



УДК 621.396.94

КЛАССИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ СЕТЕЙ СОТОВОЙ СВЯЗИ СТАНДАРТА LTE

А. А. КАРПУК,
к. т. н., доцент, профессор кафедры
программного обеспечения сетей телекоммуникаций

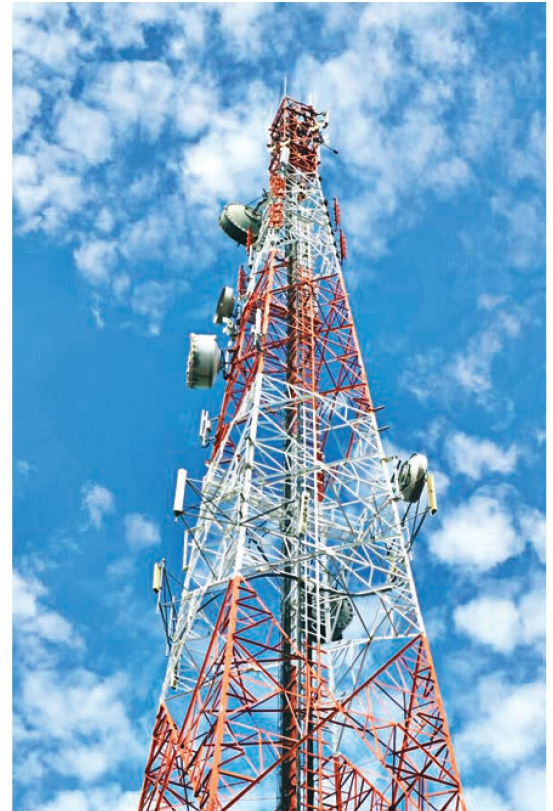
А. А. ГРИДАСОВА, аспирант

Рамадан Наср ДЭЛЬФ, аспирант

Белорусская государственная академия связи

Определены 22 ключевых показателя эффективности (КПЭ) сот сотовой сети связи стандарта LTE, требования к которым установлены в технических нормативно-правовых актах Республики Беларусь. Предложены методы нормализации полученных значений КПЭ путем их масштабирования к интервалу [0,1] и классификации состояния сот сети LTE на нормальное (Active), деградирующее (Degraded), критически деградирующее (Fault). Определены статистические модели, модели машинного обучения и нейросетевые модели глубокого обучения для прогнозирования значений показателей на следующий день по известным значениям показателей за последние 28 дней.

Ключевые слова: сотовая связь стандарта LTE, ключевые показатели эффективности (КПЭ), нормализация значений КПЭ, классификация состояния сот, прогнозирование состояния сот.



ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире насчитывается более 700 действующих сетей сотовой связи стандарта LTE (4G), охватывающих более 200 стран и территорий. Это делает стандарт LTE самым широко распространенным стандартом мобильной связи в истории, несмотря на стремительное развитие сетей стандарта 5G. Даже в странах, где активно внедряется 5G, сети LTE остаются основой мобильной инфраструктуры. Они обеспечивают стабильную связь, высокую скорость передачи данных и широкое покрытие, особенно в регионах с ограниченным доступом к более новым технологиям. В странах с развивающейся экономикой сеть LTE часто является единственной доступной сетью высокоскоростной мобильной связи, а для сетей 5G в развитых

странах – резервной. Полный перечень услуг сетей LTE и метод определения зоны доступности каждой услуги можно найти в работе [1].

Для устранения недостатков в работе отдельных сот сетей LTE операторы должны иметь технические и программные средства анализа, классификации и прогнозирования состояния каждой работающей соты (нормальное (Active), деградирующее (Degraded), критически деградирующее (Fault)). Причинами деградации соты могут быть уменьшение мощности передатчика базовой станции, изменение угла наклона антенны, увеличение нагрузки на соту, изменение условий распространения радиосигнала в соте (появление препятствий или электромагнитных помех), сбой хэндовера на границах соты.



КЛЮЧЕВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ (КРІ)

В действующих ТНПА Республики Беларусь [2, 3] услуги сетей стандарта LTE разбиты на 2 класса:

услуги телефонного радиосоединения и услуги передачи данных.

КРІ УСЛУГ ТЕЛЕФОННОГО РАДИСОЕДИНЕНИЯ:

- доля неуспешных вызовов от общего количества вызовов (КРІ1);
- доля вызовов, не удовлетворяющих нормативам по времени установления соединения (не более 10 с) (КРІ2);
- доля вызовов, окончившихся разъединением установленного соединения не по инициативе абонента (КРІ3);
- доля переданных образцов речи, не удовлетворяющих нормативам по качеству передачи речи (КРІ4);
- средняя балльная оценка качества передачи речи (КРІ5).

