cdot \varphi_5 - Y_4 \cdot \varphi_6 \\ -Y_4 \cdot \varphi_5 + (Y_4 + Y_5 + Y_{11}) \cdot \varphi_6 - Y_5 \cdot \varphi_7 \\ -Y_6 \cdot \varphi_2 - Y_5 \cdot \varphi_6 + (Y_5 + Y_6 + Y_{12}) \cdot \varphi_7 \end{pmatrix}; \\
 \mathbf{J} + \mathbf{Y}\mathbf{E} &= \begin{pmatrix} J_2 + Y_1 E_2 \\ J_3 + Y_2 E_3 \\ J_4 + Y_3 E_4 \\ J_5 + Y_4 E_5 \\ J_{42} + Y_5 E_{43} \\ J_{44} + Y_6 E_{44} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad -\mathbf{A}(\mathbf{J} + \mathbf{Y}\mathbf{E}) = \begin{pmatrix} J_2 + Y_1 E_2 - (J_{44} + Y_6 E_{44}) \\ J_2 - Y_1 E_2 + (J_3 + Y_2 E_3) \\ J_3 - Y_2 E_3 + (J_4 + Y_3 E_4) \\ J_4 - Y_3 E_4 + (J_5 + Y_4 E_5) \\ J_5 - Y_4 E_5 + (J_{43} + Y_5 E_{43}) \\ J_{43} - Y_5 E_{43} + (J_{44} + Y_6 E_{44}) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.
 \end{aligned}$$

Раскрывая матричную запись, получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases}
 (Y_1 + Y_6 + Y_7) \cdot \varphi_2 - Y_1 \cdot \varphi_3 - Y_6 \cdot \varphi_6 = J_2 + Y_1 E_2 - (J_{44} + Y_6 E_{44}) \\
 -Y_1 \cdot \varphi_2 + (Y_1 + Y_2 + Y_8) \cdot \varphi_3 - Y_2 \cdot \varphi_4 = J_2 - Y_1 E_2 + (J_3 + Y_2 E_3) \\
 -Y_2 \cdot \varphi_3 + (Y_2 + Y_3 + Y_9) \cdot \varphi_4 - Y_3 \cdot \varphi_5 = J_3 - Y_2 E_3 + (J_4 + Y_3 E_4) \\
 -Y_3 \cdot \varphi_4 + (Y_3 + Y_4 + Y_{10}) \cdot \varphi_5 - Y_4 \cdot \varphi_6 = J_4 - Y_3 E_4 + (J_5 + Y_4 E_5) \\
 -Y_4 \cdot \varphi_5 + (Y_4 + Y_5 + Y_{11}) \cdot \varphi_6 - Y_5 \cdot \varphi_7 = J_5 - Y_4 E_5 + (J_{43} + Y_5 E_{43}) \\
 -Y_6 \cdot \varphi_2 - Y_5 \cdot \varphi_6 + (Y_5 + Y_6 + Y_{12}) \cdot \varphi_7 = J_{43} - Y_5 E_{43} + (J_{44} + Y_6 E_{44})
 \end{cases}$$

Где проводимости ребер равны

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= \frac{1}{R_1}; & Y_2 &= \frac{1}{R_2}; & Y_3 &= \frac{1}{R_3}; & Y_4 &= \frac{1}{R_4}; \\
 Y_5 &= \frac{1}{R_5}; & Y_6 &= \frac{1}{R_6}; & Y_7 &= \frac{1}{R_7}; & Y_8 &= \frac{1}{R_8}; \\
 Y_9 &= \frac{1}{R_9}; & Y_{10} &= \frac{1}{R_{10}}; & Y_{11} &= \frac{1}{R_{11}}; & Y_{12} &= \frac{1}{R_{12}}.
 \end{aligned}$$

Таким образом, для схемы (рис. 8), собственные проводимости узлов равны:

$$\begin{aligned}
 \varphi_2 &= \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_{12}} + \frac{1}{\tau_{44}}; & \varphi_3 &= \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_{31}} + \frac{1}{\tau_3}; \\
 \varphi_4 &= \frac{1}{\tau_3} + \frac{1}{\tau_{14}} + \frac{1}{\tau_4}; & \varphi_4 &= \frac{1}{\tau_3} + \frac{1}{\tau_{14}} + \frac{1}{\tau_4}; \\
 \varphi_5 &= \frac{1}{\tau_4} + \frac{1}{\tau_{15}} + \frac{1}{\tau_5}; & \varphi_6 &= \frac{1}{\tau_5} + \frac{1}{\tau_{16}} + \frac{1}{\tau_{43}}; \\
 \varphi_7 &= \frac{1}{\tau_{43}} + \frac{1}{\tau_{17}} + \frac{1}{\tau_{44}}.
 \end{aligned}$$

