

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
ВЫСОКОМОБИЛЬНЫХ АБОНЕНТОВ В СЕТИ ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА  
НА ОСНОВЕ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ РАЗНЕСЕННОГО ПРИЕМА  
И МОБИЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ**

*Предложены обобщенная схема функционирования высокомобильных абонентов в сети широкополосного доступа и метод оценки ее эффективности.*

*Ключевые слова: высокомобильные абоненты, сеть широкополосного доступа, макродиверсифицированный хэндовер, зональные диспетчеры.*

**Постановка задачи.** В современных стандартах [1–3] поддерживаются три Handoff-режима: интенсивный Handoff (Hard Handoff, ННО), режим быстрого переключения между базовыми станциями (БС) (Fast Base Station Switching, FBSS) и макродиверсифицированный хэндовер (Macro Diversity Handover, MDHO), из которых ННО является базовым, а FBSS и MDHO – дополнительными режимами. Все БС, поддерживающие режимы MDHO и FBSS, должны синхронизироваться на основе единого опорного источника и работать в одном частотном диапазоне.

В режиме MDHO мобильная станция (МС) может одновременно работать с несколькими БС (диверсифицироваться), каждая из которых должна передавать мобильной станции (МС) одинаковые пакеты. Для этого формируется список БС, способных поддерживать такой обмен с заданной МС, – активный набор (Active Set). У каждой БС из одного списка есть вся информация о МС, которую БС получает при начальной регистрации МС (включая аутентификацию). Среди БС из активного набора одна станция назначается анкерной. Для обмена с несколькими БС мобильная станция должна постоянно принимать управляющую информацию (как минимум, карты нисходящего/восходящего каналов и управляющие заголовки). В режиме MDHO этого можно достичь двумя способами. Первый способ заключается в том, что МС следит только за управляющей информацией анкерной БС. В этом случае сообщения DL- и UL-MAP анкерной БС должны содержать данные о расположении пакетов, адресованных данной МС от всех БС из листа диверсификации. Второй способ подразумевает, что МС контролирует управляющую информацию всех активных БС из активного набора. Но тогда в картах DL/UL-MAP каждой из них должна быть информация о расположении пакетов других БС. Базовые станции, поддерживающие режим MDHO и входящие в один активный набор, должны работать с общим набором идентификаторов соединений CID. В этом режиме несколько БС из активного набора синхронно передают одинаковые пакеты на абонентскую станцию (АС), которая из принятых пакетов выбирает лучший. При передаче в восходящем канале пакет от АС принимают несколько БС из активного набора и из них выбирается лучший.

Особое внимание в дополнениях к стандарту IEEE 802.16e–2005 и IEEE 802.16–2004/Cor1–2005 [3] уделено системам ММО – как в режимах пространственно-временного кодирования (STC), так и для адаптивных антенных систем (AAS). В частности, добавлен абсолютно новый раздел, в котором режим макродиверсифицированного хэндовера рассматривается как работа АС в окружении нескольких БС, одновременно передающих данной АС информацию. В качестве пространственно разнесенных антенн выступают антенны различных БС [1–3].

Таким образом, для решения задачи использования в сетях широкополосного доступа МС с высокой скоростью перемещения необходимо осуществить доработку стандарта IEEE 802.16e–2005, в котором в качестве основного способа функционирования указывается режим MDHO при взаимодействии МС со всеми БС из активного набора, при этом доступ МС к множеству БС будет осуществляться на основе пространственно разнесенного приема сигнала.

**Обобщенная схема функционирования высокомобильного абонента в сети широкополосного доступа.** В качестве МС рассмотрим воздушное судно (ВС), осуществляющее передвижение по трассе на высоте  $h$  со скоростью  $V_m$  (рис. 1).

