

УДК 621.391

Тихоненко Ю. Ю., асп.; Сундучков К. С., д.т.н.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАНАЛООБРАЗУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ ГЕТЕРОГЕННОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ**

Тихоненко Ю. Ю., Сундучков К. С. Математична модель каналоутворюючої апаратури гетерогенної розподіленої телекомунікаційної мережі. У статті представлена математична модель каналоутворюючої апаратури гетерогенної розподільної телекомунікаційної мережі для передачі інформації мобільним абонентам, що рухаються з високою швидкістю. Представлена формалізація моделі та постановка оптимізаційної задачі. Задача вирішена шляхом багатокритеріальної оптимізації з використанням інтегрального критерію переваги на прикладі гетерогенної мережі з 2000 абонентами. Одержано оптимальний варіант поділу послуг на 4 групи для задоволення вимог технічного завдання. Запропонована методика дозволяє вибрати оптимальний варіант побудови каналоутворюючої архітектури з безлічі варіантів.

Тихоненко Ю. Ю., Сундучков К. С. Математическая модель каналообразующей аппаратуры гетерогенной распределительной телекоммуникационной сети. В статье представлена математическая модель каналообразующей аппаратуры гетерогенной распределительной телекоммуникационной сети для передачи информации мобильным абонентам, движущимся с высокой скоростью. Представлена формализация модели и постановка оптимизационной задачи. Задача решена путем многокритериальной оптимизации с использованием интегрального критерия предпочтения на примере гетерогенной сети с 2000 абонентами. Получен оптимальный вариант разделения услуг на 4 группы для удовлетворения требований технического задания. Предложенная методика позволяет выбрать оптимальный вариант построения каналообразующей архитектуры из множества вариантов.

Tykhonenko Yu. Yu., Sunduchkov K. S. **Mathematical model of the channel forming equipment of the heterogeneous telecommunication networks.** This paper presents a mathematical model of the channel forming equipment of the heterogeneous telecommunication networks to transmit information to mobile users moving at high speed. A model formalization and the optimization problem formulation is presented. The problem is solved by using multi-criteria optimization of the preference integral criterion for heterogeneous network with 2000 subscribers. An optimal variant of the services division into 4 groups to meet the technical specifications requirements is described. The proposed method allows selecting the optimal variant of channel-forming architecture construction from many options.

**Введение.** В литературе большое внимание уделяется построению гибридных радиосетей, в которых информация передается к базовым станциям (БС) по оптоволоконному кабелю, а от БС к мобильному терминалу (МТ) – по радио [1...3]. Такая архитектура позволяет передавать большое количество сервисов одновременно по оптоволокну, используя различные технологии мультиплексирования, например DWDM. В свою очередь БС работает как ретранслятор, излучающий сигнал в нужной зоне покрытия.

Количество сервисов, востребованных абонентами, растет с каждым днем, следовательно, и требуемые скорости передачи данных. Для обеспечения высокой пропускной способности телекоммуникационной системы можно использовать OFDM-схему (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) расширения спектра со многими несущими.

В общем виде задача выглядит так. Для предоставления телекоммуникационных услуг МТ на автобанах каждая БС должна излучать на участке покрытия трассы автобана сигналы услуг для всех МТ одновременно, поскольку разделение услуг и предоставление отдельно взятой услуги для конкретного МТ в соответствующей координатной точке трассы автобана значительно усложняет и удорожает сеть доставки услуг.

Если положить, что требуется обслужить 2000 МТ, т.е. совокупный сигнал должен содержать информацию 2000 услуг, а требуемая скорость передачи сигнала одной видеослужбы равна 6 Мбит/с, то даже при модуляции КАМ1024 общая полоса частот группового спектра OFDM-символа будет более 1,2 ГГц. Поскольку цифровую обработку принятого группового спектра (аналогово-цифровое преобразование, прямое преобразование Фурье и т.д.) нужно проводить на всех поднесущих OFDM-символа одновременно, а соответствующая элементная база для цифровой обработки сигналов работает в настоящее время на частотах ниже 1 ГГц, то в изложенной постановке задача не имеет решения.

