

УДК 621.395.7:004.728.3

## АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХЭНДОВЕРОВ В МОБИЛЬНЫХ СЕТЯХ LTE

**В. Г. Дроздова, Д. В. Завьялова**

*Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,  
drozdova\_vera@mail.ru, da2215@mail.ru*

Хэндовер – это важнейшая процедура, позволяющая абонентам мобильных сетей быть действительно мобильными. Это эстафетная передача обслуживания абонента между базовыми станциями для обеспечения непрерывного сервиса, успешность, которой – один из ключевых показателей эффективности любой сотовой сети. В мобильных сетях 4-го поколения LTE есть возможность автоматически регулировать параметры, влияющие на эффективность хэндоверов, с целью повышения их успешности, а также оптимизации сигнальной нагрузки на радиоподсистему сети. В рамках данной работы авторами была разработана имитационная модель эффективного алгоритма автоматической оптимизации хэндовера путем изменения его параметров на основании анализа статистики базовой станции.

*Ключевые слова:* хэндовер, LTE, оптимизация, имитационное моделирование.

## ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF HANDOVER KEY PERFORMANCE INDICATORS IN LTE MOBILE NETWORKS

**V. G. Drozdova, D. V. Zavyalova**

*Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences, Novosibirsk,  
drozdova\_vera@mail.ru, da2215@mail.ru*

The handover is the most important procedure which makes the mobile subscribers truly mobile. The customer service handover between base stations for continuous service provision, which success is one of the key performance indicators for any cellular network. In the 4<sup>th</sup> generation LTE mobile network there is a possibility of automatic parameters adjustment affecting the handover efficiency which improves its success rate and optimizes the radio subsystem load. In this paper a simulation model of the efficient algorithm of automatic handover optimization by changing its parameters based on base station statistics analysis is developed by the authors.

*Keywords:* handover, LTE, optimization, simulation.

**Введение.** LTE (Long Term Evolution) – это технология мобильной связи 4-го поколения, активно внедряющаяся операторами для предоставления абонентом высокоскоростного доступа в Интернет [1]. Отличительными функциями любой сети мобильной связи являются: хэндовер – эстафетная передача обслуживания пользовательского терминала UE (User Equipment) между базовыми станциями, а также роуминг – межоператорское соглашение, позволяющее абонентам одной сети использовать инфраструктуру сети другого оператора, находясь за пределами действия домашней сети. Именно благодаря этим функциям абоненты становятся мобильными.

Хэндовер – одна из наиболее сложных процедур в мобильной связи, конфигурируемая многочисленными параметрами на каждой базовой станции (радиоподсистема), и в настройках элементов подсистемы коммутации. Эффективность хэндовера оценивается с помощью таких показателей, как вероятность успешной подготовки к хэндоверу, вероятность успешного исполнения хэндовера и продолжительность самой процедуры. Оптимизация хэндовер-

ра, заключающаяся в улучшении значений перечисленных выше ключевых показателей эффективности (КПЭ), долгое время выполнялась инженерами операторов мобильной связи «вручную». Однако в сетях 4-го поколения активно внедряются алгоритмы самооптимизации КПЭ SON (Self-Organizing Network) [2]. В связи с этим разработка алгоритмов, оптимизирующих процедуру хэндовер в сетях LTE, приобретает особую актуальность.

Изучению вопросов самооптимизирующихся сетей и автоматической подстройке параметров хэндоверов посвящено множество публикаций [3–7]. В работе [3] авторами разработана имитационная модель в программной среде QualNet, с помощью которой изучается влияние на показатели эффективности двух параметров хэндовера – TTT (Time-To-Trigger) и Hys (Hysteresis). Авторы [4] делают акцент на оптимизацию листа сот-соседей NCL (Neighbour Cell List) на основании информации о расстоянии между базовыми станциями и углах наклона антенн в сотах. Описанный алгоритм позволяет удалять «ненужных» соседей на этапе запуска сети, однако не влияет на эффективность хэндовера в уже хорошо сконфигурированной сети. В [5–6] было выполнено имитационное моделирование алгоритмов самооптимизации хэндовера для случая гетерогенной сети (макро-, микро- и фемтосоты). Статья [7] посвящена оптимизации хэндоверов для LTE-сетей с помощью автоматической подстройки параметров TTT и запаса мощности с использованием методов нечеткой логики.

