

## Влияние дрейфа часов на эффективность механизмов энергосбережения в сетях Wi-Fi<sup>1</sup>

Е.А. Степанова<sup>\*,\*\*</sup>, Д.В. Банков<sup>\*,\*\*\*</sup>, Е.М. Хоров<sup>\*,\*\*\*</sup>, А.И. Ляхов<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва

<sup>\*\*</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва

<sup>\*\*\*</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва

Поступила в редколлегию 26.10.2022 г.

**Аннотация**—Снижение энергопотребления устройств является важной проблемой для современных сетей Wi-Fi. Для решения данной проблемы еще в первой версии стандарта Wi-Fi был представлен базовый механизм энергосбережения. В то же время новые дополнения IEEE 802.11ax и IEEE 802.11ba описывают современные механизмы энергосбережения: механизм целевого времени активности TWT (от англ.: Target Wake Time) и пробуждающий интерфейс WUR (от англ.: Wake-Up Radio). Основной идеей перечисленных механизмов является периодическое отключение основного радиоинтерфейса для снижения энергопотребления за счет отсутствия прослушивания канала. Однако влияние эффекта дрейфа часов, т.е. случайного отклонения часов станций с течением времени, может значительно ухудшать эффективность механизмов TWT и WUR, использующих расписание интервалов активности. Базовый механизм энергосбережения в намного меньшей степени подвержен влиянию эффекта дрейфа часов из-за периодической синхронизации при прослушивании биконов — управляющих кадров, содержащих информацию о сети. Для оценки эффективности упомянутых механизмов энергосбережения была использована платформа имитационного моделирования ns-3. Показано, что механизмы TWT и WUR позволяют достичь более низких показателей энергопотребления и задержки на доставку кадров, чем базовый механизм энергосбережения, даже при учете влияния эффекта дрейфа часов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Энергосбережение, TWT, WUR, дрейф часов, сети Wi-Fi.

**DOI:** 10.53921/18195822\_2022\_22\_4\_261

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время технология Wi-Fi является одной из самых популярных технологий беспроводной передачи данных. Модули Wi-Fi устанавливаются как на пользовательские устройства (ноутбуки, планшеты, смартфоны), так и на устройства Интернета вещей (умные чайники, светильники, счетчики воды, датчики движения и т.д.), из-за чего среднестатистический пользователь может легко создать домашнюю гетерогенную сеть Wi-Fi. Отличительной чертой таких сетей является дифференцирование требований к качеству обслуживания для различных видов устройств. Обычно пользовательские устройства не предъявляют строгих требований к энергосбережению, однако они могут периодически генерировать насыщенные потоки данных (в этом случае устройство постоянно имеет кадры на передачу), для чего требуют высокие скорости передачи и низкие задержки. Примером такого поведения может служить видеоконференция, в которой одновременно участвуют несколько человек, используя различные устройства и располагаясь в зоне покрытия одной точки доступа. С другой стороны в

<sup>1</sup> Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ

сети могут присутствовать какие-либо устройства, которые не очень часто получают данные от точки доступа и предъявляют строгие требования к уровню энергопотребления. Примером может служить смартфон, на который иногда приходят оповещения.

Главным образом для устройств Wi-Fi разрабатываются и внедряются механизмы, нацеленные на увеличение скорости передачи данных. К таким механизмам относятся более сложные сигнально-кодовые конструкции и новые механизмы передачи данных, к примеру механизм многопользовательских передач MIMO (от англ. Multiple Input Multiple Output) или неортогональный множественный доступ NOMA (от англ. Non-Orthogonal Multiple Access), которые требуют достаточно сложной обработки сигналов и активной работы устройств, что приводит к увеличению энергопотребления. Соответственно, одновременное удовлетворение требований по скорости передачи данных и ограничений по уровню энергопотребления для различных устройств является сложной задачей. В большинстве устройств Wi-Fi реализован базовый механизм энергосбережения, основанный на периодическом прослушивании биконов — специальных кадров, рассылаемых точкой доступа и содержащих информацию о сети, в частности, информацию о наличии или отсутствии у точки доступа буферизованных кадров для энергосберегающих станций. Если буферизованных кадров нет, станция переходит в спящий режим и выключает радиointерфейс до следующего бикона, а если есть, то она должна отправить запрос на получение данных. Отметим, что недостатком данного механизма является использование стандартного метода случайного доступа к каналу в сетях Wi-Fi для отправки запроса данных, так как его эффективность ухудшается с увеличением числа станций в сети.

Для решения этой проблемы был разработан механизм энергосбережения APSD (от англ. Automatic Power Save Delivery). При его использовании передачи запросов не привязаны к моментам передачи биконов или не используются вовсе, что позволяет снизить конкуренцию за доступ к каналу. Однако механизм APSD, как и базовый механизм энергосбережения, предназначен для доставки кадров от точки доступа энергосберегающим станциям, в то время как в обратном направлении кадры отправляются с использованием стандартного метода случайного доступа к каналу, что приводит к тратам энергии на конкуренцию за доступ к каналу и прислушивание чужих передач. Также отметим, что при нахождении энергосберегающей станции в режиме сна для отправки кадра ей не достаточно просто перейти в активный режим: станция после пробуждения должна прослушивать канал до успешного получения кадра, чтобы случайно не попасть в коллизию с передачей, которую не получается задетектировать. Все это делает данные механизмы малоэффективными или неприменимыми вовсе в сценариях двунаправленных передач или передач от энергосберегающих станций точке доступа.

Именно поэтому последние вышедшие дополнения к стандарту Wi-Fi содержат механизмы, нацеленные на заметное снижение энергопотребления устройств в сценариях двунаправленных передач. В частности, вышедшее в 2021 году дополнение IEEE 802.11ax [1] к стандарту Wi-Fi включает механизм целевого времени активности TWT (от англ. Target Wake Time), который позволяет станции и точке доступа заранее запланировать время обмена кадрами. В оставшееся время станция может выключить свой радиointерфейс для экономии энергии. Механизм TWT взял лучшие идеи от механизма APSD и развил их для предоставления необходимого уровня энергопотребления станциям как при приеме кадров от точки доступа, так и при отправке ей кадров. Дополнение IEEE 802.11ba [2] предлагает иной подход к энергосбережению — использование пробуждающего интерфейса WUR (от англ. Wake-Up Radio). При его использовании основной радиointерфейс выключен и не потребляет энергию, а для обмена данными точка доступа отправляет на дополнительный маломощный приемник WUR станции специальный кадр пробуждения, получив который, станция включает основной радиointерфейс. Для еще большего энергосбережения дополнительный радиointерфейс также может отключаться на время, кроме заранее оговоренного с точкой доступа интервала.