Для того чтобы переданный сигнал можно было обрабатывать в приемнике (селективно выбирать, оцифровывать, проводить преобразования далее после оцифровки), предлагается разделить полосу сигнала сети на участки (группы) с одним OFDM-символом. Тогда в приемнике будет обрабатываться каждая группа отдельно. Соответственно при разделении всего сигнала на группы полоса каждой группы будет значительно меньше 1,2 ГГц, что позволит выполнить преобразование на второй промежуточной частоте в приемнике меньше 1 ГГц. Целью работы является найти целесообразные комбинации количества групп, количества поднесущих в OFDM-символе и других параметров, рассмотренных в статье. В работах авторов [4,5] предложено разделение спектра на группы для последующей обработки групп отдельно друг от друга.

**Математическая модель каналообразующей аппаратуры.** В гетерогенной распределительной телекоммуникационной сети необходимо передать  $A$  услуг абонентам, которые движутся с большой скоростью. Абоненты отправляют заявку по запросному каналу на необходимую услугу, после чего получают ее. Необходимо все  $A$  услуг разместить в полосе  $\Delta F$ , не превышающей 1 ГГц (с учетом защитного интервала) исходя из ограничений цифровой обработки сигнала. Для этого услуги размещаются в группы, в каждой группе используется технология OFDM со своим набором параметров OFDM-символов (количество поднесущих, ширина поднесущей и т.п.).

Обозначим  $a_i$  – требуемая пропускная способность сети для передачи сигнала  $i$ -ой услуги. Все  $A$  услуг разделяются на  $M$  групп. В каждой группе передается  $B_i$  услуг, где  $i$  – номер группы. Тогда  $A = \sum_{i=1}^M B_i$ .

В каждой группе используется свой модулятор, например из ряда КАМ64, КАМ128, КАМ256, КАМ512, КАМ1024 с индексом модуляции  $k_i$ . Использование модулятора с меньшим количеством созвездий приведет к дроблению групп и выхода за пределы ограничения в 1 ГГц, использование модулятора с большим количеством созвездий нецелесообразно с экономической точки зрения. OFDM-символ формируется параллельной передачей созвездий каждой группы или путем последовательной передачи всех созвездий групп. Количество услуг в группе находится в пределах возможного количества звезд в созвездии модулятора, т.е. выполняется условие  $2^{k_i-1} < B_i < 2^{k_i}$ . Каждому модулятору ставится в соответствие ценовой показатель  $C_i$ . Чем больше индекс модуляции, тем дороже модулятор.

Общая стоимость каналообразующей аппаратуры системы пропорциональна цене модуляторов, которые используются в системе:

$$C = C \sum_{i=1}^M C_i,$$

где  $C$  – коэффициент пропорциональности стоимости системы на ценам на модуляторы.

Количество услуг в группе должно быть максимально приближено к числу звезд в созвездии модулятора для эффективного использования частотного ресурса (чтобы незанятые под услугу частоты не простаивали). Чем “ближе” значение  $B_i$  к  $2^{k_i}$ , тем меньше частот простаивает.

Считаем, что требуемая пропускная способность сети для передачи сигнала одной услуги в каждой группе одинакова, т.е. в группе передаются однотипные услуги. Если известна пропускная способность для услуги, которая передается в группе, то зная  $B_i$  и  $k_i$ , можно узнать частотную полосу, которую займет эта группа –  $\Delta f_i$ ; а зная количество групп  $M$  можно определить всю полосу, необходимую для передачи всех услуг  $A$ .

Тогда для  $i$ -ой группы  $\Delta f_i = \frac{a_i}{k_i} B_i$ , а суммарная полоса частот для передачи полезного сигнала всех  $M$  групп составит

$$\Delta F_{\text{полез}} = \sum_{i=1}^M \Delta f_i = \sum_{i=1}^M \frac{a_i}{k_i} B_i.$$

В приемном устройстве необходимо предусмотреть защитный интервал между группами  $\Delta f_{\text{защ}}$ , который определяется как процентная часть от несущей частоты в группе, которая следует перед данным защитным интервалом  $\Delta f_{\text{защ}} = d * f_{\text{нес}}$ , где  $d$  – параметр, определяющий ширину защитного интервала, например 0,02 или 0,05 (2% или 5%),

$f_{несi}$  – несущая частота в группе, которая следует перед защитным интервалом. Несущая частота выбирается как средняя частота группы.

