

УДК 621.321.28

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ УЗЛА СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А. А. АВТУШКО, начальник цикла кафедры связи, подполковник

В. М. КАЛИНИН, профессор кафедры связи, канд. техн. наук, доцент
Военная академия Республики Беларусь

М. М. ЛАТУШКО, начальник кафедры связи, полковник, канд. воен. наук, военный факультет БГУИР

Предлагается обобщенная модель полевого узла связи специального назначения, позволяющая на основе системного подхода уточнить методику оценки эффективности его функционирования, а также разработать алгоритм формирования структуры узла с целью обоснования варианта построения, удовлетворяющего прогнозируемым условиям применения. Отличительной особенностью разработанной модели является возможность учета влияния технологической составляющей узла связи на его способность реализовать свои возможности в соответствии с целевым предназначением, а ее научной новизной – формализация целевой установки с использованием функции полезности Кобба – Дугласа, что позволяет проводить структурно-параметрический синтез и формировать структуру узла связи, оптимальную по обобщенному показателю эффективности функционирования.

Ключевые слова: модель, узел связи, функционирование, эффективность, критерий, показатель, оптимизация, структура.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ исследований [1–8], направленных на совершенствование и развитие полевых узлов связи (ПУС) специального назначения (СН), показал, что в настоящее время происходит глубокое переосмысление принципов их построения и способов применения. В изменившихся условиях ПУС СН должны обладать свойствами, позволяющими эффективно выполнять предъявляемые к ним требования со стороны надсистем, в интересах и во взаимодействии с которыми они функционируют. С другой стороны, для выполнения своего целевого предназначения любая система должна соответствовать ряду требований, предъявляемых к ней и со стороны реализуемых процессов. Следовательно, ПУС СН любого уровня, рассматриваемый как сложная система, характеризуется совокупностью свойств, к которым предъявляются требования, исходя из целей функционирования узла. Таким образом, требования к ПУС должны полностью определяться его свойствами, важными с точки зрения обеспечения поставленных целей [1, 4, 7, 8]. Эти свойства, с одной стороны, находятся в тесной диалектической взаимосвязи, обуславливают, дополняют друг друга, а с другой – в ряде случаев достаточно противоречивы. По этой причине формирование ПУС представляет собой сложную, мало упорядоченную процедуру и имеет дело с проблемами, характерной чертой которых является неопределенность. Из этого следует, что для

получения выводов о поведении ПУС СН в прогнозируемых условиях его функционирования вполне допустимо воспользоваться приемами, которые являются приближенными по своей природе и позволяют проводить исследование на основе системного моделирования [1, 2, 4, 6, 7, 9, 11].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На начальном этапе моделирования ПУС СН формируется его содержательная модель, отражающая предварительное и приближенное представление ПУС как системы и позволяющая определить порядок оценки эффективности функционирования узла. Исходя из принципов системного подхода, в качестве общей методологической основы для оценки эффективности функционирования ПУС СН в исследовании принято понятие эффективности, формулируемое как степень достижения цели функционирования [1, 3–5, 7, 8]. Вместе с тем оценка эффективности функционирования ПУС не является самоцелью. Она проводится для принятия решения по выбору одной или нескольких структур из множества рассматриваемых, которые предпочтительнее других с точки зрения выбранного критерия эффективности. При этом для оценки эффективности решений по построению ПУС СН необходимо опираться на некоторое множество показателей, характеризующих его наиболее существенные свойства, проявляющиеся при взаимодействии с надсистемами, а также свойства, отражающие внутренний аспект функционирования.

Поскольку управление системами СН осуществляется специально подготовленным оперативным составом, возможности должностных лиц (ДЛ) органов управления (ОУ) по решению возложенных на них функциональных задач напрямую увязываются с количеством сил и средств, имеющихся на ПУС СН в рассматриваемый период его функционирования [1, 3, 7, 8].

В общем случае уровень управления определяется функционалом [2, 4]:

$$U_y(t) = \inf \{U_{дл}(t), U_{пус}(t)\}, \quad (1)$$

где $U_{дл}(t)$ – уровень возможностей ДЛ (оперативного состава); $U_{пус}(t)$ – уровень возможностей ПУС.