Перечисленные работы – это далеко не полный список публикаций, посвященных обозначенной тематике, что, безусловно, свидетельствует о ее актуальности. Однако по-прежнему отсутствуют результаты имитационного моделирования процедуры хэндовер в условиях, приближенных к реальным, позволяющие проанализировать влияние всех его параметров на КПЭ мобильных сетей LTE. В рамках данной статьи авторами была предпринята попытка оптимизации КПЭ сетей LTE с помощью максимально реалистичной имитационной модели, разработанной в программной среде MathCAD.

**Алгоритм и параметры хэндовера в LTE сетях.** На рис. 1 показана классификация хэндоверов в LTE сетях [8]. В рамках данной работы рассматриваются лишь хэндоверы между сотами внутри сети 4G. Хэндоверы между сетями LTE, 3G WCDMA (3<sup>rd</sup> Generation Wideband Code Division Multiple Access – технология сотовой связи 3-го поколения) и 2G GSM (2<sup>nd</sup> Generation Global System of Mobile – технология сотовой связи 2-го поколения) не являются объектом данного исследования.

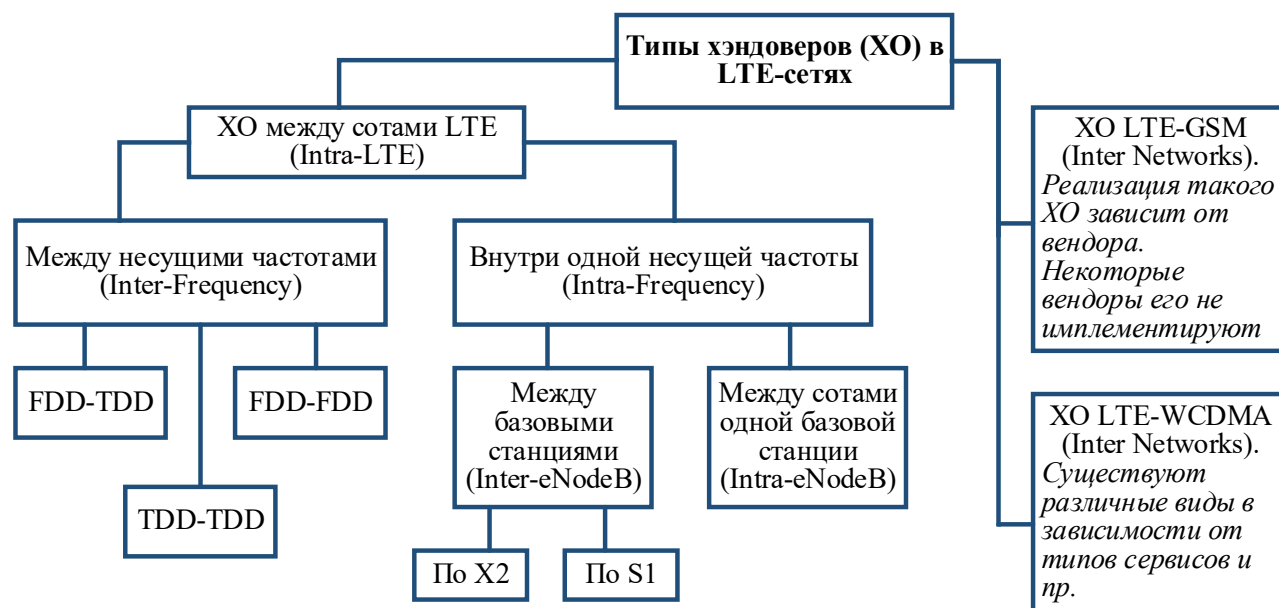


Рис. 1. Классификация хэндоверов в сетях LTE

Среди хэндоверов между LTE-сотами различают хэндоверы внутри одной несущей частоты и между разными несущими. Принцип действия этих хэндоверов одинаков, и основное отличие – это активация и осуществление измерений уровня RSRP (Reference Signal Received Power) и качества сигнала RSRQ (Reference Signal Received Quality) сот на разных частотах, требующие перестройки приемника мобильной станции на новую частоту. Кроме того, соты, работающие на разных несущих частотах, могут быть запущены в различных режимах дуплексирования восходящего и нисходящего каналов – FDD (Frequency Division Duplex – частотное дуплексирование) либо TDD (Time Division Duplex – временное дуплексирование каналов).