Для определения защитного интервала после каждой группы необходимо определить начальное значение  $X$ , с которого начинается полоса рабочих частот  $\Delta F$ .

Тогда получим (1):

$$\begin{aligned} \Delta f_{защ1} &= d^* f_{нес1} = d^* (X + X + \frac{a_1}{k_1} B_1) / 2 = d^* (X + \frac{a_1}{2k_1} B_1) \\ \Delta f_{защ2} &= d^* f_{нес2} = d^* (X + \frac{a_1}{k_1} B_1 + \Delta f_{защ1} + \frac{a_2}{2k_2} B_2) \\ \Delta f_{защ3} &= d^* f_{нес3} = d^* (X + \frac{a_1}{k_1} B_1 + \Delta f_{защ1} + \frac{a_2}{k_2} B_2 + \Delta f_{защ2} + \frac{a_3}{2k_3} B_3) (1) \\ &\dots \\ \Delta f_{защn} &= d^* f_{несn} = d^* (X + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{a_i}{k_i} B_i + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta f_{защ i} + \frac{a_n}{2k_n} B_n) \end{aligned}$$

Количество защитных интервалов будет на 1 меньше, чем количество групп. Тогда общий частотный ресурс, занятый под защитные интервалы, составит

$$\Delta F_{защ} = \sum_{n=1}^{M-1} \Delta f_{защn} = \sum_{n=1}^{M-1} d^* (X + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{a_i}{k_i} B_i + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta f_{защ i} + \frac{a_n}{2k_n} B_n).$$

Вся полоса частот, занятая для передачи в сети равна  $\Delta F = \Delta F_{полез} + \Delta F_{защ}$ . В любой системе передачи частотный ресурс является дорогим, поэтому необходимо его рационально использовать, чтобы  $\Delta F_{полез}$  занимало как можно большую часть полосы всех рабочих частот  $\Delta F$ . Введем параметр спектральной (частотной) эффективности  $\xi = \frac{\Delta F_{защ}}{\Delta F} = \frac{\Delta F_{защ}}{\Delta F_{полез} + \Delta F_{защ}}$ .

**Анализ параметров модели.** В математической модели представлены следующие параметры системы:  $A, a_i, M, k_i, B_i, \Delta f_i, \Delta F_{полез}, \Delta f_{защi}, \Delta F_{защ}, \Delta F, \zeta, \xi$ . Часть из них, например  $A, a_i$ , задаются требованиями технического задания в виде постоянных значений, либо ограничений для конкретной системы, другие вычисляются. Проанализируем эти параметры и сформируем целевую функцию оптимизации.

Количество групп  $M$  больше одной (иначе теряется смысл группирования услуг) и меньше 20, т.к. при большем дроблении на группы их ширина уменьшается и усложняет (делает невозможным) их выделение фильтром на приемной стороне.

Чем меньше групп  $M$ , тем проще выделить группу на приемной стороне, однако тогда полоса рабочих частот всех сигналов в каждой группе не должна быть больше полосы частот, которую можно обработать элементами цифровой техники. Кроме того, многопозиционные модуляторы более дорогие и это приведет к росту цены системы. Устремим оба этих параметра к минимуму:  $M \rightarrow \min$

Стоимость всей системы не должна превышать некоторой суммы, оговоренной заказчиком системы в техническом задании, например  $\zeta < 100$  единиц:  $\zeta = C \sum_{i=1}^M \zeta_i \rightarrow \min$ .

Чем меньше защитный интервал в общей полосе, тем лучше используется частотный ресурс, однако тем сложнее выделить нужную услугу в приемнике и тем дороже система.

$$\xi = \frac{\Delta F_{защ}}{\Delta F} = \frac{\Delta F_{защ}}{\Delta F_{полез} + \Delta F_{защ}} \rightarrow \min$$

Чем меньше поднесущих частот простаивает в OFDM-символе, тем лучше используется частотный ресурс. Обозначим  $v_i$ , как параметр эффективного использования поднесущих частот OFDM-символа, полагая, что количество поднесущих частот в OFDM-символе равно сумме всех точек созвездий примененных модуляторов для данного OFDM-символа, тогда:

$$v_i = \frac{1}{2k_i - B_i} \rightarrow \max.$$

Задача оптимізації строиться як задача отыскання мінімуму цільової функції, що означає, що всі параметри повинні бути устремлені к мінімуму. Введемо зворотний параметр  $1/v_i$  – кількість невикористаних точок созвездія в  $i$ -ій групі – і устремим його к мінімуму:  $1/v_i = 2^{k_i} - B_i \rightarrow \min$ .