Следует отметить, что все описанные подходы к энергосбережению используют периодическое отключение основного радиointерфейса. Если радиointерфейс отключен, то он не передает и не принимает никакие кадры, в том числе биконы. Это может оказаться проблемой, если точка доступа изменит какие-либо параметры сети, а также из-за того, что часы реальных устройств несовершенны. Такое несовершенство является причиной эффекта дрейфа часов, который заключается в том, что часы устройств со временем могут произвольным образом отклоняться. Отметим, что стандарт Wi-Fi позволяет отклонение в 100 ppm, т.е. для интервала 100 мс отклонение может достигать 10 мкс, что больше длительности минимального пустого слота в сети IEEE 802.11ax. Именно поэтому среди рассылаемой в биконах информации есть временная метка, позволяющая вычислить значение часов точки доступа. Данное значение считается в сети эталоном и станции подстраивают значения своих часов под него после каждого полученного бикона. Такая процедура позволяет синхронизовать часы всех станций в сети. Получается, что для достаточно точного соблюдения установленных времен пробуждения и обмена данными станции должны периодически просыпаться и прослушивать биконы.

В настоящий момент не существует работ, посвященных сравнению базового механизма энергосбережения и современных механизмов TWT и WUR. Так как на эффективность механизмов TWT и WUR может значительно влиять эффект дрейфа часов, то его необходимо учитывать в таком сравнении. В данной работе при помощи имитационного моделирования проведено сравнение эффективности перечисленных механизмов энергосбережения в терминах энергопотребления и задержки на передачу кадра при учете эффекта дрейфа часов. Полученные результаты показали, что современные механизмы энергосбережения позволяют удовлетворять более жесткие требования по задержке или энергосбережению, чем базовый механизм.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приводится краткое описание исследуемых механизмов энергосбережения. В разделе 3 представлен обзор существующих работ. В разделе 4 описывается исследуемый сценарий работы сети Wi-Fi при использовании описанных механизмов энергосбережения. В разделе 5 приведены результаты моделирования описанного сценария и их анализ. Заключение работы содержится в разделе 6.

## 2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Перед описанием механизмов энергосбережения опишем, как приемопередающее устройство станции тратит энергию. Приемопередающее устройство расходует разное количество энергии на передачу, получение и прослушивание кадров, а также на прослушивание канала, в котором не зафиксирована передача [3]. Обратим внимание, что по умолчанию до окончания приема кадра станция не знает, кому он предназначен, поэтому станция должна пытаться получать все кадры, которые она может детектировать, чтобы впоследствии определить адресата и отбросить кадр, если адресатом является другая станция, или продолжить обработку кадра. Из-за этой особенности на энергопотребление станции влияет не только связанный с ней трафик, но и весь трафик в сети, который станция может детектировать. Другим фактором, влияющим на энергопотребление станции, является базовый механизм случайного доступа к каналу в сетях Wi-Fi EDCA (от англ.: Enhanced Distributed Channel Access).

Механизм EDCA упрощенно работает следующим образом. Станция непрерывно прослушивает канал и, если при получении кадра на передачу канал свободен, станция передает данный кадр. Если канал занят, станция взводит счетчик случайной отсрочки. Значение счетчика уменьшается на единицу каждый раз, когда канал был свободным в течение промежутка времени  $\Delta$ , и остается неизменным, если канал оказывается занят. Отсчет возобновляется после того, как канал освободился и был свободным в течение заданного интервала. Стан-

ция передает кадр, когда значение счетчика становится равным нулю. Если через стандартное время в ответ на отправленный кадр от получателя не приходит кадр подтверждения Ack (от англ.: Acknowledgement), то попытка передачи считается неуспешной. Из-за того, что разные станции могут одновременно завершить отсчет счетчика отсрочки и начать передачу, кадры таких станций могут попадать в коллизии, то есть быть непринятыми из-за высокой интерференции от параллельной передачи. Коллизии приводят к дополнительным попыткам передачи и увеличению длительности прослушивания канала, то есть к тратам энергии.

Одним из механизмов, позволяющих уменьшить число коллизий в сети Wi-Fi, является механизм виртуальной занятости канала NAV (от англ.: Network Allocation Vector), который работает следующим образом. В каждом кадре в специальном поле передается длина временного промежутка, в течение которого после окончания передачи данного кадра канал будет виртуально занят. Временной промежуток виртуальной занятости канала рассчитывается исходя из следующей за данным кадром последовательности обмена кадрами и включает в себя как длительности всех кадров в последовательности (часто цепочка состоит из кадра Ack), так и длительности межкадровых интервалов. Отметим, что для реализации виртуальной занятости могут использоваться специальные механизмы RTS/CTS или CTS-to-self. Они используют короткие кадры, которые в случае успешной передачи резервируют канал для дальнейшей передачи большого кадра, а в случае неуспешной передачи снижают длительность коллизии.

Для снижения накладных расходов на передачу большого числа небольших кадров в сетях Wi-Fi используется механизм агрегации, позволяющий объединить несколько кадров в один большой и передавать в канале агрегированный кадр. За счет такого объединения сокращается количество заголовков канального уровня и передается только один кадр Ack.

Далее перейдем к упрощенному описанию базового механизма энергосбережения и современных механизмов энергосбережения TWT и WUR.

### *2.1. Базовый механизм энергосбережения*

При использовании базового механизма энергосбережения станция может работать в активном или энергосберегающем режимах. При работе в энергосберегающем режиме станция может находиться в одном из двух состояний: в состоянии сна или в состоянии бодрствования. В состоянии сна станция отключает свое приемопередающее устройство, то есть полностью прекращает прослушивать канал, что позволяет ей значительно экономить энергию. В состоянии бодрствования станция поддерживает приемопередающее устройство включенным, что приводит к затратам энергии на прослушивание канала и прием передач других станций. Если станция работает в активном режиме, она все время находится в состоянии бодрствования. Отметим, что станция обязана информировать точку доступа о смене режима работы, причем переход в энергосберегающий режим станция может выполнить только после получения подтверждения от точки доступа, а начать получать доступ к каналу может не раньше, чем актуализирует значение NAV.