Хэндовер, выполняемый между базовыми станциями eNodeB, может происходить по интерфейсу X2 (логический интерфейс между eNodeB) либо по интерфейсу S1 (интерфейс между базовыми станциями и такими элементами системы коммутации как MME (Mobility Management Entity – элемент управления мобильностью) и обслуживающим шлюзом Serving Gateway).

Рассмотрим пошагово процедуру хэндовер [9]. На рис. 2 представлена временная диаграмма сообщений, которыми обмениваются элементы LTE-сети при выполнении хэндовера абонента между eNodeB по интерфейсу X2. Принцип хэндовера по S1 и передаваемые сообщения отличаются незначительно.

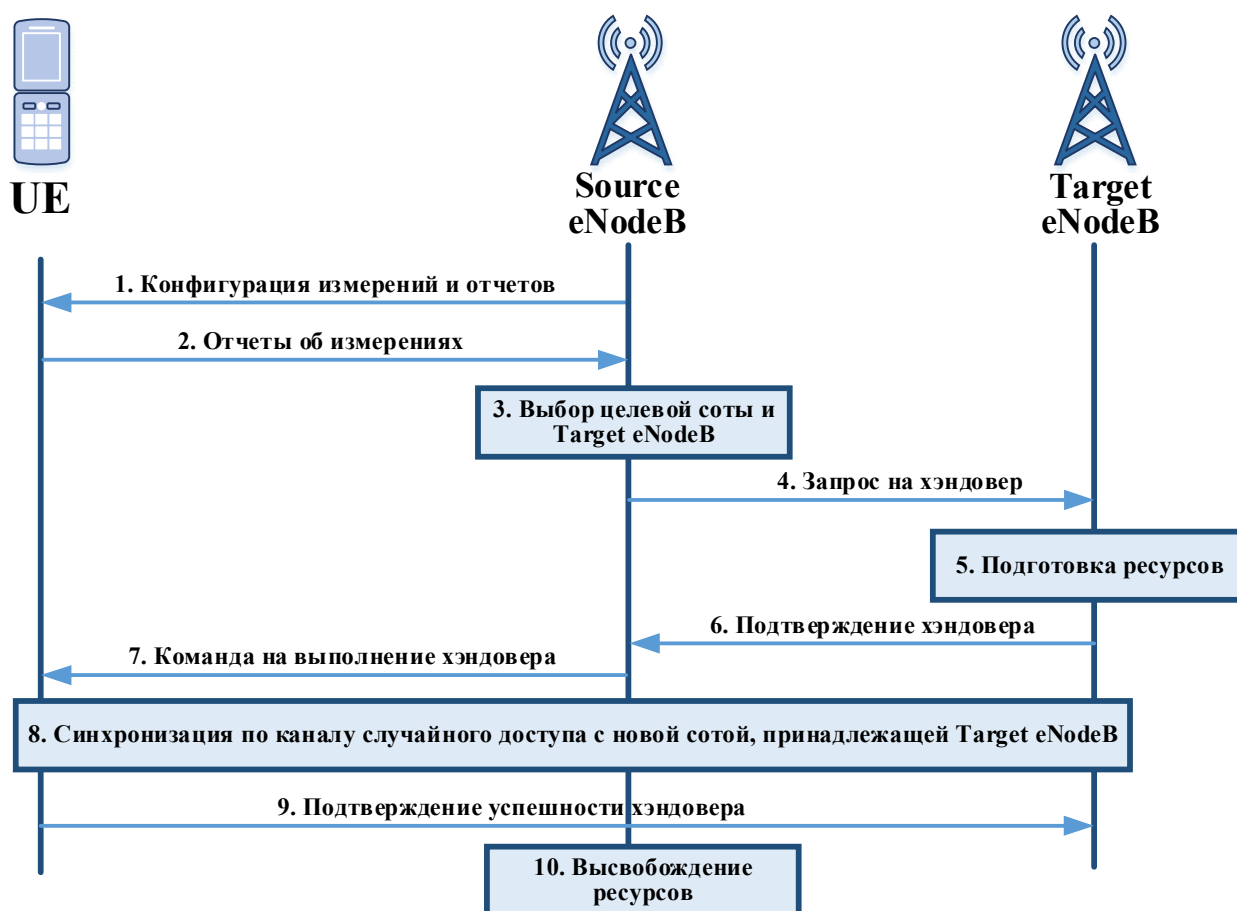


Рис. 2. Временная диаграмма хэндовера между eNodeB в сетях LTE

Прежде всего на каждой соте каждой базовой станции eNodeB инженерами оператора мобильной связи конфигурируются параметры хэндоверов, которые оказывают существенное влияние на эффективность этой процедуры. Данные параметры будут более детально описаны ниже. Информация о том, как сконфигурированы хэндоверы предоставляется аба-

нентам во время установления соединения в специальном сообщении. Во время активного соединения пользовательский терминал UE (User Equipment) производит измерения RSRP и RSRQ обслуживающей соты (Source – источник) и сот-соседей. Если уровень сигнала ухудшается и в окружении абонента есть сота с лучшим уровнем или качеством радиосигнала, то UE уведомляет об этом свою соту специальным отчетом. В отчете об измерениях может быть указана соседняя сота, чей сигнал лучше (Target – цель). На основании полученных отчетов об измерениях eNodeB принимает решение об инициации хэндовера и направляет соответствующий запрос соте, выбранной в качестве «цели», по интерфейсу X2 или S1.