Определим токи в ветвях схемы (рис. 7) по обобщенному закону Ома:

$$I_k = \frac{U_{n_0} - U_{k_0} + E_k}{R_k}; \quad (12)$$

$$I_2 = \frac{U_{23} - E_2}{\tau_2}; \quad I_{12} = \frac{U_{21}}{\tau_{12}};$$

$$I_3 = \frac{U_{34} - E_3}{\tau_3}; \quad I_{31} = -\frac{U_{31}}{\tau_{31}};$$

$$I_4 = \frac{U_{45} - E_4}{\tau_4}; \quad I_{14} = -\frac{U_{14}}{\tau_{14}};$$

$$I_5 = \frac{U_{56} - E_5}{\tau_5}; \quad I_{15} = -\frac{U_{15}}{\tau_{15}};$$

$$I_{43} = \frac{U_{43} - E_{43}}{\tau_{43}}; \quad I_{16} = -\frac{U_{16}}{\tau_{16}};$$

$$I_{44} = \frac{U_{44} - E_{44}}{\tau_{44}}; \quad I_{17} = -\frac{U_{17}}{\tau_{17}}.$$

Следует заметить, что метод узловых потенциалов применяется в эквивалентной схеме с ограничениями, существующими для применимости эквивалентных схем, т.е. подразумевается, что схема, к которой применяется метод узловых потенциалов, не содержит никаких реальных элементов с паразитными параметрами.

### Выводы

При исследовании группы стратегического планирования управления выявлено, что несмотря на равенство напряжений источников (ИДЛ) 2, 3, 4, 5, 43, 44 и практически одинаковые нагрузки в схеме, симметрии токов не наступает, поскольку она всегда нарушается каким-либо из источников схемы, что может привести к неуправляемости одной из сфер деятельности подразделения. Доказана применимость кибернетических информационных цепей постоянного тока для исследования сложных организационных структур.

Дальнейшие исследования необходимо проводить, ориентируясь уже на переменные информационные токи.

### Литература

1. Человеческий фактор в управлении и организации [Текст] : сб. материалов №10 – Циркуляр ИКАО 247-AN/148. – Монреаль, Канада, 1993. – 47 с.
2. Руководство по предотвращению авиационных происшествий [Текст]: док. ИКАО 9422 - AN / 923.- Монреаль, Канада, 1984. - 144 с.
3. Safety culture: Its importance in future risk management [Text] / В. Turner, N Pidgeon., D. Blockley, B. Toft // The Second World Bank Workshop on Safety Control and Risk Management, 1989, Karisted, Sweden.
4. Hal, H. Ergonomics in organization and man-

agement [Text] / Hendrick Hal // Ergonomics. – 1991. – Vol. 34, № 6. – P. 743-756.

5. Wood, R. H. Aviation Safety Programs [Text] / Richard H. Wood // A Management Handbook. IAP incorporated. – Casper, Wyoming, USA, 1991. – P. 24-32.

6. Рева, О. М. Вплив на безпеку польотів особливостей взаємодії елементів ергатичної системи “екіпаж (пілот) – повітряне судно – орган управління повітряним рухом” [Текст] / О. М. Рева, А. А. Бекмухамбетов, Г. М. Селезнев // Наукові праці академії. ДЛАНУ. – Кіровоград, 2002. – Вип. 6, Ч. 1. – С. 147-155.

7. Контроль факторов угрозы и ошибок (КЮО) при управлении воздушным движением [Текст] : Циркуляр ИКАО 314-AN/178. – Монреаль, Канада. – 2008. – 12 с.

8. Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП) [Текст]. – Изд-е второе. – Док. ИКАО AN/474. – Монреаль, Канада, 2009. – 18 с.

9. Нечипоренко, В. И. Структурный анализ систем (Эффективность и надежность) [Текст] / В. И. Нечипоренко. – М. : Сов. радио, 1977. – 216 с.

10. Надежность и эффективность в технике [Текст] : справ. в 10 т. Т.1. Методология. Организация. Терминология [Текст] / под ред. А. И. Рембезы. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.

11. Надежность и эффективность в технике [Текст] : справ. в 10 т. Т.3. Эффективность технических систем [Текст] / под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. – М. : Машиностроение, 1988. – 328 с.

12. Денисов, А. А. Теория больших систем управления [Текст] : учеб. пособие / А. А. Денисов, Д. Н. Колесников. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 238 с.

13. Шибанов, Г. П. Количественная оценка деятельности человека в системах “человек-техника” [Текст] / Г. П. Шибанов. – М. : Машиностроение, 1983. – 263 с.