Тоді загальне кількість невикористаних точок созвездій  $V$  во всіх групах

$$V = \sum_{i=1}^M 1/v_i \rightarrow \min.$$

Чем менше кількість груп  $M$ , тем більше послуг в групі, що приводить к збільшенню  $k_i$  і удорожання системи. Індекс модуляції  $k_i$  приймає значення 6, 7, 8, 9, 10. Полоса робочих частот всіх груп  $\Delta F = \Delta F_{\text{полез}} + \Delta F_{\text{защ}}$  не перевищує 1 ГГц існуючи з обмежень цифрової обробки сигналу. Очевидно, що  $A, M, B_i$  – цілі числа.

**Постановка задачі оптимізації.** Математична модель каналобудової апаратури гетерогенної розподільної телекомунікаційної мережі представляється наступною системою рівнянь і обмежень.

$$A = \sum_{i=1}^M B_i; \quad 2 \leq M \leq 20; \quad 2^{k_i-1} < B_i < 2^{k_i}; \quad \Delta F_{\text{полез}} = \sum_{i=1}^M \frac{a_i}{k_i} B_i; \quad \Delta F_{\text{полез}} + \Delta F_{\text{защ}} \leq 1000 \text{ (МГц)};$$

$$\Delta F_{\text{защ}} = \sum_{n=1}^{M-1} d * (X + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{a_i}{k_i} B_i + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta f_{\text{защ } i} + \frac{a_n}{2k_n} B_n); \quad \text{Ц} = C \sum_{i=1}^M \text{Ц}_i; \quad \text{Ц} < \text{Ц}^{\text{T3}};$$

$$V = \sum_{i=1}^M (2^{k_i} - B_i); \quad A, M, B_i \in \mathbb{Z}; \quad \xi = \frac{\Delta F_{\text{защ}}}{\Delta F} = \frac{\Delta F_{\text{защ}}}{\Delta F_{\text{полез}} + \Delta F_{\text{защ}}}.$$

Сформуємо цільову функцію для багатокритеріальної оптимізації з чотирьох параметрів:  $Y_1 \sim M \rightarrow \min$ ;  $Y_2 \sim \xi \rightarrow \min$ ;  $Y_3 \sim V \rightarrow \min$ ;  $Y_4 \sim \text{Ц} \rightarrow \min$ .

Тоді цільова функція  $\Phi = \{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4\} \rightarrow \min$ .

Багатокритеріальна оптимізація може здійснюватися різними методами, наприклад шляхом регресійного аналізу, використання принципу компромісу по Парето, статистичних методів пошуку [6].

Знайдемо оптимальне рішення шляхом використання інтегрального критерію переваги (ІКП), запропонованого в [7]:

$$\text{ІКП} = \prod_{i=1}^n R_i S_i^H,$$

де  $n$  – кількість параметрів оптимізації ( $Y_i$ );

$R_i$  – показник, що визначає, задовольняє чи отримане значення параметра обмеженням технічного завдання (приймає значення 1, якщо задовольняє, або 0 – в протилежному випадку);

$S_i^H$  – нормований показник параметра (визначається як  $S_i^H = \frac{Y_i}{S_i^{\text{T3}}}$ ).

Оскільки всі критерії оптимізації ( $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$ ) прагнуть к мінімуму, то оптимальним буде варіант з мінімальним значенням ІКП.

**Приклад використання математичної моделі.** Розглянемо приклад передачі послуг в гетерогенній розподільній телекомунікаційній системі для МТ, які рухаються по автобану. Необхідно передати  $A = 2000$  послуг. Для однієї послуги передачі даних, для прикладу покладемо, потрібно пропускання системи  $a_i = 3$  Мбіт/с.