Target eNodeB резервирует свои ресурсы для нового пользователя UE, в случае, если ее радиоинтерфейс и транспортные каналы свободны, уведомляет об этом Source eNodeB, откуда был получен запрос на хэндовер. Получив данное уведомление Source eNodeB посылает абоненту команду на выполнение хэндовера, т. е. открепление от обслуживающей соты и синхронизации с новой.

Успешно засинхронизировавшись с новой сотой, UE посылает ей сообщение, подтверждающее окончание хэндовера. Сообщения, отправляемые абонентами и базовой станцией на радиоинтерфейсе, описываются протоколом RRC (Radio Resource Control [9]). Если обмен сигнальных сообщений между базовыми станциями выполняется по интерфейсу X2, то он описывается протоколом X2AP [10]. Если же базовые станции обмениваются этими сообщениями по интерфейсу S1, то он описывается протоколом S1AP [11].

Рассмотрим подробнее, какими именно параметрами конфигурируются хэндоверы в сетях LTE. UE по стандарту 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project – организация, выполняющая стандартизацию сетей LTE) отправляет отчеты об измерениях в формате специальных сообщений ‘Measurement reports’ протокола RRC. События, которые инициируют отправку таких сообщений, делятся на две группы: А – для мобильности внутри сети LTE; В – для мобильности между сетями LTE и сетями других поколений. В рамках данной работы рассматривается только событие А3, являющееся основным триггером для активации хэндовера между сотами LTE. На рис. 3 показан общий принцип активации измерений, отсылки отчетов и параметры хэндовера А3.