КРІ УСЛУГ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ:

- доля неуспешных соединений передачи данных от общего количества попыток передачи данных по направлению к абоненту (КРІ6);
- доля соединений, не удовлетворяющих нормам по времени задержки передачи IP-пакетов (не более 400 мс) (КРІ7);
- коэффициент потери IP-пакетов (КРІ8);
- доля соединений со скоростью передачи данных менее 1 Мбит/с по направлению к абоненту (КРІ9);
- доля соединений со скоростью передачи данных менее 1 Мбит/с по направлению от абонента (КРІ10);
- доля соединений со скоростью передачи данных менее 5 Мбит/с по направлению к абоненту (КРІ11);
- средняя скорость передачи данных по направлению к абоненту (КРІ12);
- средняя скорость передачи данных по направлению от абонента (КРІ13);
- доля соединений передачи по направлению к абоненту с измеренным значением отношения сигнал/шум менее 0 дБ (КРІ14);
- доля соединений передачи данных, не удовлетворяющих нормам по времени задержки передачи IP-пакетов (не более 150 мс) (КРІ15).

Кроме того, для **УСЛУГ ПЕРЕДАЧИ ВИДЕО И ЗАГРУЗКИ ВЕБ-СТРАНИЦ** установлены нормы на значения следующих показателей качества:

- доля неуспешных воспроизведений видео (КРІ16);
- средняя балльная оценка качества воспроизведения видео (КРІ17);
- доля воспроизведений видео, не удовлетворяющих нормативам по времени начала воспроизведения (не более 10 с) (КРІ18);
- среднее время начала воспроизведения видео (КРІ19);
- доля неуспешных загрузок веб-страниц (КРІ20);
- среднее время загрузки веб-страниц (КРІ21);
- доля загрузок веб-страниц, не удовлетворяющих нормативам по времени загрузки (не более 6 с) (КРІ22).

В ТНПА предусмотрен **контроль выполнения норм на значения показателей качества услуг сетей стандарта LTE методами контрольных вызовов (соединений), анализа статистических данных и анализа обращений абонентов.** При этом для контроля норм на значения показателей качества КРІ1, КРІ3, КРІ6, КРІ16 и КРІ20 могут применяться методы контрольных вызовов (соединений) и методы анализа статистических данных, а для контроля норм на значения остальных перечисленных выше показателей качества – только методы контрольных вызовов (соединений).

В соответствии с требованиями ТНПА значения показателей качества услуг сетей LTE для каждого оператора сотовой связи вычисляются за каждый квартал и публикуются на портале ХВАЛЯ.БЕЛ [4]. За третий квартал 2025 года по усредненным данным в целом по стране у оператора МТС не выполнены нормы на значения показателя качества КРІ11,

у оператора А1 – на значения показателей качества КРІ8, КРІ9, КРІ10 и КРІ11, у оператора life:) – на значения показателей качества КРІ1, КРІ2, КРІ4, КРІ9 и КРІ11. Если усреднение провести только по городам и поселкам городского типа, то в целом все операторы обеспечивают выполнение норм на значения всех показателей качества услуг сетей стандарта LTE. **Однако имеются десятки случаев неуспешного вызова и аварийного разъединения телефонного радиосоединения, сотни неуспешных попыток воспроизведения видео и загрузки веб-страниц, тысячи неуспешных попыток передачи данных абоненту, тысячи случаев потери IP-пакетов и нарушения нормативов по скорости передачи данных, Эти недостатки могут быть вызваны ошибками при планировании сети, отказами или сбоями в работе оборудования отдельных сот, изменением условий распространения радиоволн в отдельных сотах, изменением абонентской нагрузки в отдельных сотах.**

КЛАССИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ СОТ СЕТЕЙ LTE

Покажем, как для классификации состояния сот сетей LTE можно использовать значения KPI, соответствующих показателям качества, на значения которых установлены нормы в ТНПА Республики Беларусь. В сентябре 2025 года в стране работало около семи тысяч базовых станций сетей стандарта LTE, поэтому невозможно получить значения требуемых показателей качества за некоторый временной интервал для каждой соты методом контрольных вызовов (соединений). В ТНПА предусмотрена возможность контроля значений ряда KPI методом анализа статистических данных, накопленных в системе учета оператора за каждый квартал. Покажем, что значения всех KPI за требуемый временной интервал для каждой соты можно автоматически получить из статистических данных, имеющихся у оператора. Крупнейшие поставщики телекоммуникационного оборудования для сетей LTE Huawei, Ericsson, ZTE, Nokia предлагают собственное программное обеспечение (ПО) системы эксплуатационной поддержки (Operations Support System, OSS) для автоматизации процессов управления сетью и сетевым оборудованием. В состав OSS входят модули управления ресурсами сети (Inventory Management), управления производительностью (Performance Management), контроля качества обслуживания (SLA Management), обнаружения и устранения неисправностей (Fault Management) и другие. В модуле Performance Management можно настроить вычисление значений требуемых KPI за каждый временной интервал (5 минут, 15 минут или 1 час) для каждой соты.