Модулятори, які можуть бути використані для даного прикладу, мають коефіцієнти модуляції  $k_i$ , а їх ціна відповідає ряду умовних одиниць  $\text{Ц}_i$ :

$$k_i \leftrightarrow \text{Ц}_i: \quad k_i = \{6, 7, 8, 9, 10\}, \quad \text{Ц}_i = \{2, 3, 10, 15, 50\} \text{ (одиниць)}.$$

Коефіцієнт  $C$  покладемо рівним 2.

Розрахунок виконується для випадку, коли захисна полоса становить 2% від несущої частоти попередньої групи ( $d = 0,02$ ), початкове значення робочої частоти  $X = 200$  МГц.

При прийнятих початкових даних в прикладі можливі варіанти:

**1. Разделение на M=2 группы.** В каждой группе 1000 услуг:  $B_1 = B_2 = 1000$ . В каждой группе используется модулятор КАМ1024,  $k_1 = k_2 = 10$ .

$$\text{Тогда } \Delta f_1 = \frac{a_1}{k_1} B_1 = (3 \cdot 1000) / 10 = 300 \text{ МГц.}$$

$$\text{Защитный интервал составит } \Delta f_{\text{защ}1} = d \cdot (X + \frac{a_1}{2k_1} B_1) = 0,02 (200 + 300/2) = 7 \text{ МГц.}$$

$$\Delta F_{\text{полез}} = \sum_{i=1}^2 \Delta f_i = \frac{a_1}{k_1} B_1 + \frac{a_2}{k_2} B_2 = 300 + 300 = 600 \text{ МГц.}$$

$$\xi = \frac{\Delta F_{\text{защ}}}{\Delta F_{\text{полез}} + \Delta F_{\text{защ}}} = \frac{7}{600 + 7} \cdot 100\% = 1,15 \%$$

Если число звезд в OFDM-символе  $2^{ki} > B_i$ , то поднесущие простаивают.

$2^{ki} - B_i = 1024 - 1000 = 24$  частоты в каждом OFDM-символе простаивают (две группы, тогда  $V = 2 \cdot 24 = 48$  частот в OFDM-символе не заняты под передачу полезного сигнала).

$$\text{Ц} = 2 \sum_{i=1}^2 \text{Ц}_i = 2(\text{Ц}_1 + \text{Ц}_2) = 2(50 + 50) = 200 \text{ ед.}$$

**2. Разделение на M=3 группы.** В первых двух группах – по 500 услуг, в третьей группе – 1000 услуг:  $B_1 = B_2 = 500$ ;  $B_3 = 1000$ . В первых двух группах используется модулятор КАМ512,  $k_1 = k_2 = 9$ ;  $k_3 = 10$ .

$$\text{Тогда } \Delta f_1 = \Delta f_2 = \frac{a_1}{k_1} B_1 = (3 \cdot 500) / 9 = 168 \text{ МГц. } \Delta f_3 = \frac{a_3}{k_3} B_3 = (3 \cdot 1000) / 10 = 300 \text{ МГц.}$$

$$\text{Защитный интервал составит } \Delta f_{\text{защ}1} = d \cdot (X + \frac{a_1}{2k_1} B_1) = 0,02 (200 + 168/2) = 6 \text{ МГц.}$$

$$\Delta f_{\text{защ}2} = 10 \text{ МГц (см. систему (1)), } \Delta F_{\text{защ}} = \sum_{i=1}^{3-1} \Delta f_{\text{защ}i} = 6 + 10 = 16 \text{ МГц.}$$

$$\Delta F_{\text{полез}} = \sum_{i=1}^3 \Delta f_i = 2 \cdot 168 + 1 \cdot 300 = 636 \text{ МГц.}$$

$$\xi = \frac{\Delta F_{\text{защ}}}{\Delta F_{\text{полез}} + \Delta F_{\text{защ}}} = \frac{16}{636 + 16} \cdot 100\% = 2,45 \%$$

$2^{ki} - B_i = 512 - 500 = 12$  частот в каждом OFDM-символе простаивают для случая КАМ512 и  $2^{ki} - B_i = 1024 - 1000 = 24$  для случая КАМ1024 (три группы, тогда  $V = 2 \cdot 12 + 24 = 48$  частот в OFDM-символе не заняты под передачу полезного сигнала).

$$\text{Ц} = 2 \sum_{i=1}^3 \text{Ц}_i = 2(2\text{Ц}_1 + \text{Ц}_3) = 2(2 \cdot 15 + 1 \cdot 50) = 160 \text{ ед.}$$

**Другие возможные варианты** сведены в табл. 1.

Значения для параметров, которые вычисляются, представлены в табл. 2.