Изменяя параметры ПУС СН при допущении о неизменном составе и подготовленности ДЛ ОУ, то есть полагая $U_{дл}(t) = \text{const}$, возможно проследить влияние ПУС на уровень управления, а выражение (1) характеризует способность ПУС обеспечить своевременную передачу (прием) заданного количества сообщений.

Проведенные исследования [1–3, 8, 10] показали, что уровень управления находится в прямой зависимости от состояния информационного процесса и определяется объемом своевременно переданных ПУС СН сообщений. Один из возможных вариантов такой зависимости представлен в таблице 1, где приведены критериальные значения, учитывающие степень обеспечения потребностей управления по объему передаваемой информации [3, 8, 10].

Таблица 1 – Критерии оценки уровня обеспечиваемого управления (вариант)

Уровень обеспечиваемого управления	Степень обеспечения потребностей управления
Управление обеспечивается в полном объеме (управление устойчиво)	0,8...1,0
Управление затруднено (периодически нарушается)	0,6...0,79
Управление нарушено	0,3...0,59
Управление на грани срыва	0,2...0,29
Управление сорвано (отсутствует)	< 0,19

В соответствии с таким подходом уровень обеспечиваемого управления, как вариант, принимает значения лингвистической переменной следующего вида: «в полном объеме», «затруднено», «нарушено», «на грани срыва», «сорвано» [2, 8, 9].

Затруднение управления выражается в его периодическом нарушении на отдельных направлениях, нарушение управления заключается в резком сокра-

щении обмена информацией, а срыв управления – в отсутствии всякой возможности управлять войсками.

Очевидно, что при определении объемов переданных сообщений следует исходить из того, что если соответствующая информация используется в процессе управления, то ее эффективность следует оценивать по тому эффекту, который она оказывает на результат управления.

Исходя из такого подхода, по степени значимости информации для принятия решения (а фактически полезности) в системах СН выделяются, как правило, три основных ее вида: чрезвычайная, внесрочная (текущая) и срочная [2–4, 8, 10]. На практике это означает, что необходимое и достаточное количество информации для принятия обоснованного решения будет складываться на основе своевременной доставки всей чрезвычайной, внесрочной и определенной части срочной информации.

В соответствии с таким представлением о неодинаковой ценности различных видов информации все направления связи, организуемые и обеспечиваемые ПУС СН, также подлежат категорированию и делаются на три группы важности, устанавливающие на узле очередность (приоритет) обслуживания заявок ДЛ ОУ на передачу сообщений.

В таблице 2 указано возможное (как вариант) процентное соотношение объемов информации по приоритетам обслуживания заявок на передачу сообщений [3, 8, 10].

Таблица 2 – Распределение потоков информации по направлениям связи и приоритетам

Группа важности направленной связи	Доля потоков информации по приоритетам, %		
	1-й приоритет	2-й приоритет	3-й приоритет
I	25	35	40
II	15	35	50
III	5	20–25	70–75

Чтобы получить количественную оценку уровня управления, необходимо от качественного значения показателя перейти к количественному. Для этого используется подход, изложенный и апробированный в [1–4, 8], когда в соответствие каждому качественному значению показателя информационного обмена ставится вполне определенное количественное значение. На практике это означает, что по важности и приоритетам можно судить о некоторых существенных свойствах ПУС СН. Так, требование по устойчивости его функционирования в условиях воздействия дестабилизирующих факторов выражается в критериях объема передаваемой информации для соответствующих уровней обеспечения управления.

Таблица 3 – Состояние управления и объем передаваемой информации (вариант)

Степень обеспечения управления	Объем информации, передаваемой ПУС СН, % от заданного			
	Всего	1-й приоритет	2-й приоритет	3-й приоритет
В полном объеме	80-100	100	100	50-100
Затруднено	60-80	100	100	10-20
Нарушено	40-60	100	80-100	0
На грани срыва	20-40	100	0	0
Сорвано	< 20	< 20	0	0

В таблице 3 представлен один из возможных подходов к определению зависимости состояния управления от объема передаваемой информации [1, 4, 7, 8].