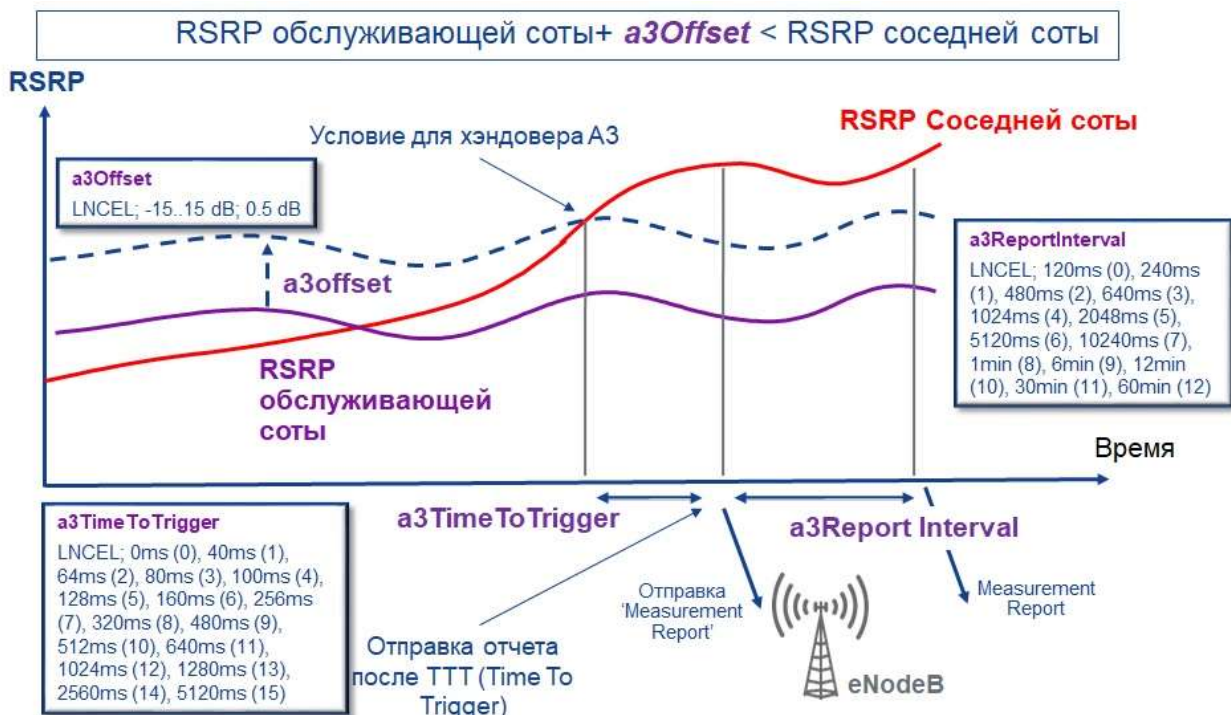


Рис. 3. Принцип и параметры А3-хэндовера в сетях LTE

Событие A3 происходит тогда, когда уровень сигнала RSRP от соседней eNodeB превосходит уровень сигнала от обслуживающей eNodeB на определенное значение ( $a3offset + Hyst$ ), конфигурируемое оператором (1):

$$Meas_{neighbor} \geq Meas_{serving} + Offset + Hyst, \quad (1)$$

где:  $Hyst$  – гистерезис, может принимать значения от 0 до 30 дБ;  $Meas_{neigh}$  – значение уровня мощности сигнала RSRP соседней базовой станции (БС), измеренное UE;  $Meas_{serv}$  – значение уровня мощности сигнала RSRP обслуживающей eNodeB, измеренное мобильным терминалом;  $a3Offset$  – значение, на которое сигнал соседней БС должен быть больше, чем сигнал обслуживающей БС для инициализации A3-хэндовера, значения которого могут варьироваться в интервале от -30 до +30 дБ.

Отправка отчетов о событии A3 прекращается, как только выполняется условие (2):

$$Meas_{neighbor} \geq Meas_{serving} + Offset - Hyst \quad (2)$$

Условие (1) должно выполняться в течение  $TTT$ , значение которого также задается параметром и варьируется от 0 до 5120 мс. Кроме того, существует параметр  $a3ReportInterval$ , определяющий, как долго абонент должен сообщать о том, что наступило событие A3 и требуется хэндовер (от 120 мс до 60 мин), в случае, если не наступает условие (2).

Стоит отметить, что для анализа производительности сети и для оптимизации хэндоверов имеет значение дополнительная классификация хэндоверов:

- своевременный ХО – ХО вовремя выполнен, без обрыва соединения;
- слишком ранний ХО –  $TTT$  имеет слишком маленькое значение и eNodeB слишком быстро принимает решение о необходимости ХО, не убедившись, что сигнал соседа действительно хороший;
- слишком поздний ХО –  $TTT$  имеет слишком большое значение, в результате чего абонент слишком поздно информирует eNodeB о необходимости ХО, и происходит обрыв соединения;
- Ping-Pong ХО – абонент на границе двух сот постоянно «перебрасывается» с одной соты на другую.

Оптимизация КПЭ ХО, как правило, нацелена на то, чтобы избежать большее количество последних трех типов хэндоверов и обеспечить высокую вероятность успешности своевременных хэндоверов.