Точка доступа буферизует кадры, предназначенные для станции, работающей в энергосберегающем режиме. Для того, чтобы проинформировать энергосберегающую станцию о наличии для нее буферизованных данных, точка доступа в каждом биконе передает таблицу TIM (от англ.: Traffic Indication Map), в которой указано наличие или отсутствие буферизованных кадров для каждой энергосберегающей станции. Также с периодичностью, определяемой параметрами сети, в биконах передается таблица DTIM (от англ.: Delivery Traffic Indication Map), в которой указывается информация об энергосберегающих станциях, для которых у точки доступа есть ширококвещательные кадры. Такие ширококвещательные данные точка доступа рассылает сразу после отправки бикона, содержащего таблицу DTIM. Для получения информации о наличии для нее кадров каждая энергосберегающая станция должна периоди-

чески просыпаться и получать биконы. Отметим, что станции нет необходимости принимать каждый TIM-элемент, поэтому на практике энергосберегающие станции могут просыпаться лишь для приема некоторых биконов с DTIM-элементом. Если из принятого бикона стало известно, что для станции нет буферизованных пакетов, станция возвращается в состояние сна сразу после окончания приема бикона. В противном случае станция отправляет точке доступа специальный кадр PS-Poll, а если был принят DTIM-бикон, то PS-Poll отправляется после рассылки точкой доступа широковещательной информации. В ответ на PS-Poll точка доступа отправляет станции буферизованные данные.

Несмотря на то, что использование базовой процедуры энергосбережения позволяет значительно экономить энергию, она имеет ряд недостатков. Одним из них является то, что энергосберегающие станции для отправки кадров PS-Poll используют метод случайного доступа к каналу EDCA, что является причиной конкуренции за канал и возможных коллизий. Они могут возникнуть, к примеру, если много энергосберегающих станций начнут одновременно запрашивать буферизованные данные у точки доступа. Такая конкуренция за канал может приводить к значительным потерям в энергоэффективности из-за повторных попыток передачи кадров PS-Poll и прослушивания энергосберегающей станцией передач других станций до момента успешной отправки кадра PS-Poll.

Для решения описанных проблем в дополнении IEEE 802.11e к стандарту Wi-Fi был представлен механизм энергосбережения APSD. Он имеет две разновидности: непериодический U-APSD (от англ.: *Unscheduled APSD*) и периодический S-APSD (от англ.: *Scheduled APSD*), которые имеют следующие особенности. При использовании U-APSD энергосберегающая станция должна запрашивать буферизованные кадры у точки доступа, как и в базовом механизме энергосбережения, однако моменты отправки запросов не привязаны к получению биконов, что позволяет снизить конкуренцию за доступ к каналу между энергосберегающими станциями. Особенностью механизма S-APSD является использование строго заданной последовательности моментов пробуждения, что приводит к отсутствию необходимости отправки запросов данных, ведь точке доступа известно, в какой момент станция активна и готова принять кадр. К сожалению, механизм APSD предназначен только для доставки кадров от точки доступа энергосберегающим станциям, в то время как энергосберегающие станции для отправки кадров используют метод EDCA, что приводит к конкуренции за доступ к каналу и тратам энергии на выполнение повторных передач и на прислушивание канала. Также при переходе из состояния сна в состояние бодрствования станция перед отправкой кадра должна обновить значение NAV, чтобы случайно не попасть в коллизию. Все это значительно ограничивает область применимости данного механизма.

## 2.2. *Target Wake Time*

В настоящий момент одним из самых популярных механизмов энергосбережения является механизм TWT. Впервые он был представлен в дополнении IEEE 802.11ah [4] к стандарту Wi-Fi, описывающем работу сенсорных сетей. Для сенсорных сетей характерен очень редкий трафик как от точки доступа, так и к ней и строгие ограничения на энергопотребление, что и привело к созданию не только нового механизма энергосбережения TWT, позволяющего энергосберегающим станциям находиться в спящем режиме вплоть до суток, но и таких механизмов как окно ограниченного доступа RAW (от англ.: *Restricted Access Window*) или сегментация TIM. Отметим, что использование механизма RAW нацелено на снижение конкуренции за доступ к каналу [5], а использование механизма сегментации TIM предназначено для уменьшения числа прослушиваемых биконов, что позволяет снизить энергопотребление станций [6]. Позднее механизм TWT вошел в дополнение IEEE 802.11ax, описывающее работу нового поколения устройств.

Механизм TWT позволяет паре устройств заранее договариваться о моменте времени (а именно, о времени пробуждения TWT), в который оба устройства будут бодрствовать, и о длительности интервала обслуживания TWT (TWT SP), который отсчитывается от назначенного TWT. Именно в течение TWT SP станции могут производить обмен кадрами. Такая договоренность позволяет станциям перейти в состояние сна на все время, кроме TWT SP. Следует отметить, что в рамках дополнения IEEE 802.11ax предполагается, что механизм TWT используется для обмена индивидуальными кадрами, в то время как для обмена групповыми кадрами должны использоваться другие стандартные механизмы.

Одним из важных параметров механизма TWT является  $T_{awake}$ , который определяет минимальное время после начала TWT SP, в течение которого станция должна быть в состоянии бодрствования вне зависимости от наличия или отсутствия получаемых кадров. Таким образом, станция может перейти в состояние сна или по окончании  $T_{awake}$ , или после получения любого кадра, в котором указывает, что обмен кадрами завершен.

### 2.3. Wake-Up Radio

Механизм WUR (от англ.: Wake-Up Radio) заметно отличается от всех других механизмов энергосбережения, так как предполагает для экономии энергии использование дополнительно маломощного радиointерфейса. В рамках технологии Wi-Fi функционал устройств WUR определен в дополнении IEEE 802.11ba [2] к стандарту Wi-Fi. В сетях IEEE 802.11ba точка доступа и станции имеют два интерфейса: основной интерфейс, используемый для приема и передачи обычных (не WUR) кадров, и дополнительный интерфейс WUR, используемый для того, чтобы точка доступа могла отправить станциям специальные кадры пробуждения, означающие необходимость перевода основного интерфейса из спящего в бодрствующее состояние. Так как дополнение IEEE 802.11ba ограничивает энергопотребление приемника WUR значением в 1 мВт, его использование позволяет значительно экономить энергию на прослушивании канала основным интерфейсом, переводя его в состояние сна и используя в это время приемник WUR.

