

## Численное исследование влияния гистерезиса управления доступом к ресурсам БШС на эффективность ее функционирования

И.И. Цитович\*, А.В. Чернушевич\*\*

\* *Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича, Российская академия наук, Москва, Россия,*

\*\* *Московский технический университет связи и информатики, Министерство российской федерации по связи и информатизации, Москва, Россия*

Поступила в редколлегию 25.09.2011

**Аннотация**—В работе проводится численное исследование влияния взаимного расположения гистерезисов при управлении доступом к ресурсам беспроводной широкополосной сети (БШС) с разными порогами для отключения и включения доступа к ресурсам сети в зависимости от класса обслуживания. Рассмотрены три варианта взаимного расположения гистерезисов при управлении доступом тремя потоками с различными требованиями к качеству обслуживания. Проведены расчеты эффективности дополнительного обслуживания запросов низшего класса с ненормированными потерями с учетом суточных колебаний нагрузки в сети.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе проводится численное исследование характеристик трехпоточковой модели, рассмотренной в [5], при различном расположении гистерезисов управления доступом к ресурсам сети для запросов второго и третьего сервисных классов.

В [5] рассмотрена упрощенная модель обслуживания запросов трех сервисных классов, которая представляет собой процесс рождения и гибели с гистерезисом. Имеется доступный ресурс объемом  $V$  основных передаточных единиц (ОПЕ), на который поступает 3 потока запросов, каждый из них соответствует различным сервисным классам пользователей. Все потоки — стационарные пуассоновские процессы с интенсивностями  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ . Время обслуживания вызовов — экспоненциальное, соответственно с параметрами  $a_i$ . Первому потоку доступны все  $V$  ресурсов; для обслуживания запросов второго потока доступны только  $k_2$  из них, для третьего потока —  $k_3 < V$ . Величина  $k_i$  отображает степень загрузки (т.е. количество ресурсов, выделяемых для каждого сервисного класса). При этом, если в момент поступления запроса  $i$ -го сервисного класса все  $k_i$  ресурсов заняты — запрос получает отказ. Наряду с  $k_i$  для каждого сервисного класса вводится объем занятых в данный момент ресурсов  $f_i < k_i$ , при достижении которого снимается запрет на доступ запросов  $i$ -го потока к ресурсам сети. В результате для запросов  $i$ -го сервисного класса образуется гистерезис, задаваемый верхней границей, когда возникает запрет на доступ к сети, если его не было, и нижней границей, когда снимается запрет на доступ к сети, если он был.

Выделено четыре подмножества состояний системы:

$S^{++}$  — когда обслуживаются запросы всех трех сервисных классов;

$S^{+-}$  — когда прекращаются обслуживаться запросы низшего сервисного класса;

$S^{--}$  — когда обслуживаются запросы пользователей только первого сервисного класса;

$S^{-+}$  — когда обслуживаются запросы пользователей только первого и третьего сервисных классов.

После таких упрощений состояния процесса задаются одним параметром  $v$  — объем используемого ресурса, а с учетом принадлежности к соответствующему из введенных выше множеств соответственно  $v^{++}, v^{+-}, v^{-+}, v^{--}$ . Соответствующие этим состояниям стационарные вероятности обозначаются через  $p_v^{++}, p_v^{+-}, p_v^{-+}, p_v^{--}$ .

Более подробное описание задачи см. в [5].

При проведении расчетов производился расчет вероятностей потерь запросов каждого сервисного класса. При определении допустимости управления доступом предполагалось, что вероятность потерь для запросов первого сервисного класса не должна превосходить 0,5%, а запросов второго класса — 5%. Расчеты проводились при различной удельной нагрузке на одну ОПЕ, при этом различалась общая нагрузка и нагрузка, создаваемая запросами первого и второго сервисных классов. Кроме того, задавались различные границы гистерезисов и рассматривались все три возможных способа их взаимного расположения.