Исходя из анализа значений табл. 2, можно сделать вывод, что построение системы по варианту 1 дорого, но система наиболее эффективна по использованию частотного ресурса ( $Y_2$ ). Система 2 дешевле чем 1, но частотный ресурс используется менее рационально по сравнению с 1. Системы 3 и 5 сопоставимы по стоимости ( $Y_4$ ), но в системе 3 меньше групп ( $Y_1$ ) и более рационально используется частотный ресурс ( $Y_2$ ).

Путем введения ограничений (например,  $\text{Ц} \leq 140$  ед.) и получения различных вариантов необходимо исходя из параметров  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$  выбрать оптимальный вариант.

В табл. 3 приведены значения расчета ИКП для следующих условий технического задания:  $S_1^{T3} < 14$  (количество групп меньше 14);  $S_2^{T3} < 15$  (на подзащитные интервалы отводится меньше 15% всей полосы сигнала);  $S_3^{T3} < 512$  (простаивает меньше 512 поднесущих);  $S_4^{T3} < 140$  (цена системы меньше 140 ед.).

Тогда предъявленным требованиям технического задания удовлетворяют варианты 3, 5, 9 и 10. Оптимальным по ИКП является вариант 3, при котором все услуги разделяются на 4 группы, в каждой группе по 500 услуг, в каждой группе используется модулятор КАМ512.

Тогда полоса рабочих частот составит 701 МГц, полоса каждой группы – 168 МГц, а общая цена системы – 120 ед.

Варианты наборов параметров системы

Табл. 1

№ вар.	Кол-во групп	Кол-во услуг в группах	Индекс модуляции в группе	Ширина полезного сигнала $\Delta F_{\text{полез}}$ , МГц	Ширина защитных интервалов $\Delta F_{\text{защ}}$ , МГц
1	2	$B_1 = B_2 = 1000$	$k_1 = k_2 = 10$	600	7
2	3	$B_1 = B_2 = 500;$ $B_3 = 1000$	$k_1 = k_2 = 9; k_3 = 10$	636	16
3	4	$B_1 = \dots = B_4 = 500$	$k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = 9$	672	29
4	5	$B_1 = \dots = B_5 = 400$	$k_1 = \dots = k_5 = 9$	670	34
5	5	$B_1 = B_2 = 250;$ $B_3 = B_4 = B_5 = 500$	$k_1 = k_2 = 8;$ $k_3 = k_4 = k_5 = 9$	692	36
6	7	$B_1 = \dots = B_6 = 285;$ $B_7 = 290$	$k_1 = \dots = k_7 = 9$	668	63
7	7	$B_1 = \dots = B_6 = 250;$ $B_7 = 500$	$k_1 = \dots = k_6 = 8;$ $k_7 = 9$	732	61
8	8	$B_1 = \dots = B_8 = 250$	$k_1 = \dots = k_8 = 8$	752	79
9	8	$B_1 = \dots = B_4 = 125;$ $B_5 = B_6 = 250;$ $B_7 = B_8 = 500.$	$k_1 = \dots = k_4 = 7;$ $k_5 = k_6 = 8;$ $k_7 = k_8 = 9$	740	64
10	12	$B_1 = \dots = B_8 = 125;$ $B_9 = \dots = B_{12} = 250$	$k_1 = \dots = k_8 = 7;$ $k_9 = \dots = k_{12} = 8$	808	127

Значения вычисленных параметров для 10 вариантов системы

Табл. 2

Параметр \ №вар.	№вар.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Y_1: M$	2	3	4	5	5	7	7	8	8	12
$Y_2: \xi$	1,15	2,45	4,13	5,63	4,95	8,61	7,8	9,51	7,96	13,6
$Y_3: V$	48	48	48	560	48	1584	48	48	48	48
$Y_4: Ц$	200	160	120	150	130	210	150	160	124	128