Малое энергопотребление является причиной значительных ограничений в функциональности устройств WUR, к примеру они имеют достаточно низкие скорости передачи данных 62,5 кбит/с и 250 кбит/с и передают только служебную информацию, но не пользовательские данные. Другим ограничением является то, что точка доступа имеет только передатчик WUR, а станция — только приемник WUR, что делает возможными только однонаправленные передачи WUR от точки доступа станциям и невозможным явное подтверждение WUR кадров.

Для того, чтобы дополнительно снизить энергопотребление приемника WUR была разработана процедура рабочего цикла (от англ.: duty cycle). При ее использовании приемник WUR периодически в соответствии с установленным расписанием включается для прослушивания канала, а в остальное время находится в состоянии сна для экономии энергии. При использовании процедуры рабочего цикла часы станции должны быть достаточно точно синхронизированы с часами точки доступа, что можно реализовать при периодическом прослушивании биконов основным интерфейсом или при прослушивании биконов WUR. Биконы WUR, как и обычные биконы, рассылаются точкой доступа периодически по схожим правилам, однако служат только для синхронизации часов и не содержат никакой другой полезной информации о сети. Также отметим, что рассылка биконов WUR является опциональной, а возможной причиной этого может служить длительность их передачи 1 мс при малой информационной нагрузке.

## 3. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Базовый механизм энергосбережения был представлен в первой версии стандарта Wi-Fi в 1997 году. Он является объектом исследования во многих работах, к примеру [7] представляет оценку среднего времени нахождения энергосберегающей станции в состоянии сна. В работе [8] представлен способ настройки параметров базового механизма энергосбережения в зависимости от параметров трафика в сети. Авторы работ [9, 10] отмечают негативное влияние коллизий на эффективность базового механизма энергосбережения и предлагают способы его улучшения путем уменьшения числа одновременно просыпающихся энергосберегающих станций. Несмотря на все недостатки, найденные исследователями за годы существования базового механизма энергосбережения, он реализован в большинстве современных устройств и может использоваться в качестве эталона для оценки эффективности новых механизмов энергосбережения.

Другим давно существующим и разносторонне исследованным механизмом энергосбережения является APSD. Авторы [11] исследовали совместное использование различных методов доступа к каналу и обоих видов механизма APSD, а также базового механизма энергосбережения и показали, что механизм S-APSD показывает наилучший уровень энергоэффективности из-за отсутствия запросов данных, в то время как U-APSD позволяет достигать низких задержек в неперегруженной сети. В работе [12] показывается, что использование механизма агрегации совместно с базовым механизмом энергосбережения позволяет сильнее повысить его эффективность, по сравнению с совместным использованием механизма агрегации и механизма U-APSD. Авторы работы [13] сравнивают базовый механизм энергосбережения и механизм U-APSD на реальных устройствах для голосового трафика и показывают, что использование механизма U-APSD позволяет достигать меньших задержек. Отметим, что несмотря на большое количество исследований, посвященных данному механизму, они не учитывают влияние эффекта дрейфа часов.

Переходя к обзору работ, посвященных механизму TWT, следует отметить, что достаточно мало исследований посвящено сравнению энергоэффективности данного механизма с другими механизмами энергосбережения [14, 15]. В то же время многие авторы показывают эффективность использования механизма TWT для планирования передач и регулирования уровня конкуренции за доступ к каналу [16–21]. Если принимать во внимание тот факт, что конкуренция за доступ к каналу влияет на энергопотребление станции, то данные работы доказывают эффективность механизма TWT как механизма энергосбережения. Также следует отметить исследования механизма TWT в рамках дополнения IEEE 802.11ah, в которых авторы [22] исследуют механизм группировки TWT, специфический для сетей IEEE 802.11ah, авторы [23] исследуют совместное использование механизмов TWT и RAW, а авторы [24, 25] доказывают эффективность для энергосбережения.

Рассматривая работы, посвященные механизму WUR, следует отметить, что большая их часть посвящена разработке маломощного приемника [26–30], причем приемники [29, 30] были разработаны с учетом требований дополнения IEEE 802.11ba. Другое направление исследований появилось из-за того, что низкие скорости передачи интерфейса WUR приводят к большой длительности передаваемых кадров, что является причиной как заметных трат канальных ресурсов на их передачу, так и потери в энергоэффективности. Поэтому авторы работ [31, 32] разработали способы уменьшения размера кадра WUR, в то время как авторы [33] предложили подход к отправке кадров пробуждения, позволяющий снизить общее число передаваемых в сети кадров WUR. Авторы работы [34] обратили внимание на проблемы ошибочного пробуждения и потери кадра пробуждения, приводящие к увеличению энергопотребления и задержкам доставки кадров. Для решения обозначенных проблем авторы предлагают использовать коды с исправлением ошибок и показывают эффективность предложенного решения. В рабо-

те [35] исследуется использование WUR в дополнение к основным интерфейсам, работающим в рамках дополнения IEEE 802.11ax. Совместное использование устройств IEEE 802.11ax и IEEE 802.11ba позволяет выделять каналные ресурсы путем отправки специального триггер-кадра тем станциям, для которых будет отправлен кадр пробуждения.

Подводя итог следует отметить, что при исследовании современных механизмов энергосбережения TWT и WUR авторы не учитывают необходимость периодического получения энергосберегающими станциями биконов для актуализации параметров сети и синхронизации часов. Также авторы упускают тот факт, что для энергосберегающей станции могут передаваться групповые кадры, прием которых стандартным образом осуществляется после получения DTIM-бикона. Именно поэтому актуальной является задача *сравнения эффективности базового механизма энергосбережения и современных механизмов TWT и WUR в терминах энергопотребления и задержки на передачу кадра при условии периодического получения биконов, эффекта дрейфа часов у станций и присутствия в сети станций с насыщенным трафиком.*

#### 4. ИССЛЕДУЕМЫЕ СХЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Важно отметить, что стандарт Wi-Fi описывает функциональность механизмов энергосбережения, представленных в разделе 2, но не разъясняет, как их следует использовать на практике. В данном разделе представлены схемы работы механизмов энергосбережения для нисходящего трафика от точки доступа к энергосберегающим станциям (далее используется обозначение PS-станции), рассматриваемые в данной статье.