В качестве выходных характеристик рассматривались вероятности потерь запросов первого класса

$$\pi_1 = \sum_{v=V+1-a_1}^V (p_v^{++} + p_v^{+-} + p_v^{-+} + p_v^{--}), \quad (1)$$

где  $a_1$  — количество ОПЕ, используемых запросами первого сервисного класса,  $p_v^{++}, p_v^{+-}, p_v^{-+}, p_v^{--}$  — стационарные вероятности, которые рассчитываются по формулам, приведенным в [5]. Аналогично рассчитывались вероятности потерь для запросов второго и третьего сервисных классов по формулам

$$\pi_2 = \sum_{v=0}^V (p_v^{-+} + p_v^{--}), \quad (2)$$

и

$$\pi_3 = \sum_{v=0}^V (p_v^{+-} + p_v^{--}). \quad (3)$$

Поскольку важное значение имеет количество поступающих запросов с учетом возможности повторных попыток соединения, по производился подсчет интенсивностей поступления запросов в соответствии с методикой, описанной в [5] (раздел 3):

$$\Lambda_i = \frac{\lambda_i}{1 - \pi_i H_i}, \quad (4)$$

где  $\lambda_i$  — интенсивность потока запросов  $i$ -го сервисного класса,  $H_i$  — вероятность повторения запроса  $i$ -го сервисного класса в случае получения отказа в обслуживании.

В работах [1]-[3] введена в рассмотрение величина потерь, не влияющих на повторение запроса пользователем (абонентом А), —  $p_a$  и проведен анализ ее влияния на характеристики сети. Эта характеристика интерпретируется как вероятность ухода пользователя на альтернативную сеть обслуживания из-за неудовлетворительного качества обслуживания в анализируемой сети [2]. Понятно, что значение  $p_a$  зависит от сервисного класса пользователя, поэтому нужно рассматривать величины  $p_{ai}$ . В этом случае (4) принимает вид

$$\Lambda_i = \frac{\lambda_i}{1 - \pi_i(1 - p_{ai})H_i}. \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что величины  $p_{ai}$  можно интерпретировать как параметры, в нашей постановке влияющие лишь на величину настойчивости пользователя  $H$ .

Показателем эффективности использования ресурсов узла сети использовался показатель среднего числа занятых ОПЕ

$$m = a_1\Lambda_1(1 - \pi_1) + a_2\Lambda_2(1 - \pi_2) + a_3\Lambda_3(1 - \pi_3), \quad (6)$$

где  $a_i$  — количество ОПЕ, используемых запросами  $i$  сервисного класса (в расчетах полагалось, что  $a_1 = 2$ ,  $a_2 = 3$  и  $a_3 = 1$ ).

Численное исследование свойств управления при наличии непересекающихся гистерезисов проводилось при различных значениях нагрузки на одну ОПЕ; при этом рассматривался как случай сильно перегруженного узла, так и менее нагруженного. При различной нагрузке рассматривались различные значения границ гистерезисов. Границы гистерезиса для запросов второго сервисного класса выбирались таким образом, чтобы минимизировать ограничения для таких запросов, но обеспечить запросам первого сервисного класса заданное качество обслуживания. Границы гистерезиса для запросов третьего сервисного класса выбирались в достаточно широком диапазоне для того, чтобы выяснить возможность задания широкого гистерезиса, позволяющего блокировать запросы третьего сервисного класса на протяжении всего промежутка колебаний нагрузки, создаваемой запросами первого и второго сервисных классов, вблизи высоких значений. Значения других параметров модели были постоянными и приведены в заголовках таблиц.

В разделе 2 проведено численное исследование свойств управления доступом с непересекающимися гистерезисами, описание которого приведено в [5] (раздел 4).

В разделе 3 проведено численное исследование свойств управления доступом с пересекающимися гистерезисами, описание которого приведено в [5] (раздел 5).

В разделе 4 проведено численное исследование свойств управления доступом в случае, когда один гистерезис содержит внутри себя другой гистерезис, описание которого приведено в [5] (раздел 6).

В разделе 5 введен стоимостной функционал  $P$ , позволяющий учитывать объем оказанных услуг с учетом стоимости одной ОПЕ, которая устанавливается различной для запросов каждого сервисного класса, что совершенно естественно, поскольку запросам предоставляется различный уровень сервиса. Кроме того, введен функционал  $R$ , который дополнительно учитывает издержки сети, связанные с установлением соединения, стоимость которых предполагается одинаковой для запросов всех классов. Такие функционалы рассматривались в [4], где рассматривались два потока с гистерезисом управления для запросов второго потока, а теперь рассматривается модель узла беспроводной сети с тремя потоками и двумя гистерезисами.

В разделе 6 проведено численное исследование свойств функционалов  $P$  и  $R$  при наличии трех потоков и двух гистерезисов.