Конкретные методы настройки OSS на выдачу значений требуемых KPI, состав доступных KPI и их наименования, форматы выдаваемых данных зависят от производителя OSS и версий ПО серверной платформы управления и мониторинга и ПО базовых станций. Поскольку в Беларуси основным поставщиком телекоммуникационного оборудования для сетей LTE является компания Huawei, в дальнейшем изложении будем ориентироваться на OSS с серверной платформой Huawei iManager U2020 V5 и ПО базовых станций eRAN 18.0 (LTE FDD). **В OSS Huawei iManager U2020 V5 для базовых станций eRAN 18.0 (LTE FDD) можно получить для каждой соты за каждый временной интервал длительностью 15 минут, 1 час или 24 часа все соответствующие показателям качества значения KPI, на которые установлены нормы в ТНПА.** Выходной KPI-файл от OSS может быть представлен в формате CSV или в формате Excel. Значения KPI в этом файле представлены в тех единицах, в которых они вычисляются (% , баллы, Мбит/с, с).

Для классификации состояния сот по полученным значениям KPI эти значения следует нормализовать путем масштабирования к диапазону [0;1], где значение 1 соответствует лучшему значению KPI. Для нормализации воспользуемся приемом, описанным в отчете [5]. Для KPI с номером $i \in \overline{1,22}$ через c_i обозначим максимальное (если

не более) или минимальное (если не менее) допустимое значение KPI из ТНПА (оно соответствует значению 0,5 нормализованного значения KPI), через a_i обозначим лучшее возможное значение KPI (оно соответствует значению 1 нормализованного значения KPI) и через b_i обозначим худшее возможное значение KPI (оно соответствует значению 0 нормализованного значения KPI). Если значение KPI измеряется в % и в ТНПА задано максимальное допустимое значение KPI, то положим $a_i = 0$ и $b_i = 2c_i$. Если значение KPI измеряется в % и в ТНПА задано минимальное допустимое значение KPI, то положим $a_i = 100$ и $b_i = 2c_i - 100$. Если значение KPI измеряется в баллах или Мбит/с, то в ТНПА задается минимальное допустимое значение KPI, в качестве b_i выбирается такое значение KPI, при котором сота считается аварийной, а величина a_i вычисляется по формуле $a_i = 2c_i - b_i$. Если значение KPI измеряется в с, то в ТНПА задается максимальное допустимое значение KPI, в качестве b_i выбирается такое значение KPI, при котором сота считается аварийной, но при этом должно выполняться условие $b_i \leq 2c_i$, чтобы величина a_i , также вычисляемая по формуле $a_i = 2c_i - b_i$, не оказалась отрицательной.

Через f_i обозначим фактическое значение KPI с номером i , тогда нормализованное значение KPI вычисляется по формуле $n_i = (f_i - b_i) / (a_i - b_i)$. Если в результате получим $n_i < 0$, то положим $n_i = 0$, а если получим $n_i > 1$, то положим $n_i = 1$. Классификация состояния сот сети LTE может выполняться по нормализованным значениям всех KPI или по интегральным нормализованным значениям качества услуги телефонного радиосоединения (IPI1) и услуг передачи данных (IPI2). Нормализованное значение IPI1 вычисляется на основе нормализованных значений KPI1, ..., KPI5, нормализованное значение IPI2 – на основе нормализованных значений KPI6, ..., KPI22 с использованием весовых коэффициентов w_i , по формулам:

$$IPI1 = \sum_{i=1}^5 w_i n_i, \quad IPI2 = \sum_{i=6}^{22} w_i n_i.$$

В таблице приведены предлагаемые значения величин c_i , a_i , b_i и w_i для всех 22 KPI, полученные на основе ТНПА и отчета [5], а также указаны наименования этих KPI или способы их получения в OSS Huawei iManager U2020 V5 для базовых станций eRAN 18.0 (LTE FDD). Информация, приведенная в последнем столбце, получена из технической документации Huawei для базовых станций eRAN 18.0 (LTE FDD). Для других базовых станций наименования счетчиков и KPI могут быть другими.