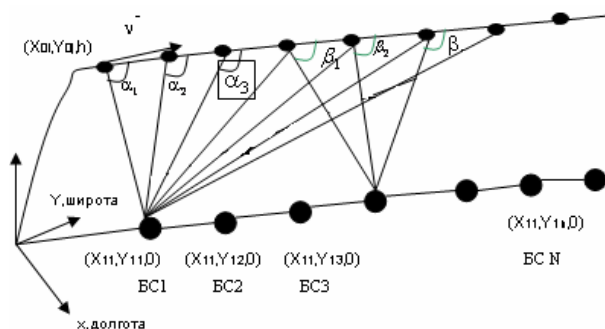


Рис. 1. Схема доступа ВС к БС при движении по трассе: BC1...BCN – базовые станции;  $\alpha$  – угол между вектором скорости движения ВС и направлением на БС;  $(X_{1i}, Y_{1j}, 0)$  – координаты БС;  $(X_{0i}, Y_{0j}, h)$  – координаты ВС

Для расчета частоты Доплера используем уравнение

$$f_D = \frac{f_0}{c} \cdot V_m \cdot \cos \alpha, \tag{1}$$

где  $f_0$  – рабочая частота связи;  $c$  – скорость распространения света;  $V_m$  – скорость движения ВС;  $\cos \alpha = \frac{d}{l}$ , здесь  $d = \sqrt{(X_{11} - X_{01})^2 + (Y_{11} - Y_{01})^2 + h^2}$ ,  $l = \sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2}$

Анализ графиков значений частоты Доплера для каналов связи, образуемых между ВС и  $i$ -й БС (рис. 2), показывает, что частота Доплера в канале связи, образуемом между движущимся ВС и  $i$ -й БС, имеет значение, превышающее 2 кГц. Однако в момент времени, когда угол между вектором скорости движения и направлением на БС приближается к  $90^\circ$ ,  $f_d$  будет стремиться к нулю.

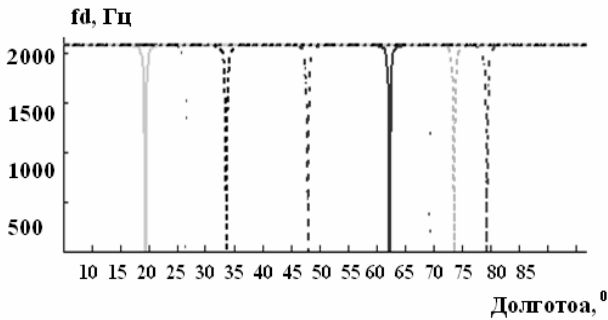


Рис. 2. Значение частоты Доплера для каналов связи ВС с БС, расположенными вдоль трассы полета

Таким образом, если вдоль авиатрассы установить множество БС, одновременно работающих с ВС в режиме макродиверсифицированного хэндовера, то

в любой момент времени движения ВС будет существовать хотя бы одна БС, при осуществлении доступа ВС к которой  $f_d$  будет стремиться к нулю, что обеспечит повышение скорости передачи информации от авиапассажиров в сети широкополосного доступа и снизит частоту переключения мобильного абонента между базовыми станциями.

Следовательно, принцип построения сети широкополосного доступа, обеспечивающий обслуживание потоков информации высокомобильного абонента с заданным качеством, может быть представлен в виде схемы, показанной на рис. 3.

Общая инфокоммуникационная сеть транспортной системы – это совокупность коммутационного оборудования, которое обеспечивает передачу информационных потоков между глобальной сетью и местными информационными центрами – зональными диспетчерами (Zone Controllers, ZC), которые отвечают за прием и передачу трафика, регистрацию в сети подвижной платформы и ее мобильных абонентов в зоне своей ответственности. ZC направляют информационный поток из глобальной сети одновременно на все связанные с ним ретрансляторы  $R_n$ , которые передают нагрузку на множество антенн ( $A_{n1} \dots A_{nN}$ ), установленных на подвижной платформе. Все антенны подключены к станции подвижной платформы (Vehicle Station, VS), которая передает нагрузку точкам доступа (Access Points, AP) локальной беспроводной сети абонентов. Таким образом, данная система позволяет предоставлять информационные услуги абонентам без перерывов связи [4].