Значения ИКП для 10 вариантов систем

Табл. 3

№ вар.	$R_1$	$S_1^H$	$R_2$	$S_2^H$	$R_3$	$S_3^H$	$R_4$	$S_4^H$	ИКП
1	1	0,142	1	0,076	1	0,093	0	1,428	0
2	1	0,214	1	0,163	1	0,093	0	1,142	0
3	1	0,285	1	0,275	1	0,093	1	0,857	0,0063
4	1	0,357	1	0,375	0	1,093	0	1,071	0
5	1	0,357	1	0,33	1	0,093	1	0,928	0,0102
6	1	0,5	1	0,574	0	3,093	0	1,5	0
7	1	0,5	1	0,52	1	0,093	0	1,071	0
8	1	0,57	1	0,634	1	0,093	0	1,143	0
9	1	0,57	1	0,530	1	0,093	1	0,886	0,0252
10	1	0,857	1	0,906	1	0,093	1	0,914	0,0666

Пятый вариант хуже, поскольку там разделение необходимо выполнить на 5 групп, при этом стоимость всей системы дороже. Девятый и десятый варианты представляют разделение на 8 и 12 групп соответственно. Эти варианты хуже, чем вариант 3, за счет неэффективного использования полосы рабочих частот, поскольку ее значительную часть займут защитные полосы между группами.

**Выводы.** В статье представлена математическая модель каналообразующей аппаратуры гетерогенной распределительной телекоммуникационной сети. Реализация модели приведена для сети, в которой предоставляется услуга, для доставки которой требуется пропускная способность 3Мбит/с каждому из 2000 абонентов. Общий ресурс сети должен быть равен 6Гбит/с. Представлена математическая модель и постановка оптимизационной задачи. Задача решена путем многокритериальной оптимизации с использованием интегрального критерия предпочтения. Оптимальным вариантом для удовлетворения требований технического задания является вариант разделения всех услуг на 4 группы.

Решение задачи оптимизации по приведенной методике позволило найти 4 лучших из 10 близких вариантов построения сети и отыскать среди них оптимальный. В зависимости от исходных данных и целей, поставленных в техническом задании построения системы, приведенная в статье методика позволяет выбрать оптимальный вариант построения каналообразующей аппаратуры из тысячи возможных вариантов.

### Литература

1. Интерактивная гетерогенная телекоммуникационная система 4G с беспроводным доступом в миллиметровом диапазоне для предоставления мультимедийных услуг мобильным абонентам / [М. Е. Ильченко, К. С. Сундучков, С. Э. Волков и др.] // Зв'язок. – 2008. – №7-8. – С.28-32.
2. Ng'oma A. Radio-over-Fiber Systems for Multi-Gbps Wireless Communication /A. Ng'oma, M. Sauer // Proceedings of IEEE Asia Communications and Photonics (SPIE, 2009). – 2009. – P. 1-10.
3. Kim H. B. Radio over Fiber Network Architecture for Road Vehicle Communication Systems / H. B. Kim, M. Emmelmann, B. Rathke, A. Wolisz // IEEE Proceedings of Vehicular Technology Conference (VTC 2005). – 2005. – P. 1-5.
4. Проблемы построения мультисервисной распределительной сети доступа к мобильному терминалу абонента, движущегося с высокой скоростью / [М.Е. Ильченко, К.С. Сундучков, Б.Н. Шелковников и др.] // Электроника и связь. – 2011. – №2(61). – С. 163-169.
5. Тихоненко Ю. Ю. Распределение частотного ресурса в OFDM-символах мобильной сети / Ю. Ю. Тихоненко, К. С. Сундучков, А. В. Сологуб // Проблеми телекомунікацій: зб. тез 5-ї міжн. наук-техн. конф. ПТ-11. – Київ, 2011. – С. 80.
6. Лисенко О. І., Валуйський С. В. Метод оптимального управління топологією мережі безпілотних літальних апаратів за критерієм підвищення зв'язності безпроводових ad-hoc мереж / О. І. Лисенко, С. В. Валуйський // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2010. – №2. – С. 218-224.
7. Сундучков К. С. Оптимизация фрагмента телекоммуникационной сети / К. С. Сундучков // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2010. – №2. – С. 36-45.