**Имитационное моделирование и численные результаты.** В рамках данной статьи была разработана и реализована в программной среде MathCAD имитационная модель A3-хэндовера в сетях LTE. Параметры, используемые для конфигурации хэндовера, были описаны выше:  $Hyst$ ,  $a3Offset$ ,  $time-to-trigger$  ( $TTT$ ).

В ходе имитационного моделирования регистрировались и отслеживались следующие события, важные с точки зрения производительности хэндоверов:

- общее число неуспешных попыток позднего хэндовера (в результате происходит обрыв связи с Source eNodeB и не успевают установиться соединения с Target eNodeB);
- общее число неуспешных попыток раннего хэндовера (абонент UE не успевает синхронизироваться и успешно подключиться к Target eNodeB);
- общее число Ping-Pong ХО – показывает, как часто абонент переходит с соты на соту, находясь на их границе. Высокое значение этого показателя – свидетельство некорректной настройки хэндовера.

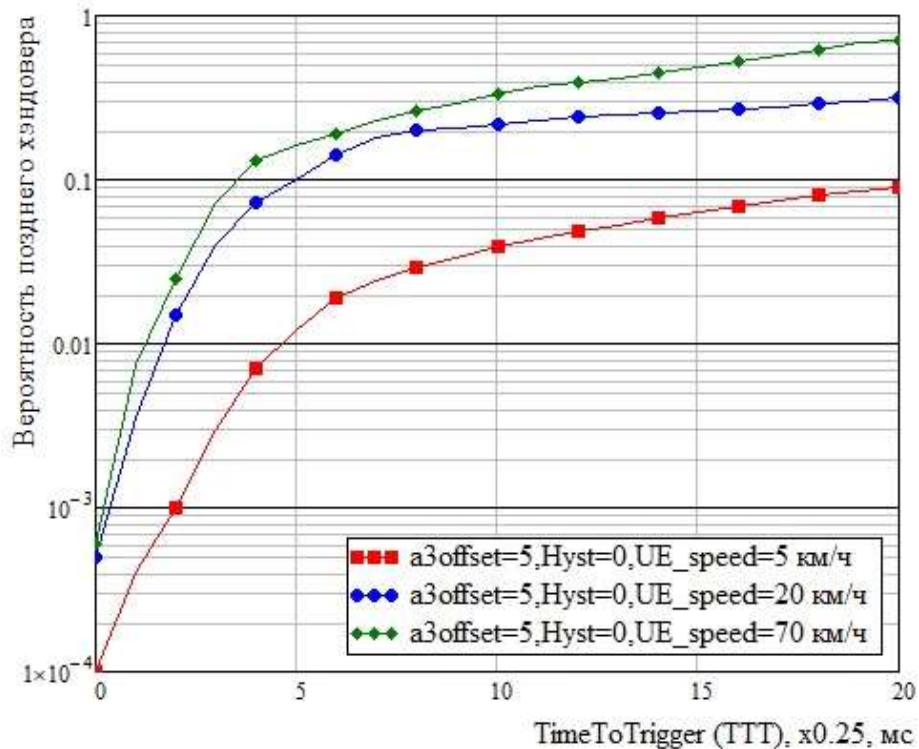
В таблице приведены значения входных параметров, принятых для имитационного моделирования. Имитационное моделирование хэндоверов выполнялось в 21-й соте (7 трехсекторных базовых станций), абоненты между которыми были распределены равномерно и двигались в случайных направлениях со скоростью, задаваемой в параметрах. Число абонентов в сети было принято равным 100, но стоит заметить, что в рамках данной модели абонентская нагрузка не влияет на успешность хэндовера, предполагается отсутствие перегрузок на базовых станциях (упрощающее допущение).

**Входные параметры**

Название параметра	Значение параметра
Мощность передатчика базовой станции	43 дБм
Несущая частота LTE	2 100 МГц
Ширина полосы частот в режиме FDD	15 МГц
Чувствительность приемника мобильной станции UE	-110 дБм
Чувствительность приемника базовой станции eNodeB	-120 дБм
Скорость движения абонента (UE_speed)	5, 10, 20, 70 км/ч
TimeToTrigger	0, 40, 60... 5 120 мс
Hyst	0,1... 30 дБ
A3Offset	-30... 30 дБ
Модель распространения сигнала	COST 231 Nata
Количество сот	21
Тип БС	трехсекторная
Число абонентов	100

С помощью разработанной имитационной модели были получены графики зависимостей вероятностей слишком поздних и слишком ранних хэндоверов от различных параметров системы, таких как скорость движения абонентов, *TTT*, *a2offset* и *Hyst*.