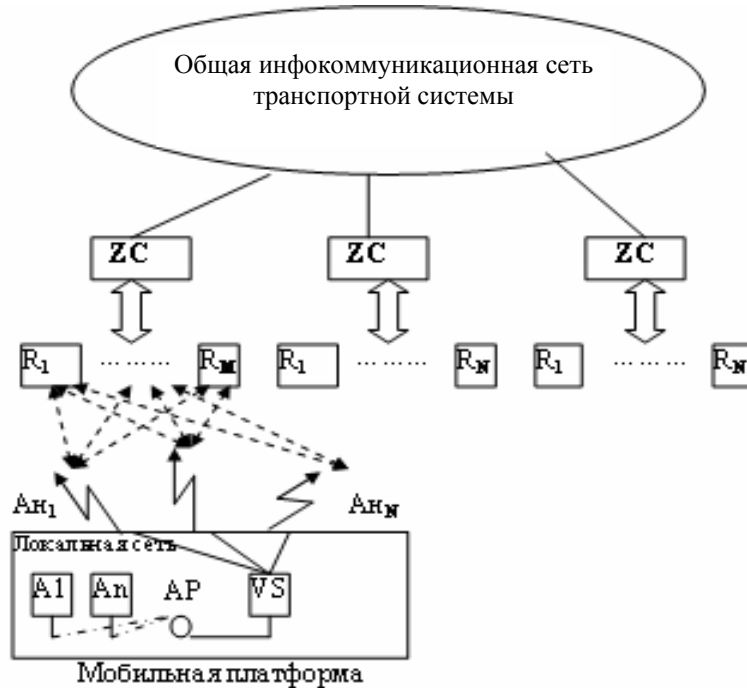


Рис. 3. Принцип функционирования высокомобильного абонента в сети широкополосного доступа (обозначения см. в тексте)

**Метод оценки эффективности функционирования высокоомобильных абонентов в сети широкополосного доступа.** Согласно модели передачи информации от зонального диспетчера к станции транспортного средства (рис. 4),  $M$  ретрансляторов размещены вдоль маршрута движения транспортного средства и удалены друг от друга на расстояние  $d_r$ , превышающее расстояние пространственной корреляции.  $N$  антенн транспортного средства размещены на расстоянии  $d_a$  друг от друга. Самое короткое расстояние между ретранслятором и антенной подвижного объекта –  $d_v$ . Все  $M \times N$  возможных подканалов подвержены быстрым и медленным замираниям, коэффициенты подканалов остаются постоянными на длительности одного фрейма. Предполагается, что в подканалах присутствует аддитивный, белый, гауссовский шум со спектральной плотностью  $N_0$ .

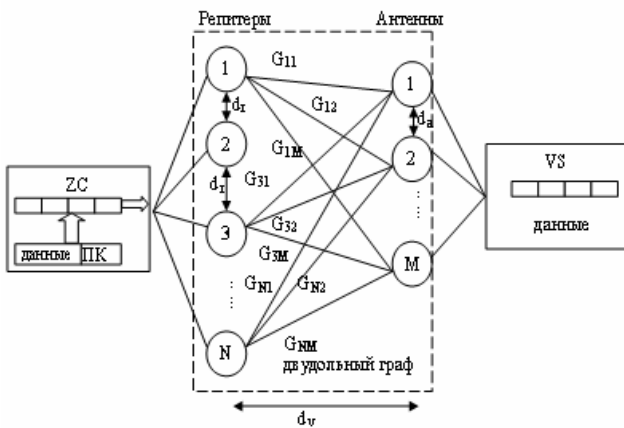


Рис. 4. Модель передачи информации от зонального диспетчера к станции транспортного средства (обозначения см. в тексте)

Коэффициент передачи  $ij$ -го канала

$$G_{ij} = \alpha_{ij}^2 L_0 \left( \frac{d_{ij}}{d_0} \right)^{-k}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{ij}$  – значение огибающей, имеющей распределение Райса:

$$w(\alpha_{ij}) = \frac{\alpha_{ij}}{\sigma_{ij}} e^{-\left( \frac{\alpha_{ij}^2 + m_{ij}^2}{\sigma_{ij}^2} \right)} I_0 \left( \frac{\alpha_{ij} m_{ij}}{\sigma_{ij}^2} \right),$$

здесь  $I_0(o)$  – функция Бесселя нулевого порядка от мнимого аргумента [5; 6];  $d_{ij}$  – расстояние между ретранслятором  $i$  и антенной  $j$ ;  $k$  – образец потери тракта;  $L_0$  – уровень затухания сигнала на удалении  $d_0$  для заданного типа передающей антенны.

Рассматриваемая совокупность взаимосвязанных ретрансляторов и антенн может быть представлена в виде полного взвешенного двудольного графа (см. рис. 4), в котором антенны и ретрансляторы показаны в виде двух отдельных наборов вершин, а радиолиния между каждой возможной парой «антенна–ретранслятор» – в виде ребра графа [7]. Ребро инци-

дентно с вершинами различных наборов. Характеристика линии  $G_{ij}$  определяется как вес ребра  $(i, j)$ .