Тогда с учетом [7, 8–10] уровень управления, который способен реализовать ПУС, исходя из своих информационных возможностей в определенный период своего функционирования, допустимо определять в виде

$$U_y(t) = \begin{cases} > 0,8 - \text{управление в полном объеме;} \\ 0,6-0,8 - \text{управление затруднено;} \\ 0,4-0,6 - \text{управление нарушено;} \\ 0,2-0,4 - \text{управление находится на грани срыва;} \\ < 0,2 - \text{управление войсками сорвано,} \end{cases} \quad (2)$$

где количественное значение определяет долю переданной (принятой) информации.

Следует понимать, что введение некоторой количественной меры, определяющей уровень управления, не выступает в качестве инструмента строгого измерения «количества управления». Этот показатель отражает основанное на здравом смысле утверждение, что в результате количественно-качественного изменения состава ПУС СН при некотором соотношении его сил и средств может произойти изменение управленческой деятельности за счет изменения технических возможностей самого узла. Уменьшение показателя информационных способностей ПУС СН ниже определенного значения позволяет утверждать, что изменяется и организующая роль ДЛ ОУ, а это в свою очередь приводит к снижению

возможностей системы управления. Условную меру снижения этой организующей функции и определяет показатель $U_y(t)$.

Поскольку передача сообщений от ПУС СН осуществляется одновременно по нескольким направлениям связи, для учета вклада направлений связи различных групп важности по обеспечению информационного обмена в процессе управления предлагается применять функцию полезности, а важность направлений связи интерпретировать как их полезность для удовлетворения потребностей ДЛ ОУ в доставке сообщений.

Функция полезности представляет собой зависимость между количественно выраженной удовлетворенностью получателя использованными ресурсами и объемами потребления этих ресурсов [11, 12]. Поскольку полезность является субъективным понятием, то для функции полезности первоначально не определены, во-первых, «точка отсчета», то есть нулевой уровень полезности и, во-вторых, «шкала», то есть единица измерения удовлетворенности. Следовательно, любая возрастающая функция может выражать полезность ресурса (услуги).

Проведенный анализ распределения приоритетов сообщений по направлениям связи различных групп важности (таблица 2) и зависимости состояния управления от объема передаваемой информации (таблица 1 и таблица 3) позволил определить зависимость состояния управления от объема информации, передаваемой в направлениях связи каждой группы важности (таблица 4) [13].

Таблица 4 – Зависимость состояния управления от объема передаваемой информации в направлениях связи различных групп важности

Степень обеспечения управления	Доля объема информации, передаваемой в направлениях связи, % от заданного объема		
	1-й группы важности	2-й группы важности	3-й группы важности
В полном объеме	80	75	64
Затруднено	64	55	35
Нарушено	53	43	23
На грани срыва	25	15	5
Сорвано	< 25	< 15	< 5

Зависимости состояния управления от объема передаваемой информации выше третьего уровня («управление затруднено» и «управление в полном объеме») были представлены в виде графиков, которые аппроксимированы степенной функцией с коэффициентом детерминации $\alpha^2 > 0,99$, а именно:

$y = 0,9692\ln(x) + 1,0214$ – для информационных направлений 1-й группы;

$y = 0,7159\ln(x) + 1,0127$ – для 2-й группы;

$y = 0,3867\ln(x) + 0,9823$ – для 3-й группы.

При этом исключение из рассмотрения двух нижних уровней состояния управления («на грани срыва» и «сорвано») допустимо на основании того, что в качестве приемлемых вариантов могут рассматриваться только те, которые обеспечивают качество не хуже третьего уровня («управление нарушено», «управление затруднено» и «управление в полном объеме») [1–4, 8].

Интерпретация величины доли переданной информации (отношения исполненного потока сообщений к входящему потоку заявок на передачу сообщений) как частота наступления события, заключающегося в своевременном предоставлении ДЛ ОУ востребованных ими услуг связи, позволяет перейти к вероятностному показателю $P_{св}$ оценки обеспечения информационного обмена.