В рамках **базовой процедуры энергосбережения** PS-станция заранее просыпается для получения биконов, чтобы не пропустить их из-за неточности часов. Если в полученном биконе PS-станция получает информацию об отсутствии у точки доступа для нее буферизованных кадров, то PS-станция переходит в состояние сна до момента генерации следующего бикона. В противном случае после бикона PS-станция при помощи механизма EDCA передает точке доступа кадр PS-roll, в ответ на который точка доступа передает все буферизованные пакеты.

При использовании **механизма TWT** станция пробуждается заранее, чтобы быть готовой к обмену кадрами в период TWT SP. Так как станция для синхронизации часов прослушивает биконы, то отклонение часов к моменту начала TWT SP определяется временем, прошедшим с момента получения последнего бикона. Если к началу TWT SP у точки доступа есть кадры для передачи PS-станции, то точка доступа получает доступ к каналу для их передачи. Отметим, что для уменьшения времени ожидания кадра PS-станцией в бодрствующем состоянии и, соответственно, ее энергопотребления, точка доступа использует специальный межкадровый интервал *PIFS* для получения приоритетного доступа к каналу. Если к началу TWT SP у точки доступа нет кадра на передачу станции, то точка доступа аналогичным способом должна отправить станции пустой кадр данных (Null-кадр), завершающий период активности, чтобы PS-станция перешла в состояние сна. Далее будем называть такой TWT **активным TWT**. **Пассивным TWT** будем называть TWT, при использовании которого в отсутствие кадра данных на передачу точка доступа ничего не передает PS-станции, а в состоянии сна PS-станция переходит не ранее, чем через заранее определенное фиксированное время  $T_{awake}$ . Следует отметить, что при использовании пассивного TWT PS-станция не тратит энергию на получение кадра в каждом TWT SP, однако она вынуждена фиксированное время прослушивать канал, что также вызывает затраты энергии.

Механизмом **активного WUR** будем называть WUR без рабочего цикла, работающий следующим образом. Точка доступа генерирует кадр для передачи PS-станции, после чего через *PIFS* приоритетным образом получает доступ к каналу для отправки кадра CTS-to-self, который зарезервирует канал до окончания передачи кадра подтверждения на агрегированный

кадр из буферизованных данных. Далее через *PIFS* после отправки кадра CTS-to-self при помощи интерфейса WUR точка доступа передает кадр пробуждения. Приняв кадр пробуждения, PS-станция в течение некоторого времени  $T_{off-on}$  переводит основной интерфейс из состояния сна в состояние бодрствования, после чего сразу отправляет точке доступа кадр PS-Poll, информирующий о готовности получать данные. Через интервал *SIFS* после получения кадра PS-Poll от станции, то есть через минимально возможный интервал времени, точка доступа отправляет агрегированный кадр и получает в ответ кадр Ack. После успешного получения буферизованных кадров от точки доступа PS-станция переходит в режим сна.

Для большего энергосбережения может использоваться **WUR с рабочим циклом**, согласно которому PS-станция и точка доступа договариваются о некоторой последовательности интервалов времени, в течение которых радиointерфейс WUR должен находиться в бодрствующем состоянии и прослушивать канал на предмет получения кадра пробуждения. В остальное время радиointерфейс WUR выключен. Однако из-за неидеальности часов станция вынуждена аналогично механизму TWT пробуждаться заранее для прослушивания канала и периодически прослушивать биконы для синхронизации часов. В остальном процесс обмена кадрами не отличается от описанного для активного WUR.

## 5. СЦЕНАРИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследуем эффективность работы механизмов энергосбережения с помощью моделей, реализованных на платформе имитационного моделирования ns-3 [36], в следующем сценарии. Дана сеть Wi-Fi, состоящая из точки доступа,  $N$  станций, передающих кадры точке доступа в режиме насыщения, и  $S$  PS-станций, получающих кадры от точки доступа и использующих одну из следующих схем энергосбережения: базовую процедуру энергосбережения, активный WUR, WUR с рабочим циклом, активный или пассивный TWT. Периодом пробуждения будем называть временной интервал между последовательными запланированными периодами активности PS-станции. Все станции находятся в зоне радиовидимости друг друга, т.е. в сети нет скрытых станций. Часы PS-станций неидеальны, их отклонение имеет нормальное распределение относительно часов точки доступа. Стандартное отклонение часов  $\sigma = 25 \cdot 10^{-6}T$ , где  $T$  — это время, прошедшее с момента получения последнего бикона<sup>1</sup>. PS-станции выполняют подстройку часов, принимая только DTIM-биконы. Точка доступа для PS-станций генерирует Пуассоновский поток кадров с интенсивностью  $\lambda$ . Все кадры, которые были сгенерированы в процессе сна PS-станции, точка доступа буферизует и для дальнейшей передачи в канале агрегирует буферизованные кадры в один, используя общий заголовок канального уровня. Размер агрегированного кадра не превышает  $B$ .

При помощи имитационных моделей оценивались энергопотребление и задержка на передачу кадра PS-станции в зависимости от периода пробуждения для обмена кадрами, которым для механизма TWT является период TWT SP, для базового механизма энергосбережения — DTIM-период, для WUR с рабочим циклом — период рабочего цикла. Отметим, что в рассматриваемом сценарии варьируется период рабочего цикла и период TWT SP, в то время как DTIM-период фиксирован. При моделировании выполнено по 100 запусков каждой модели и использованы параметры, приведенные в табл. и большей частью взятые из дополнений IEEE 802.11ax, IEEE 802.11ba к стандарту Wi-Fi и доклада [3]. Отметим, что при моделировании мощность интерфейса WUR выбрана наибольшей возможной в соответствии с дополнением IEEE 802.11ba.

Перейдем к анализу зависимости средней мощности, потребляемой PS-станцией, от периода пробуждения, см. рис. 1. Напомним, что в рамках базового механизма энергосбережения пе-

<sup>1</sup> Стандарт Wi-Fi разрешает отклонение часов не более 100 ppm, т.е. допускает отклонения в 4 раза больше, чем рассматриваемое в статье значение  $\sigma$ .

Таблица 1. Параметры моделирования.