Выбор передачи с многократными радиолиниями среди всех пар «антенна–ретранслятор», с ограничением непосредственной связи в каждом ретрансляторе и антенне, определяется соответствием двудольного графа: множество ребер  $X = \{(i, j)\}_{1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N}$ , все  $(i, j) \in X$ , может быть инцидентно на ретрансляторе  $i$  или антенне  $j$  только однажды. В матрице  $X = \{x_{ij}\}_{1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N}$   $x_{ij} = 1$ , если связь между ретранслятором  $i$  и антенной  $j$  определена на множестве  $X$ , и  $x_{ij} = 0$ , если связь не выбрана. При этом сумма каждого ряда или колонки матрицы  $X$  должна быть равна 0 или 1 [4; 7].

Каждый  $i$ -й ретранслятор характеризуется мощностью передаваемого сигнала  $P_i$  и скоростью передачи  $r_i$ . Если  $P_i = 0$ ,  $r_i = 0$ , то ретранслятор неактивен. Для множества ретрансляторов определяются вектор мощности  $P = [P_i]_{1 \leq i \leq M}$  и вектор скорости передачи информации  $r = [r_i]_{1 \leq i \leq M}$ . Все образуемые беспроводные связи осуществляются на основе технологии DS/SSMA [8].

В [4] отношение мощности сигнала к мощности помехи на приеме линии  $(i, j)$  имеет вид

$$\gamma_{ij} = \left( \frac{W}{r_i} \right) \frac{G_{ij} P_i}{N_0 + \sum_{(k,l) \in X, k \neq i} G_{kl} P_k}, \quad (3)$$

где  $W$  – полоса пропускания системы;  $r_i$  – пропускная способность линии  $(i, j)$  из множества  $X$ ;  $P_i$  – мощность сигнала ретранслятора  $i$ ;  $N_0$  – мощность шума в канале.

Для обеспечения требуемого качества связи необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\gamma_{ij} \geq \gamma_{\text{доп}}. \quad (4)$$

Тогда пропускная способность системы [4] определяется выражением

$$R_{\text{сyst}} = \frac{\gamma_{\text{доп}}}{W} \sum_{\substack{(i,j) \in X, \\ \gamma_{ij} \geq \gamma_{\text{доп}}}} r_i. \quad (5)$$

Из рассмотренного следует, что эффективность функционирования системы MHS определяется пропускной способностью  $R$ . Следовательно, для любых  $(i, j) \in X, P_i \in P$  необходимо определить  $r_i$  таким образом, чтобы  $\gamma_{ij} \geq \gamma_{\text{доп}}$ .

Согласно выражениям (3) и (5):

$$R_{\text{сyst}} = \frac{\gamma_{\text{доп}}}{W} \sum_{(i,j) \in X} r_i = \sum_{(i,j) \in X} \frac{G_{ij} P_i}{N_0 + \sum_{\substack{(k,l) \in X, \\ k \neq i}} G_{kl} P_k}. \quad (6)$$

Выражение (6) является целевой функцией, а задача максимизации пропускной способности MHS может быть представлена в виде

$$R_{\text{сyst}} \rightarrow \max \quad (7)$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^M x_{ij} = 0 \text{ или } 1; \quad \sum_{j=1}^N x_{ij} = 0 \text{ или } 1; \\ x_{ij} \in \{0,1\}, 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N; \\ \frac{G_{ij}P_i}{N_0 + \sum_{\substack{(k,l) \in X, \\ k \neq i}} G_{kj}P_k} \leq \gamma_{\text{доп}}; \quad 0 \leq P_i \leq P_{\text{max}}. \end{aligned}$$

Ограничения для  $x_{ij}$  в выражении (7) определены из матрицы соответствия, рассмотренной ранее.

Решение задачи (7) состоит из двух подзадач: формирования множества  $X$  и распределения мощности передачи сигнала по  $(i, j)$  из  $X$ . Первая подзадача носит комбинаторный характер, вторая является вычислительной задачей. Одновременное решение этих подзадач вызывает большие затруднения. Поэтому предлагается сначала получить соответствие  $X = \{(i, j)\}_{1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N}$ , а затем осуществить распределение мощности по числовому множеству  $\{(i, j)\}_{1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N} \in X$ .