На рис. 4 показана зависимость вероятности позднего хэндовера от величины таймера *TTT* для разных скоростей движения абонентов и при фиксированном значении *a3offset* + *Hyst* = 5, основная проблема которого состоит в ухудшении уровня сигнала RSRP от обслуживаемой БС до критических значений, влекущих за собой обрыв соединения. При этом UE из-за некорректно настроенных параметров не успевает переключиться на целевую базовую станцию.



**Рис. 4. Вероятность слишком позднего А3-хэндовера в сетях LTE в зависимости от величины TTT и для разных скоростей движения абонентов UE**

Очевидно насколько сильно влияние величины  $TTT$  на вероятность успешности хэндовера. Чем больше выставлено значение таймера, тем выше вероятность позднего хэндовера. Кроме того, скорость движения абонентов играет существенную роль на данный показатель КПЭ. Если на сети доминирует трафик быстродвижущихся абонентов, значение  $TTT$  должно быть как можно ниже, чтобы избежать большого числа поздних хэндоверов.

На рис. 5 показаны зависимости вероятностей поздних и ранних хэндоверов от величины  $a3offset + Hyst$  при фиксированном коротком значении таймера  $TTT = 2$  мс и скоростях абонентов 10 и 50 км/ч.

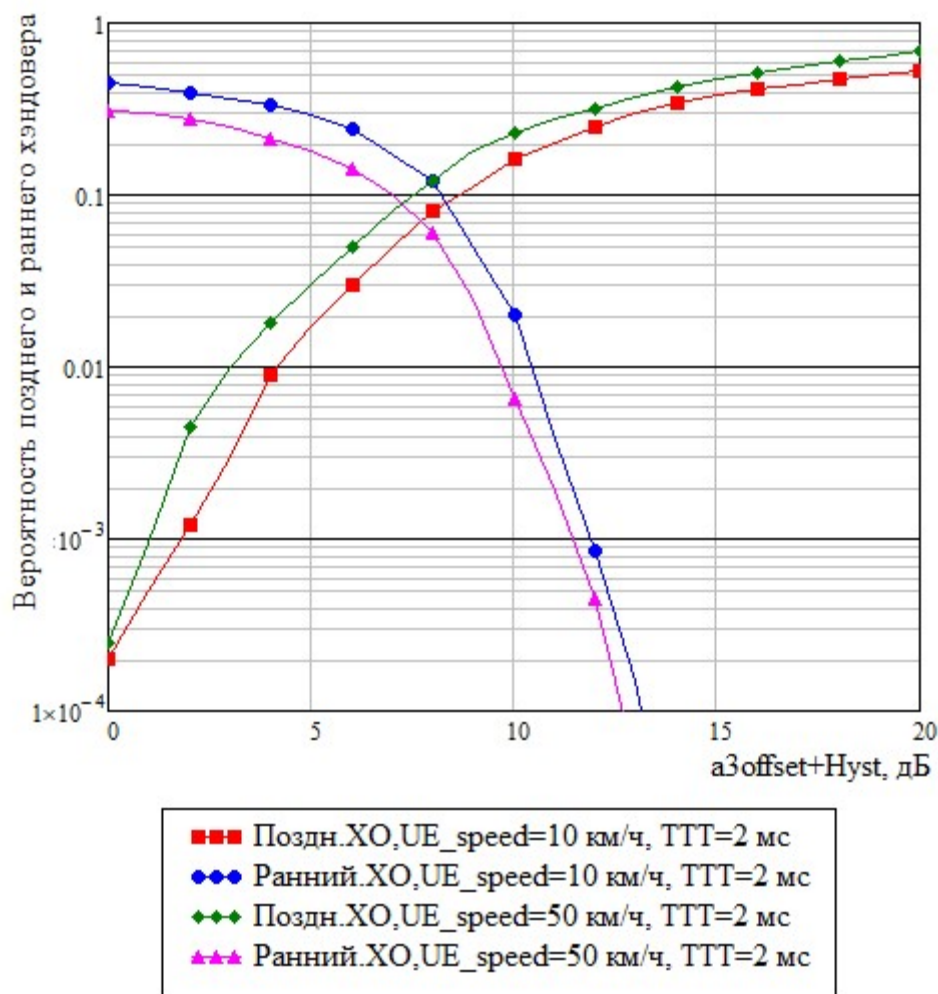


Рис. 5. Вероятность слишком позднего А3-хэндовера в сетях LTE в зависимости от величины  $TTT$  и для разных скоростей движения абонентов UE