Величина	Значение
Число насыщенных станций N	5 шт
Число PS-станций S	5 шт
Радиус сети	10 м
Интенсивность генерации кадров для PS-станций	$(40\text{мс})^{-1}$
Размер единичного кадра для PS-станций	50 байт
Длительность кадра насыщенной станции	1480 мкс
Длительность кадра WUR	924 мкс
Длительность кадра PS-Poll	52 мкс
Длительность кадра CTS-to-self	52 мкс
Длительность Null-кадра	144 мкс
Длительность перехода сон-бодрствование $T_{off-on}$	500 мкс
Мощность основного интерфейса при передаче кадра	308 мВт
Мощность основного интерфейса при приеме кадра	110 мВт
Мощность основного интерфейса без задетектированной передачи	55 мВт
Мощность WUR при приеме кадра WUR	1 мВт
Мощность WUR без задетектированной передачи WUR	0.5 мВт
Наибольший размер агрегированного кадра B	2200 байт
Периодичность рассылки биконов	100 мс
Периодичность рассылки DTIM-биконов	500 мс

риод пробуждения фиксирован, поэтому на представленных графиках для данного механизма средняя потребляемая мощность не зависит от периода пробуждения. Также при использовании механизма активного WUR из-за отсутствия периодов сна интерфейса WUR средняя потребляемая мощность не зависит от периода пробуждения и представлена на рис. 1 горизонтальной прямой. Очевидно, что при малых периодах пробуждения по сравнению со средним временем генерации кадров механизм TWT показывает значительно большее энергопотребле-

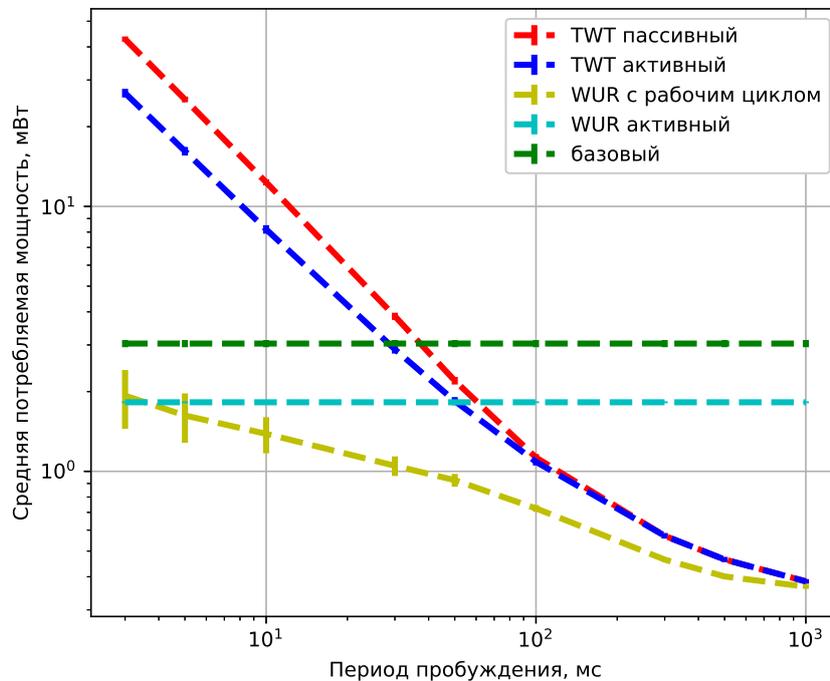
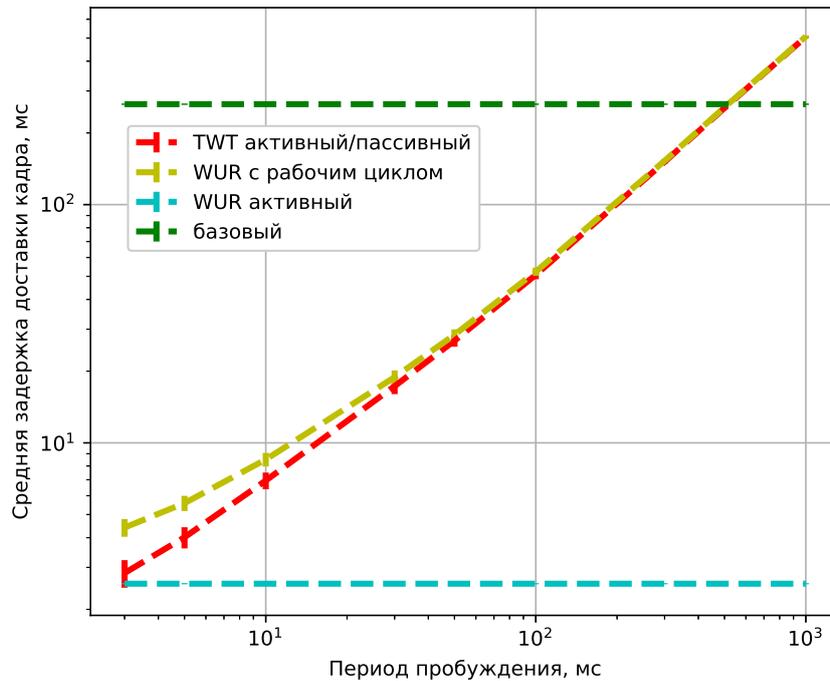


Рис. 1. Зависимость средней мощности, потребляемой PS-станцией, от периода пробуждения.



**Рис. 2.** Зависимость средней задержки доставки кадра данных для PS-станции от периода пробуждения.

ние, чем WUR или базовый механизм энергосбережения. Это связано с частым использованием основного интерфейса. Также энергопотребление основного интерфейса является причиной того, что в рассматриваемом сценарии с точки зрения энергосбережения выгоднее использовать механизм активного TWT по сравнению с пассивным TWT в связи с прослушиванием основным интерфейсом канала в течение заданного времени. Отметим, что оба вида механизма TWT и механизм WUR с рабочим циклом при больших периодах пробуждения показывают асимптотически схожие результаты. Это объясняется тем, что они имеют схожее поведение: длительный сон, ранее пробуждение для прослушивания канала и периодический прием биконов для синхронизации часов.