14. Клир, Дж. Системология: Автоматизация решения системных задач [Текст] : пер. с англ. / под ред. А. И. Горлина. – М. : Радио и связь, 1990. – 544 с.

15. Волкова, В. Н. Из истории теории систем и системного анализа [Текст] / В. Н. Волкова. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2001. – 251 с.

16. Садовский, В. Н. Основания общей теории систем. Логико-методологический анализ [Текст] / В. Н. Садовский. – М. : Наука, 1974. – 280 с.

17. Рева, О. М. Показатели структурной эффективности организации диспетчерской смены как малой группы авиационных операторов [Текст] / О. М. Рева, С. Д. Кульнарзов // Перспективы развития гражданской авиации и подготовка высококвалифицированных кадров : сб. тр. 1-й Междун. конф. – Алматы, 18-22 сентября 2000 г. – Алматы : КазГУ, 2000. – Ч. I. – С. 83-92.

18. Оцінка ефективності структурної організації екіпажів повітряних суден як невеликих груп операторів [Текст] / О. М. Рева, С. А. Іванов, І. В. Коцарь, Я. В. Лішанков // Наукові праці акаде-

мії. ДЛАУ. – Кіровоград, 2000. – Вип. 5, Ч. 1. – С. 240-251.

19. Рева, О. М. Оцінка структурної ефективності служби руху (на прикладі Красноярського центру обслуговування повітряного руху) [Текст] / О. М. Рева, В. І. Вдовиченко, І. М. Устименко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2012. – № 10. – С. 176-186.

20. Рева, А. Н. Эффективность организации коммуникаций в системе аэронавигационного обслуживания полетов (на примере Красноярского цен-

тра обслуживания воздушного движения) / А. Н. Рева, И. М. Устименко, В. Н. Колтаков // *Авиационно-космична техніка і технологія*. – 2013. – № 7 (104). – С. 215-226.

21. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники [Текст] : учеб. для вузов. В 2-х т. – Т. 1 / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 536 с.

22. Батюков, С. В. Расчет линейных электрических цепей [Текст] : учеб. пособие / С. В. Батюков, Н. А. Иваницкая. – Минск : БГУИР, 2005. – 63 с.

*Поступила в редакцію 2.06.2014, рассмотрена на редколлегии 16.06.2014*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., Заслуженный деятель науки и техники Украины, заведующий кафедрой проектирования авиационных двигателей С. В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КІБЕРНЕТИЧНА МОДЕЛЬ ОРГАНІЗАЦІЙНИХ АЕРОНАВІГАЦІЙНИХ СТРУКТУР

*І. М. Устименко*

Орієнтуючись на сформульовані ІКАО ознаки так званої безпечної організації, запропоновано інформаційно-кібернетичний підхід до проактивного дослідження ефективності комунікацій в аеронавігаційних структурах. Оцінено офіційну топологію функціональної організації служби руху Красноярського центру обслуговування повітряного руху, що подана у вигляді інформаційних ланцюгів і електричних схем, сумісних з його цілями, характеристиками актуального навколишнього середовища і що відображають існуючу організацію зв'язків для обміну керуючою інформацією між її складовими, активними елементами з урахуванням відповідного ступеня складності, стандартизованих процедур, централізованого прийняття рішень. Можливості системи і обмеження на реалізацію намічених цілей і основних напрямів її розвитку оцінено інформаційною напругою, інформаційними опорами, силами інформаційних струмів.

**Ключові слова:** безпека аеронавігаційних систем, інформаційні ланцюги систем управління, служба руху, джерела керуючою інформації, стратифікована форма уявлення структур.

## INFORMATION CYBERNETIC MODEL OF ORGANIZATIONAL AIR NAVIGATION STRUCTURES

*I. M. Ustimenko*

Being guided by the signs of the so-called safe organization formulated by ICAO, information approach to proactive research of communications efficiency in aviation structures is suggested. The official topology of the functional organization of a traffic department of the Krasnoyarsk Air Traffic Service Center was investigated. It is presented in the form of information chains and electric circuits compatible with its purposes, actual environment characteristics and displaying the existing organization of communications between its compound active elements taking into account the corresponding degree of complexity, standardized procedures and centralized decision-making. System capabilities and restrictions on realization of the planned purposes and the main directions of its development are measured with information voltages, information resistivity, information current intensity.

**Keywords:** aviation systems safety, management systems information chains, air traffic service, management information sources, stratified form of representation of structures.

**Устименко Иван Михайлович** – руководитель отдела профессиональной подготовки персонала обслуживания воздушного движения, Госкорпорация по организации воздушного движения «Аэронавигация Центрального Сибирь», Красноярск, Российская Федерация, e-mail: ustimenkoivan@inbox.ru.