Сумма параметров  $a3offset$  и  $Hyst$  определяет разницу уровней RSRP обслуживающей соты и соты-соседа, при которой после истечения  $TTT$  может произойти хэндовер. Очевидно, что если данная сумма меньше 7 дБ, то высока вероятность раннего хэндовера, если же она больше 7 дБ, то возрастает вероятность поздних хэндоверов. Таким образом, для данного сценария многопараметрической оптимизации, значение 7 дБ является близким к оптимальному.

**Заключение.** В рамках данной работы в программной среде MathCAD была разработана имитационная модель, позволяющая анализировать производительность хэндоверов абонентов между сотами в сети 4-го поколения мобильной связи LTE. Были получены такие численные характеристики производительности хэндоверов, как вероятности поздних и ранних хэндоверов в зависимости от их важнейших параметров  $TTT$ ,  $a3Offset$  и  $Hyst$ , а также для

различных скоростей движения пользователей. Результаты имитационного моделирования могут быть полезны при настройке параметров реальной сети. Зная доминирующую скорость передвижения мобильных терминалов UE, а также физическую конфигурацию базовых станций (число секторов, углы наклона антенн, радиус сот, мощность передатчика БС), можно выбрать оптимальные значения перечисленных выше параметров, снизив тем самым вероятность большого числа поздних и ранних хэндоверов в сети LTE.

### Литература

1. Sesia S., Toufik I., Baker M. LTE – The UMTS Long Term Evolution: from Theory to Practice. 2nd ed. N. Y. : A John Wiley & Sons Ltd., 2011. 794 p.
2. Hamalainen S., Sanneck H., Sartori C. LTE Self-Organising Networks (SON): Network Management Automation for Operational Efficiency. N. Y. : A John Wiley & Sons Ltd., 2011. 428 p.
3. Isa I. N. M., Baba M. D., Rahman R. A., Yusof A. L. Self-organizing network based handover mechanism for LTE networks // 2015 International Conference on Computer, Communications and Control Theory (I4CT), Kuching, Malaysia, 21–23 April, 2015. Kuching, 2015.
4. Duarte D., Vieira P., Rodrigues A., Martins A., Oliveira N., Varela L. Neighbour list optimization for real LTE radio networks // 2014 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile, Bali, Indonesia, 29–30 August, 2014. Bali, 2014.
5. Boujelben M., Rejeb S. B., Tabbane S. A novel self-organizing scheme for 4G advanced networks and beyond. The 2014 International Symposium on Networks, Computers and Communications, Hammamet, Tunisia, 17–19 June, 2014. Hammamet, 2014.
6. Buenestado V., Ruiz-Aviles J. M., Toril M., Luna-Ramirez S. Mobility Robustness Optimization in Enterprise LTE Femtocells // 2013 IEEE 77<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Dresden, Germany, 2–5 June, 2013. Dresden, 2013.
7. Munoz P., Barco R., Bandera I. On the potential of handover parameter optimization for Self-Organizing Networks // IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol. 62. Issue 5. June. 2013. P. 1895–1905.
8. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 4G LTE/LTE-Advanced for mobile broadband. N. Y. : Academic Press, 2011. 431 p.
9. ETSI TS136.331 v. 13.0.0, LTE : Evolved Universal Terrestrial (E-UTRA) ; Radio Resource Control (RRC), Release 13, 2016.
10. ETSI TS136.423 v. 13.0.0, LTE : Evolved Universal Terrestrial (E-UTRA) ; X2 Application Protocol (X2AP), Release 13, 2016.
11. ETSI TS136.413 v. 13.0.0, LTE : Evolved Universal Terrestrial (E-UTRA) ; S1 Application Protocol (S1AP), Release 13, 2016.