Задача получения множества соответствия  $X = \{(i, j)\}$  может быть представлена в виде целевой функции

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N c_{ij} x_{ij} \rightarrow \max \quad (8)$$

и ограничений

$$\sum_{i=1}^M x_{ij} = 1; \quad \sum_{j=1}^N x_{ij} = 1; \quad x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad (9)$$

где  $c_{ij}$  соответствует пропускным способностям  $(ij)$   $x$  линий;  $x_{ij} \in X$ .

Согласно ограничениям (9), решение задачи (8) может быть найдено с помощью целочисленного программирования, характеризующегося большими размерностью и временем выполнения. Однако если ввести ограничение  $x_{ij} \geq 0$ , то полный набор ограничений формирует ограниченную область со множеством вершин – экстремумов, которые будут соответствовать множеству  $X$ . Следовательно, задача (8) становится задачей линейного программирования с  $N^2$  переменными, которая решается быстрее [9].

В работе [4] для учета влияния подканалов предлагается использовать их коэффициенты передачи. Тогда целевая функция может быть представлена в виде

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left[ \frac{G_{ij} x_{ij}}{\frac{N_0}{P'} + \sum_{k=1, k \neq i}^M \sum_{l=1}^N G_{kj} x_{kl}} \right] \quad (10)$$

с ограничениями

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^M x_{ij} = 1 \text{ или } 0, \quad 1 \leq j \leq N; \\ \sum_{j=1}^N x_{ij} = 1 \text{ или } 0, \quad 1 \leq i \leq M; \\ x_{ij} \in \{0,1\}, \quad 1 \leq j \leq N, 1 \leq i \leq M. \end{aligned} \quad (11)$$

Для учета реального воздействия на линию  $(i, j)$  других линий в работе [4] используется эффективный коэффициент линии

$$G'_{ij} = \frac{G_{ij}}{\frac{N_0}{P_{\text{max}}} + \sum_{k \in S, k \neq i} G_{kj}},$$

где  $S \subseteq \{1, 2, 3, \dots, M\}$  – множество активных ретрансляторов, мощность излучения которых равна  $P_{\text{max}}$ . Тогда

$$\sum_{i \in S} \sum_{j=1}^N G'_{ij} x_{ij} \rightarrow \max$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} \sum_{i \in S} x_{ij} = 1 \text{ или } 0, \quad 1 \leq j \leq N; \\ \sum_{j=1}^N x_{ij} = 1 \text{ или } 0, \quad i \in S; \\ x_{ij} \in \{0,1\}, \quad 1 \leq j \leq N, i \in S. \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, (12) позволяет на данном множестве  $S$  получить множество соответствия  $X$ . Определенные в  $X$  подканалы будут характеризоваться лучшими соотношениями уровней сигналов и помех, что сможет обеспечить максимальную пропускную способность системы в целом.

Решение задачи распределения мощности между ретрансляторами осуществляется на основе полученного ранее множества соответствия  $X$ . Оптимизационная функция и система ограничений могут быть представлены в виде [4]:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left[ \frac{G_{ii} P_i}{N_0 + \sum_{j=1, j \neq i}^N G_{ji} P_j} \right], \quad (13)$$

$$\frac{G_{ii} P_i}{N_0 + \sum_{j=1, j \neq i}^N G_{ji} P_j} \leq \gamma_{\text{доп}}; \quad 0 \leq P_i \leq P_{\text{max}}. \quad (14)$$

Решение задачи осуществляется с помощью симплекс-метода [9]. Для этого вводятся дополнительные переменные [4; 9] и оптимизационная задача записывается следующим образом:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left[ \frac{G_{ii} P_i}{N_0 + \sum_{j=1, j \neq i}^N G_{ji} P_j} \right] \rightarrow \max \quad (15)$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} \frac{G_{ii}}{\gamma_{\text{доп}}} P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N G_{ji} P_j + s_i = N_0; \quad P_i + t_i = P_{\text{max}}; \\ P_i, s_i, t_i \geq 0, \quad 1 \leq i \leq |X|. \end{aligned}$$

Результаты моделирования доступа высокомобильных абонентов к базовой сети представлены на графиках (рис. 5 и 6) (исходные данные взяты из работы [4]).