Далее рассмотрим зависимость средней задержки доставки кадра данных для PS-станции от периода пробуждения, см. рис. 2. При сравнении активного и пассивного механизмов TWT очевидно, что задержка на доставку кадра данных никак не зависит от периода пробуждения, а при сравнении обоих видов механизма TWT и механизма WUR с рабочим циклом основное различие заключается в длительности обмена дополнительными служебными кадрами и во временных затратах на перевод основного интерфейса в бодрствующее состояние после приема кадра пробуждения. Для базового механизма энергосбережения основной вклад в задержку вносит именно период пробуждения, как и для механизмов TWT и WUR с рабочим циклом при больших периодах пробуждения. Однако в рассматриваемом сценарии периодом пробуждения для базового механизма энергосбережения является фиксированный период между DTIM-биконами, что приводит к отсутствию пробуждений с другой периодичностью. Для механизма активного WUR основной вклад в задержку вносят длительность дополнительного обмена кадрами и перехода основного интерфейса в состояние бодрствования.

Результаты, полученные при помощи разработанных имитационных моделей, позволяют в рамках конкретного сценария при заданной задержке на передачу кадра выбрать подходящий механизм энергосбережения. К примеру, если необходимо обеспечить минимальную задержку

передачи кадра, то следует использовать механизм WUR без рабочего цикла. При менее строгих ограничениях на задержку, к примеру 10 мс, можно использовать любой из рассмотренных механизмов энергосбережения, кроме базового. В то же время наименьшего энергопотребления можно достичь, используя механизм WUR с рабочим циклом, при этом в энергоэффективности ему будет проигрывать любой из механизмов TWT, но их легче имплементировать в реальные устройства, так как механизм TWT не требует установки дополнительного радиointерфейса.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследованы такие современные методы энергосбережения как TWT и WUR, а также базовый механизм энергосбережения в терминах энергопотребления и задержки на передачу данных. При помощи имитационного моделирования получены зависимости средней потребляемой мощности станции и средней задержки доставки кадра данных от периода пробуждения энергосберегающей станции. Анализ численных результатов показал, что при использовании механизмов энергосбережения, основанных на периодическом отключении основного интерфейса, приходится искать компромисс между энергопотреблением и задержкой, так как уменьшение одного параметра достигается за счет увеличения другого. Базовый механизм энергосбережения проигрывает современным TWT и WUR даже с учетом прослушивания биконов для синхронизации часов. Наилучшие результаты показывает механизм WUR, так как WUR с рабочим циклом позволяет достичь наименьшей потребляемой мощности при значительной задержке, а WUR без процедуры рабочего цикла позволяет передавать кадры для энергосберегающей станции с наименьшей задержкой при умеренном энергопотреблении. Также разработанные модели позволяют дать рекомендации по выбору механизма энергосбережения в зависимости от параметров сети и требований на задержку кадров для энергосберегающих станций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs / Khorov Evgeny, Kiryanov Anton, Lyakhov Andrey, and Bianchi Giuseppe // IEEE Communications Surveys and Tutorials. — 2018. — Vol. 21, no. 1. — P. 197–216.
2. IEEE P802.11ba™ Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment 3: Wake-Up Radio Operation : 2021.
3. Ghosh Chittabrata. Discussion on deep and shallow sleep states. — 2015. — Access mode: <http://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1100-02-00ax-discussion-on-deep-and-shallow-sleep-states.pptx>.
4. A survey on IEEE 802.11 ah: An enabling networking technology for smart cities / Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey, Krotov Alexander, and Guschin Andrey // Computer Communications. — 2015. — Vol. 58. — P. 53–69.
5. Resource allocation for machine-type communication of energy-harvesting devices in wi-fi halow networks / Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey, and Famaey Jeroen // Sensors. — 2020. — Vol. 20, no. 9. — P. 2449.
6. Improving efficiency of heterogeneous Wi-Fi networks with joint usage of TIM segmentation and restricted access window / Kureev Aleksey, Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, and Lyakhov Andrey // 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC) / IEEE. — 2017. — P. 1–5.
7. Baek Sangkyu, Choi Bong Dae. Performance analysis of power save mode in IEEE 802.11 infrastructure WLAN // 2008 International Conference on Telecommunications / IEEE. — 2008. — P. 1–4.

8. Ibrahim Isam Aameer, Salim Haider TH, Khazaal Hasan F. Investigating the analysis of power saving mode in IEEE 802.11 for Wi-Fi communication // Wasit Journal of Engineering Sciences. — 2018. — Vol. 6, no. 3. — P. 13–19.
9. Scheduled PSM for minimizing energy in wireless LANs / He Yong, Yuan Ruixi, Ma Xiaojun, Li Jun, and Wang Charles // 2007 IEEE International Conference on Network Protocols / IEEE. — 2007. — P. 154–163.
10. Xie Yi, Luo Xiapu, Chang Rocky KC. Centralized PSM: an AP-centric power saving mode for 802.11 infrastructure networks // 2009 IEEE Sarnoff Symposium / IEEE. — 2009. — P. 1–5.
11. Perez-Costa Xavier, Camps-Mur Daniel. IEEE 802.11 e QoS and power saving features overview and analysis of combined performance // IEEE Wireless Communications. — 2010. — Vol. 17, no. 4. — P. 88–96.
12. Leveraging 802.11n frame aggregation to enhance QoS and power consumption in Wi-Fi networks / Camps-Mur Daniel, Gomony Manil Dev, Pérez-Costa Xavier, and Sallent-Ribes Sebastia // Computer Networks. — 2012. — Vol. 56, no. 12. — P. 2896–2911.
13. A comparative analysis on benefits of unscheduled automatic power save delivery over legacy power save mode in IEEE 802.11 wireless networks / Sidam Amulya, Koutarapu Padma, Methuku Madhuri, and Vuyyala Sathish // 2022 9th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom) / IEEE. — 2022. — P. 551–555.
14. IEEE 802.11 ba - extremely low power Wi-Fi for massive Internet of Things - challenges, open issues, performance evaluation / Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey, and Stepanova Ekaterina // 2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom) / IEEE. — 2019. — P. 1–5.
15. On the joint usage of Target Wake Time and 802.11 ba wake-up radio / Stepanova Ekaterina, Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, and Lyakhov Andrey // IEEE Access. — 2020. — Vol. 8. — P. 221061–221076.
16. Tian Le, Famaey Jeroen, Latré Steven. Evaluation of the IEEE 802.11ah restricted access window mechanism for dense IoT networks // 2016 IEEE 17th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM) / IEEE. — 2016. — P. 1–9.
17. Nurchis Maddalena, Bellalta Boris. Target Wake Time: scheduled access in IEEE 802.11 ax WLANs // IEEE Wireless Communications. — 2019. — Vol. 26, no. 2. — P. 142–150.
18. A Target Wake Time scheduling scheme for uplink multiuser transmission in IEEE 802.11 ax-based next generation WLANs / Chen Qinghua, Weng Zhengqiu, Chen Guolang, et al. // IEEE Access. — 2019. — Vol. 7. — P. 158207–158222.
19. Chen Qinghua. An energy efficient channel access with Target Wake Time scheduling for overlapping 802.11 ax basic service sets // IEEE Internet of Things Journal. — 2022. — Vol. 9, no. 19. — P. 18973–18986.
20. Karaca Mehmet. Joint optimization of Target Wake Time mechanism and scheduling for IEEE 802.11ax // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. — 2021. — Vol. 29, no. 3. — P. 1659–1671.
21. Yang Changmok, Lee Jinmyeong, Bahk Saewoong. Target Wake Time scheduling strategies for uplink transmission in IEEE 802.11 ax networks // 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) / IEEE. — 2021. — P. 1–6.
22. Clock drift impact on Target Wake Time in IEEE 802.11ax/ah networks / Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey, and Stepanova Ekaterina // International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT) / IEEE. — 2018. — P. 1–6.
23. An energy consumption evaluation of non-TIM strategy in IEEE 802.11 ah / Kao Tain-Lieng, Wang Huan-Chun, Lu Chang-Han, and Cheng Ting-Hsu // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering / IOP Publishing. — 2019. — Vol. 644. — P. 012008.