Физический смысл вероятности $P_{св}$ своевременного предоставления услуг связи заключается в том, что она определяет долю удачных попыток ДЛ ОУ воспользоваться телекоммуникационными услугами, предоставляемыми средствами ПУС СН. Так, при $P_{св} = 1$ каждая заявка на обслуживание удовлетворяется, передается 100 % информации и управление обеспечивается в полном объеме.

Если с учетом представленной аппроксимации зависимость удовлетворенности потребностей ДЛ ОУ в услугах связи описывать функцией полезности вида [11, 12, 13]:

$$U = \ln(P_{св1гр}^{0,97} \cdot P_{св2гр}^{0,72} \cdot P_{св3гр}^{0,39}), \quad (3)$$

тогда уровень возможностей ПУС СН определяется как обобщенный функционал, объединяющий характеристики информационного обмена на направлениях связи различных групп важности через зависимость [13]:

$$U_{ПУС} = \frac{\ln(\prod_{n=1}^{N_1} P_{свn}^{0,97} \cdot \prod_{n=1}^{N_2} P_{свn}^{0,72} \cdot \prod_{n=1}^{N_3} P_{свn}^{0,39})}{N_1 + N_2 + N_3} + 1, \quad (4)$$

где $P_{св n}$ – вероятность своевременного предоставления услуг связи на n -м направлении связи; $n = \overline{1, N_i}$ – номер направления связи i -й группы важности; N_1, N_2, N_3 – количество направлений первой, второй и третьей групп важности соответственно.

Выражение под знаком логарифма в формуле (6) представляет собой мультипликативную степенную функцию, известную в теории полезности и теории принятия решения как функция Кобба – Дугласа. В микроэкономике функция Кобба – Дугласа применяется для описания предпочтений потребителя, который не удовлетворен отсутствием хотя бы одного товара или услуги. [11, 12]

Показатели степени в выражениях (3) и (4), определенные при аппроксимации, называются коэффициентами эластичности и показывают приблизительно на сколько процентов изменится значение функции при изменении на один процент значения i го аргумента [11, 12]. Значение выражения (4) обращается в ноль при полном отсутствии связи хотя бы по одной группе важности направлений связи.

Таким образом, функция полезности позволяет связать реализуемую ПУС СН способность обеспечить информационный обмен в виде передачи объема сообщений с уровнем возможностей по обеспечению управления, учитывая при этом важность направлений связи, и на этой основе оценить эффективность функционирования самого ПУС. Это означает, что известная научная задача совершенствования модели узла связи решена новым способом – с использованием функции полезности Кобба – Дугласа.

Кроме критериальной задачи выбора альтернативных вариантов построения ПУС выделенная целевая функция позволяет решать оптимизационную задачу его построения. Так, функция (4) соответствует условиям второго закона Госсена и для нее существует оптимальный вариант набора аргументов, при котором достигается равенство между предельными полезностями каждого аргумента [11, 12]. Тогда, продифференцировав (4) отдельно по каждому аргументу, а затем приравняв их, можно получить оптимальное соотношение, при котором обеспечивается наибольшее значение функции. Например, если допустить, что характеристика информационного обмена напрямую зависит от затрачиваемого ресурса, то оптимальное распределение ресурса сил и средств связи R по направлениям всех трех групп важности, обеспечиваемых ПУС, определяется соотношением:

$$\left\{ \begin{aligned} r_1^* &= \frac{0,97}{0,97 + 0,72 + 0,39} \cdot R = 0,47R; \\ r_2^* &= \frac{0,72}{0,97 + 0,72 + 0,39} \cdot R = 0,34R; \\ r_3^* &= \frac{0,39}{0,97 + 0,72 + 0,39} \cdot R = 0,19R. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Учет выражения (5) при построении ПУС СН позволяет проводить его параметрическую оптимизацию. При этом управляемым параметром, позволяющим максимизировать значение целевой функции (4),

является распределение ресурсов по направлениям связи различных групп важности согласно (5).