При классификации состояния сот сети LTE по нормализованным значениям всех KPI, если в течение двух подряд одночасовых интервалов значения хотя бы одного из KPI меньше 0,5, отнесем состояние соты к классу Fault. Если в течение трех подряд одночасовых интервалов значения хотя бы одного из KPI убывают и лежат в интервале



Номер KPI, i	Единица измерения	c_i	a_i	b_i	w_i	Наименование или получение KPI в OSS Huawei
1	%	6	0	12	0,24	100 - VS_VOLTE_CSST_SUC
2	%	5	0	10	0,09	VS_VOLTE_CSST_GT10S
3	%	3	0	6	0,27	VS_VOLTE_DROP_RATE
4	%	6	0	12	0,24	VS_VOLTE_SPEECH_BAD_FRM_RATE
5	Балл	3,2	4,2	2,2	0,16	VS_VOLTE_MOS_AVG
6	%	10	0	20	0,15	100 - VS_ERAB_ACC_SR
7	%	7	0	14	0,09	VS_IP_DL_PKT_DELAY_GT400_RATIO, при отсутствии создать в KPI Designer по счетчикам VS.IpDLPktNum_T>400ms и VS.IpDLPktNum
8	%	3	0	6	0,06	VS_IP_DL_LOSS_RATE
9	%	10	0	20	0,05	Создать в KPI Designer по счетчикам VS.DIUeThpSampleNum_T1 и VS.DIUeThpSampleNum
10	%	20	0	40	0,04	Создать в KPI Designer по счетчикам VS.UIUeThpSampleNum_T1 и VS.UIUeThpSampleNum
11	%	30	0	60	0,03	Создать в KPI Designer по счетчикам VS.DIUeThpSampleNum_T1, VS.DIUeThpSampleNum_T2, VS.DIUeThpSampleNum_T3 и VS.DIUeThpSampleNum
12	Мбит/с	5	9	1	0,02	VS_DL_UE_THRP_AVG
13	Мбит/с	3	5	1	0,02	VS_UL_UE_THRP_AVG
14	%	10	0	20	0,02	Создать в KPI Designer по счетчикам VS.DISinrSampleNum_T1, VS.DISinrSampleNum_T2 и VS.DISinrSampleNum
15	%	30	0	60	0,02	Создать в KPI Designer по счетчикам VS.DllpPktDelaySampNum_T1, VS.DllpPktDelaySampNum_T2, VS.DllpPktDelaySampNum_T3 и VS.DllpPktDelaySampNum
16	%	20	0	40	0,15	VIDEO_PLAY_FAIL_RATIO, при отсутствии создать в KPI Designer по счетчикам VS.VideoPlaySuccNum и VS.VideoPlayReqNum
17	Балл	3,0	4,5	1,5	0,09	Создать в KPI Designer по счетчикам VS.VideoMOS_Sum и VS.VideoMOS_Num
18	%	10	0	20	0,03	VS_VIDEO_STARTUP_GT10S_RATIO, при отсутствии создать в KPI Designer по счетчикам VS.VideoStartDelaySampNum_T6 и VS.VideoStartDelaySampNum
19	с	3	1	5	0,03	VS_VIDEO_STARTUP_DELAY_AVG, при отсутствии создать в KPI Designer по счетчикам VS.VideoStartDelaySum и VS.VideoStartDelayNum
20	%	30	0	60	0,06	VS_WEB_PAGELOAD_FAIL_RATIO, при отсутствии создать в KPI Designer по счетчикам VS.WebPageFailNum и VS.WebPageReqNum
21	с	6	2	10	0,08	WEB_PAGELOAD_DELAY_AVG, при отсутствии создать в KPI Designer по счетчикам VS.WebPageLoadDelaySum и VS.WebPageLoadSuccNum
22	%	25	0	50	0,06	WEB_PAGELOAD_DELAY_GT6S_RATIO, при отсутствии создать в KPI Designer по счетчикам VS.WebPageLoadDelaySampNum_T6_8s, VS.WebPageLoadDelaySampNum_T8_10s и VS.WebPageLoadDelaySampNum_T10s_inf

Таблица. Параметры нормализации по ТНПА и получение KPI в OSS Huawei

от 0,5 до 0,6, – к классу Degraded. Состояние соты, которое не попадает в классы Fault или Degraded, отнесем к классу Active. При классификации состояния сот сети LTE по интегральным нормализованным значениям качества услуги телефонного радиосоединения и услуг передачи данных, если в течение двух подряд одночасовых интервалов значения