24. Santi Serena, Tian Le, Famaey Jeroen. Evaluation of the co-existence of RAW and TWT stations in IEEE 802.11 ah using ns-3 // Proceedings of the 2019 Workshop on Next-Generation Wireless with ns-3. — 2019. — P. 9–12.
25. Accurate Energy Modeling and Characterization of IEEE 802.11 ah RAW and TWT / Santi Serena, Tian Le, Khorov Evgeny, and Famaey Jeroen // Sensors. — 2019. — Vol. 19, no. 11. — P. 2614.
26. Pletcher Nathan M, Gambini Simone, Rabaey Jan M. A 2GHz 52  $\mu$ W wake-up receiver with-72dBm sensitivity using uncertain-IF architecture // 2008 IEEE International Solid-State Circuits Conference-Digest of Technical Papers / IEEE. — 2008. — P. 524–633.
27. Hambeck Christian, Mahlknecht Stefan, Herndl Thomas. A 2.4  $\mu$ W wake-up Receiver for wireless sensor nodes with- 71dBm sensitivity // 2011 IEEE International Symposium of Circuits and Systems (ISCAS) / IEEE. — 2011. — P. 534–537.
28. 13.5 A- 97dBm-sensitivity interferer-resilient 2.4 GHz wake-up receiver using dual-IF multi-N-Path architecture in 65nm CMOS / Salazar Camilo, Kaiser Andreas, Cathelin Andreia, and Rabaey Jan // 2015 IEEE International Solid-State Circuits Conference-(ISSCC) Digest of Technical Papers / IEEE. — 2015. — P. 1–3.
29. An 802.11ba 495 $\mu$ W -92.6dBm-sensitivity blocker-tolerant wake-up radio receiver fully integrated with Wi-Fi transceiver / Liu Renzhi, K. T. Asma Beevi, Dorrance Richard, Dasalukunte Deepak, Santana Lopez Mario A., Kristem Vinod, Azizi Shahrnaz, Park Minyoung, and Carlton Brent R. // 2019 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC). — 2019. — P. 255–258.
30. An 802.11 ba-based wake-up radio receiver with Wi-Fi transceiver integration / Liu Renzhi, KT Asma Beevi, Dorrance Richard, Dasalukunte Deepak, Kristem Vinod, Lopez Mario A Santana, Min Alexander W, Azizi Shahrnaz, Park Minyoung, and Carlton Brent R // IEEE Journal of Solid-State Circuits. — 2019. — Vol. 55, no. 5. — P. 1151–1164.
31. Song Taewon, Kim Taeyoon. Performance analysis of addressing mechanisms in inter-operable IoT device with low-power wake-up radio // Sensors. — 2019. — Vol. 19, no. 23. — P. 5106.
32. Ultra-low power pulse width detector for RF wake-up receivers / Benbuk AA, Kouzayha N, Asadallah FA, Costantine J, and Dawy Z // 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting / IEEE. — 2019. — P. 1461–1462.
33. Tang Suhua, Obana Sadao. Energy efficient downlink transmission in wireless LANs by using low-power wake-up radio // Wireless Communications and Mobile Computing. — 2017. — Vol. 2017.
34. Improving energy efficiency and reliability in WuR-based IoT systems: An error correction approach / Rakovic Valentin, Adamovski Robert, Risteski Aleksandar, and Gavrilovska Liljana // Wireless Personal Communications. — 2020. — P. 1–12.
35. Hong Hanseul, Kim Young, Kim Ronny. A low-power WLAN communication scheme for IoT WLAN devices using wake-up receivers // Applied Sciences. — 2018. — Vol. 8, no. 1. — P. 72.
36. The ns-3 network simulator. — Access mode: <http://www.nsnam.org/>.

## Influence of the Clock Drift on the Efficiency of Power Save Mechanisms in Wi-Fi Networks

**E.A. Stepanova, D.V. Bankov, E.M. Khorov, A.I. Lyakhov**

Decreasing devices' energy consumption is an important problem for modern Wi-Fi networks. To address this problem, the very first version of the Wi-Fi standard introduced the basic power save mechanism. At the same time, the new IEEE 802.11ax and IEEE 802.11ba amendments describe modern power save mechanisms: Target Wake Time (TWT) and Wake-Up Radio (WUR). The main idea of these mechanisms is to periodically turn off the main radio to reduce power consumption by not listening to the channel.

However, the clock drift effect, i.e., random deviation of the station's clock, can significantly degrade the efficiency of TWT and WUR, which schedule duty circles. The basic power save mechanism is much less affected by the clock drift effect due to periodic clock synchronization by listening to beacons, which are management frames containing network information. The paper evaluates the efficiency of the mentioned power save mechanisms with the ns-3 simulation platform. TWT and WUR mechanisms are shown to achieve lower power consumption and frame delivery delays than the basic power save mechanism even with the clock drift effect.

KEYWORDS: Power Save, TWT, WUR, Clock Drift, Wi-Fi Networks