Частной характеристикой информационного обмена на отдельных направлениях, которые функция полезности обобщает с учетом их важности в уровень возможностей ПУС, является вероятность своевременного предоставления ДЛ ОУ услуг связи с допустимыми (требуемыми) достоверностью и безопасностью на i -м направлении связи:

$$P_{сви} \left(\frac{Y_i}{Z_i} = 1 \mid (P_{оши} \leq P_{оши}^{доп}, K_{3i} \geq K_3^{тр}) \right), i = \overline{1, N}, \quad (6)$$

где Y_i – исполненный поток сообщений; Z_i – входящий поток заявок на передачу сообщений в час наибольшей нагрузки; $P_{оши}$ – вероятность ошибочного приема сообщений (пакетов); K_{3i} – коэффициент закрытия направления связи; N – количество направлений связи.

Выражение (6) характеризует способность ПУС СН обеспечить своевременную передачу (прием) необходимого количества сообщений с требуемым качеством отдельно по каждому направлению связи.

Другим обязательным условием обеспечения информационного обмена является устойчивость элементов ПУС. При этом показатель устойчивости i -го элемента узла определяется частными показателями эксплуатационной надежности средств связи, помехоустойчивости и объектовой живучести [2–5, 7, 8]. Таким образом, вероятность $P_{св j гр}$ своевременного предоставления телекоммуникационных услуг для направлений связи каждой группы важности, кроме того, отражает еще и структурно-функциональную устойчивость узла, а значит, его способность в целом обеспечить информационный обмен.

Тогда целью структурной оптимизации ПУС СН является построение такой его структуры, которая в рассматриваемых условиях будет наиболее функциональной, то есть, во-первых, будет иметь наилучшие характеристики информационного обмена, обеспечивающие максимальный уровень управления, и, во-вторых, будет обладать необходимой устойчивостью.

При этом за условие оптимизации варианта построения ПУС СН целесообразно принять выполнение требований по пропускной способности и устойчивости при определенных затратах (количестве технических средств, транспортных единиц, обслуживающего персонала) на создание и эксплуатацию ПУС [1, 2, 4, 5].

Таким образом, задача оптимизации (синтеза) сводится к отысканию варианта s^* структуры ПУС, при котором показатель эффективности УПУС принимает наибольшее значение на допустимом множестве элементов узла:

$$s^* = \arg \max_{s \in S(R_{доп})} U_{ПУС}(s, w, q) \mid R(s) \in R_{доп}, w \in W_{зад}, q \in Q_{тр}, \quad (7)$$

где $R_{доп}$ – допустимое количество и состав элементов ПУС; $W_{зад}$ – возможности по воздействию на ПУС, заданные оперативно-тактическими условиями; $Q_{тр}$ – требуемое качество предоставляемых услуг связи.

Ограничение в виде допустимого числа $R_{доп}$ элементов ПУС и количества аппаратных (станций) в его составе накладывается исходя из имеющегося ресурса сил и средств связи, а также требований по мобильности.

Все представленные показатели отражают структуру и поведение ПУС СН в прогнозируемых условиях, имеют ясный физический смысл, доступны для вычисления.

Таким образом, совокупность принятых показателей составляет основу обобщенной модели функционирования ПУС, которая в соответствии с выражением (7) позволяет формализовать целевую установку и обеспечить выполнение поставленной цели – обоснование варианта построения ПУС СН, удовлетворяющего прогнозируемым условиям его применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель ПУС СН, в отличие от известных, позволяет учесть и проследить влияние технологической составляющей узла на его способность решать задачи по обеспечению управления. Математическая модель ПУС представлена целевой функцией вида (4), сформированной на основе функции полезности Кобба – Дугласа (3), которая путем свертки показателей устойчивости, рассчитанных за каждое направление связи при наложении ограничений по показателю пропускной способности, обобщает информационный обмен на направлениях связи ПУС с учетом их важности в уровень возможностей по обеспечению управления и на этой основе оценивает эффективность функционирования самого узла. Критерием оценки эффективности функционирования ПУС является выполнение требуемых значений показателей, записанные в виде условий и целевой функции. Соответствие вида целевой функции условиям второго закона Госсена позволяет вычислить оптимальные соотношения (5) распределения ресурса сил и средств связи по группам важности направлений связи, учет которых при построении ПУС обеспечивает максимум значения целевой функции, а выражения (6) и (7) позволяют осуществлять оптимизацию ПУС СН с целью нахождения структуры, которая в прогнозируемых условиях будет иметь наилучшие характеристики информационного обмена, обеспечивающие максимальный уровень возмож-

ностей узла по обеспечению управления. При этом важность направлений связи интерпретируется как их полезность с точки зрения удовлетворения потребностей в передаче (доставке) сообщений, а аргумент функции полезности, представляющий собой векторный показатель, – как вероятность своевременного предоставления услуг связи ДЛ ОУ (с учетом групп важности).