хотя бы одного из IPI1 или IPI2 меньше 0,5, отнесем состояние соты к классу Fault. Если в течение трех подряд одночасовых интервалов значения хотя бы одного из IPI1 или IPI2 убывают и лежат в интервале от 0,5 до 0,6, – к классу Degraded. Состояние соты, которое не попадает в классы Fault или Degraded, отнесем к классу Active.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ СОТ СЕТЕЙ LTE

Прогнозирование состояния сот сетей LTE сводится к прогнозированию нормализованных значений KPI на заданное количество часов

и классификации состояния сот по полученным прогнозируемым значениям KPI. Будем считать, что для рассматриваемой соты сети LTE OSS выдает

значения всех перечисленных выше KPI с интервалом в 1 час. Соберем нормализованные значения KPI за 4 недели (28 дней) в матрицу размерности 672 x 22. Требуется получить прогнозируемые нормализованные значения KPI на каждый час следующего дня с учетом взаимосвязей между значениями KPI. На первом этапе следует выделить те KPI, нормализованные значения которых имеют «плоское» распределение. Для этого для каждого KPI надо вычислить среднее значение и стандартное отклонение. Если стандартное отклонение значений некоторого KPI меньше 0,025, то абсолютное большинство значений этого KPI отличается от среднего значения не более чем на 0,05, и в качестве прогнозируемых значений для таких KPI можно взять средние значения. Такие KPI исключаются из дальнейшей обработки путем удаления соответствующих столбцов из матрицы значений KPI.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье выделены 22 ключевых показателя эффективности работы сот сетей сотовой связи стандарта LTE, к значениям которых установлены требования в технических нормативно-правовых актах Республики Беларусь. Показано, что средствами системы эксплуатационной поддержки сети LTE можно получить значения этих показателей за требуемый временной интервал для каждой соты.

Предложен метод нормализации полученных значений показателей путем их масштабирования к интервалу [0;1]. При этом методе нормализации значение показателя удовлетворяет установленным

требованиям, если нормализованное значение показателя не меньше 0,5. Предложен метод классификации состояния сот сети LTE на нормальное (Active), деградирующее (Degraded), критически деградирующее (Fault). Определены статистические модели, модели машинного обучения и нейросетевые модели глубокого обучения для прогнозирования значений показателей на следующий день по известным значениям показателей за последние 28 дней и прогнозирования состояния сот сетей LTE на основе полученных значений показателей. **BC**

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Карпук, А. А. Определение зоны уверенного приема для сетей сотовой подвижной электросвязи стандарта LTE / А. А. Карпук, Н. И. Кабак, А. В. Говорко // Проблемы инфокоммуникаций. – 2021. – № 1 (13). – С. 56–63.
2. Услуги сотовой подвижной электросвязи. Требования к качеству и методы контроля = Паслугі сатавай рухомай электрасувазі. Патрабаванні да якасці і метады кантролю: СТБ 1904-2022. – Взамен СТБ 1904-2011; введ. 01.06.2023. – Минск: Госстандарт: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2022. – IV, 25 с.
3. Услуги сотовой подвижной электросвязи. Требования к качеству и методы контроля = Паслугі сатавай рухомай электрасувазі. Патрабаванні да якасці і метады кантролю: Изменение № 1 СТБ 1904-2022. – Введ. 01.12.2024. – Минск: Госстандарт: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2024. – III, 11 с.
4. Параметры и показатели качества услуг сотовой подвижной электросвязи // Хвала. – URL: <https://xn--80ad2a0b1c.xn--90ais/quality-indicators/> (дата обращения: 08.08.2025).
5. Разработка научно обоснованных требований к параметрам и показателям качества услуг сотовой подвижной электросвязи в сетях LTE и 5G: отчет о НИР (заключ.) / Белорус. гос. академия связи; рук. А. А. Карпук; исполн.: А. А. Лапцевич, О. Ю. Горбадей, П. Ю. Лакизо [и др.]. – Минск, 2022. – 241 с. – № ГР 20221054.

Twenty-two key performance indicators (KPIs) of LTE cellular network cells, for which requirements are established in the technical regulatory legal acts of the Republic of Belarus, have been identified. Methods are proposed for normalizing the obtained KPI values by scaling them to the interval [0,1] and for classifying the state of LTE network cells as normal (Active), degraded (Degraded), or critically degraded (Fault). Statistical models, machine learning models, and deep learning neural network models were defined to predict the values of indicators for the next day based on known values of indicators for the past 28 days.

Keywords: LTE cellular communication, key performance indicators (KPIs), KPI normalization, cell state classification, cell state prediction.

Статья поступила в редакцию 27.11.2025.