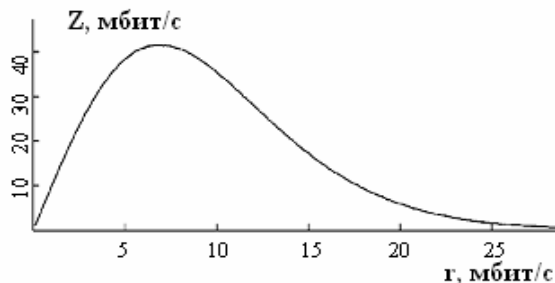


Рис. 5. Пропускная способность системы в зависимости от скорости передачи данных в линии связи

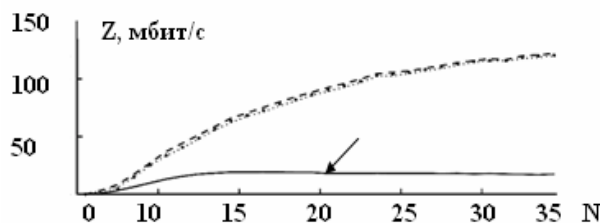


Рис. 6. Зависимость пропускной способности системы от числа антенн, установленных на подвижной платформе при заданном числе ретрансляторов

Анализ графика значений пропускной способности системы в зависимости от скорости передачи данных в линии связи (см. рис. 5) показывает, что мобильная система, движущаяся с высокой скоростью, не может управлять элементами базовой сети. Ретрансляторы же осуществляют передачу с максимально допустимой мощностью  $P_{\max}$  для снижения влияния внешних воздействий. Поэтому в ЗС должна определяться оптимальная скорость передачи данных в образуемых линиях для обеспечения максимальной пропускной способности системы. Из графика на рис. 5 следует, что максимум пропускной способности системы может быть получен при скорости передачи данных 7 Мбит/с.

Оптимальная пропускная способность системы зависит от взаимного расположения репитеров (повторителей) и антенн подвижной системы. Пропускная способность максимальна, когда удаление повторителей и антенн равно  $d_v$ , и минимальна, когда повторители и антенны лежат на половине пути друг между другом. Следовательно, оптимальная пропускная способность системы будет изменяться во времени, что потребует значительных затрат ресурсов управления.

Снижение амплитуды колебаний пропускной способности возможно за счет увеличения расстояний между повторителями, однако это достигается за счет

снижения общей пропускной способности. Повышение пропускной способности системы возможно путем увеличения числа используемых на подвижной платформе антенн до определенного значения (см. рис. 6). Это объясняется уменьшением расстояния между антеннами и усилением взаимного влияния соседних линий.

Таким образом, проблема обслуживания высокомобильных абонентов может быть решена с помощью технологии Mobile Hotspot, основанной на применении крупногабаритных и мощных антенных систем. Снижение частоты переключения между базовыми станциями происходит из-за того, что множество ретрансляторов, подключенных к ЗС, одновременно проводят передачу одинаковых сообщений. Исключение замираний в канале, возникающих вследствие взаимного влияния подканалов и доплеровского изменения частоты, осуществляется за счет эффективного распределения ЗС мощности передачи ретрансляторами и их взаимной удаленности, определения оптимальной скорости передачи информации в образуемых линиях и количества антенн, используемых на подвижной платформе.

#### Библиографические ссылки

1. Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. М. : Техносфера, 2009.
2. WiMAX – технология беспроводной связи: основы теории, стандарты, применение / В. С. Сюваткин [и др.] ; под ред. В. В. Крылова. СПб. : БХВ-Петербург, 2005.
3. IEEE 802.16e–2005 and IEEE 802.16–2004/Cor1–2005. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Part 16 : Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. Amend. 2 [Electronic resource]. URL: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.16e-2005.html> (дата обращения: 18.01.2012).
4. Daniel H., Shahrokh V. Information Raining and Optimal Link-Layer Design for Mobile Hotspots // IEEE Trans. on Mobile Computing. 2005. Vol. 4, № 3. P. 271–283.
5. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение : пер. с англ. 2-е изд., испр. М. : Вильямс, 2003.
6. Прокис Д. Цифровая связь : пер. с англ. / под ред. Д. Д. Кловского. М. : Радио и связь, 2000.
7. Ловас Л., Пламмер М. Прикладные задачи теории графов. Теория паросочетаний в математике, физике, химии / пер. с англ. Г. П. Гаврилова, В. В. Мартынюка, М. А. Никитиной ; под ред. Г. П. Гаврилова. М. : Мир, 1998.
8. Sang Wu, Stark K., Stark W. Performance Limits of Reed–Solomon Coded CDMA with Orthogonal Signaling in a Raleigh-Fading Channel // IEEE Trans. on Communications. 1998. Vol. 46, № 9. P. 1125–1134.
9. Таха Х. Введение в исследование операций : пер. с англ. М. : Мир, 1985.