Использование обобщенной модели ПУС СН позволяет на основе структурно-параметрического синтеза формировать структуру, оптимальную по обобщенному показателю эффективности функционирования. При этом за условие оптимизации варианта построения ПУС ПУ принято совместное выполнение требований по его наиболее существенным свойствам при определенных затратах на создание и эксплуатацию, что позволяет провести всестороннюю многоаспектную оценку принятого к реализации варианта построения узла на предмет соответствия технологических возможностей ПУС информационным потребностям по обеспечению управления, а также обосновать практические предложения (рекомендации) по формированию структуры ПУС, в наибольшей степени предрасположенной к использованию в прогнозируемых условиях его функционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Густов, А. А. Методический подход обоснования требований к узлам связи пунктов управления / А. А. Густов, М. В. Пылинский, М. М. Латушко // Воен. мысль. – 2020. – № 3. – С. 90–95.
2. Иванов, В. Г. Теория и практика построения технической основы системы управления специального назначения. – СПб.: Изд-во СПб ГУТ, 2016. – 184 с.
3. Макаренко, С. И. Описательная модель сети связи специального назначения / С. И. Макаренко // Системы управления, связи и безопасности. – 2017. – № 2. – С. 113–164.
4. Пирогов, Ю. А. Методология исследования систем и сетей военной связи. – СПб.: ВАС, 2016 – 164 с.
5. Боговик, А. В. Эффективность систем военной связи и методика ее оценки. – СПб.: ВАС, 2006. – 243 с.
6. Звонарев, С. В. Основы математического моделирования: учеб. пособие / С. В. Звонарев [и др.]. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2019. – 112 с.
7. Автушко, А. А. Методика оценки эффективности полевых узлов связи пунктов управления по показателям их наиболее существенных свойств / А. А. Автушко, В. М. Калинин // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2020. – № 4 (69). – С. 28–38.
8. Автушко, А. А. Новый методический подход к обоснованию структуры полевого узла связи командного пункта отдельной механизированной бригады / А. А. Автушко, М. М. Латушко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь – 2021. – № 4 (73). – С. 3–15.
9. Орловский, А. Н. Использование теории нечетких множеств в процедурах принятия решений / А. Н. Орловский. – М.: Наука, 1981. – 178 с.
10. Стародубцев, Ю. А. Управление качеством информационных услуг / Ю. И. Стародубцев [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 454 с.
11. Гераськин, М. И. Математическая экономика: теория производства и потребительского выбора: учеб. пособие / М. И. Гераськин. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2008. – 124 с.
12. Гончаренко, В. М. Методы оптимальных решений в экономике и финансах: учебник / В. М. Гончаренко [и др.]. – М.: КНОРУС, 2014. – 400 с.
13. Латушко, М. М. Оценка эффективности функционирования узла связи полевого подвижного пункта управления // Научно-технический сборник № 109. Труды академии – СПб.: ВАС, 2020, С. 118–122.

A generalized model of a special-purpose field communication node is proposed, which allows, based on a systems approach, to clarify the methodology for assessing the effectiveness of its operation, as well as to develop an algorithm for forming the structure of the node in order to justify a construction option that satisfies the predicted conditions of use. A distinctive feature of the developed model is the ability to take into account the influence of the technological component of a communication center on its ability to realize its capabilities in accordance with its intended purpose, and its scientific novelty is the formalization of the target setting using the Cobb-Douglas utility function, which allows for structural-parametric synthesis and the formation of a structure communication node, optimal in terms of the generalized indicator of operational efficiency.

Key words: model, communication center, operation, efficiency, criterion, indicator, optimization, structure.