**METHODS OF EFFECTIVIZATION OF HIGHLY MOBILE SUBSCRIBERS OPERABILITY  
IN A BROADBAND ACCESS NETWORK ON THE BASIS OF REALISATION OF TECHNOLOGY  
OF A DIVERSITY RECEPTION AND MOBILE PLATFORMS**

*In the article the authors offer a generalized scheme of highly mobile subscribers operability in a broadband access network and a method of estimation of its efficiency*

*Keywords: highly mobile subscribers, broadband access network, macro diversify handover, zone dispatchers.*

© Назаров С. Н., Ковалев Г. В., 2012

УДК 621.31:629.78

С. С. Пост, Ю. В. Краснобаев, А. В. Чубарь

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ  
ИМПУЛЬСНЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ**

*Рассмотрена энергетическая модель импульсного стабилизатора напряжения (ИСН), логика функционирования которой соответствует логике функционирования реального ИСН. Методика моделирования и исследования энергетических процессов в системах электропитания разработана с помощью системы автоматизированного проектирования OrCAD 9.2.*

*Ключевые слова: система электропитания, импульсный стабилизатор напряжения, энергетическая модель.*

Импульсные стабилизаторы напряжения (ИСН) широко применяются в автономных системах электропитания (СЭП). Они обеспечивают достижение таких противоречивых требований, как высокие удельные характеристики и высокое качество электроэнергии на выходе СЭП.

Энергетические характеристики ИСН: КПД и минимальное возможное напряжение между входом и выходом ИСН – в значительной мере определяют выполнение энергобаланса в СЭП и срок их функционирования.

**Постановка задачи.** Энергетические процессы в автономных СЭП в настоящее время целесообразно анализировать с помощью методов компьютерного имитационного моделирования. Это позволяет оценить:

– обеспечение энергобаланса в СЭП при известных энергетических характеристиках основных и буферных источников энергии и временной диаграмме энергопотребления со стороны нагрузки;

– обеспечение энергобаланса в СЭП в условиях деградационных изменений энергетических характеристик основных и буферных источников.

Для проведения такого анализа необходимо разработать энергетическую модель импульсного стабилизатора напряжения, логика функционирования которого соответствует логике функционирования реального ИСН [1], входящего в состав СЭП. Эта модель должна:

– обеспечивать стабилизацию выходного напряжения в номинальных режимах работы;

– обеспечивать ограничения выходного тока на заданном уровне при перегрузке с соответствующим понижением выходного напряжения;

– прерывать процесс стабилизации выходного напряжения при снижении входного напряжения ниже уровня напряжения стабилизации;

– изменять КПД в функции отношения выходного напряжения к входному и в функции изменения мощности нагрузки.

В модели должна быть предусмотрена возможность изменения уровня напряжения стабилизации, точности его поддержания, уровня тока ограничения и отклонения выходного тока от заданного в режиме тока ограничения.

Поставленную задачу можно решить, используя расчет мгновенных значений токов и напряжений [2]. В этом случае исследуется модель ИСН, состоящая из аналоговых элементов: конденсаторов, дросселей, диодов, транзисторов, работающих в ключевом режиме, и т. п. Однако такое исследование может растянуться на несколько десятков часов, что делает его непригодным для анализа энергетических процессов, занимающих значительные временные интервалы. Поэтому целесообразна разработка энергетических моделей ИСН, состоящих преимущественно из функциональных блоков и не учитывающих импульсный характер преобразования энергии в ИСН, что позволяет существенно снизить затраты времени.

**Модель импульсного стабилизатора напряжения.** Рассмотрим работу энергетической модели импульсного стабилизатора напряжения (рис. 1).