Как показано в разделе 6, не во всех случаях наличие дополнительного потока запросов третьего сервисного класса является экономически обоснованным на основании критериев, задаваемых функционалами  $P$  и  $R$ , если общая нагрузка оказывается слишком большой. С другой стороны, профиль суточной нагрузки, создаваемой запросами определенного сервисного класса, выглядит обычно таким образом, что имеются периоды времени, когда нагрузка велика, и периоды — когда она существенно меньше. Кроме того, периоды с большой нагрузкой у запросов различных сервисных классов могут не совпадать, поскольку источники нагрузки имеют различное поведение во времени. Следовательно, наряду с периодами, когда наличие запросов третьего сервисного класса является нежелательным, будут продолжительные промежутки времени, когда такие запросы приносят дополнительный доход. Поэтому целесообразно исследовать влияние суточных колебаний нагрузки на эффективность обслуживания запросов третьего сервисного класса. Результаты численных исследований приведены в разделе 7.

## 2. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ С НЕПЕРЕСЕКАЮЩИМИСЯ ГИСТЕРЕЗИСАМИ

В таблицах этого и последующих разделов использованы следующие обозначения:  $\rho$  — удельная нагрузка на одну ОПЕ, создаваемая запросами всех сервисных классов:

$$\rho = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{v},$$

а  $\rho_{12}$  — удельная нагрузка на одну ОПЕ, создаваемая запросами первого и второго сервисных классов:

$$\rho = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{v}.$$

Численное исследование начинается с рассмотрения сильно перегруженных узлов, когда  $\rho = 1, 2$ , а  $\rho_{12} = 0, 9$ . Результаты, приведенные в первом столбце табл. 1, показывают, что при заданных исходных данных практически полная блокировка запросов третьего сервисного класса не обеспечивает высокое качество обслуживания запросов первых двух сервисных классов, поскольку общая нагрузка, создаваемая этими запросами, составляет 0,9 эрл. в расчете на одну ОПЕ. Вместе с тем, как показывают данные, приведенные в других столбцах табл. 1, за счет выбора границ гистерезиса для запросов второго сервисного класса можно обеспечить высокое качество обслуживания запросов первого сервисного класса. Заметим, что запросы первого сервисного класса используют 2 ОПЕ для своего обслуживания, поэтому выбранная верхняя граница 96 для запросов второго сервисного класса позволяет иметь резерв только на обслуживание 2 запросов первого сервисного класса. Выбранные во втором и последующих вариантах границы гистерезиса для второго сервисного класса позволяют, как показывают расчеты, устранить негативное влияние других потоков на качество обслуживания запросов первого сервисного класса, если, конечно, нагрузка, создаваемая запросами первого сервисного класса, не станет чрезмерной. Достигается это за счет сдвига границ гистерезиса для запросов второго сервисного класса с [94, 96] на [90, 93]. Фактически это означает, что для запросов второго сервисного класса возможность попасть на обслуживание уменьшена лишь на одну линию, поскольку для обслуживания они используют 3 ОПЕ.

Данные, приведенные в столбцах 2–4, получены при той же нагрузке, что и в предыдущем случае, но уже при других границах гистерезисов; при этом границы гистерезиса для запросов второго сервисного класса фиксированы, а для третьего — изменяются. Эти границы постепенно сужаются. Границы гистерезиса во втором столбце выбраны столь широкими (нижняя граница выбрана равной 70), что запросы третьего сервисного класса практически полностью блокированы (как и в первом столбце), что и отражается на значении параметра потерь  $\pi_3$ , который равен 0,99.

Сравнение этих результатов расчетов с расчетами, приведенными во 2–4 столбцах, показывает, что запросы третьего сервисного класса могут оказывать влияние на качество обслуживания запросов более приоритетных классов даже в тех случаях, когда эти запросы с большой вероятностью блокируются. Поскольку общая нагрузка, создаваемая запросами всех потоков, существенно превосходит пропускную способность узла, то понятно, что все запросы не могут быть обслужены. Поэтому здесь приоритет должен отдаваться более приоритетным запросам для того, чтобы обеспечить для них приемлемое качество обслуживания. Расположение гистерезиса для запросов третьего сервисного класса оказывает влияние на качество обслуживания запросов не только второго, но и первого сервисного класса. Например, сравнение результатов расчетов, приведенных во втором и четвертом столбцах, показывает, что за счет выбора гистерезиса для запросов третьего сервисного класса, максимально приближенного к гистерезису запросов второго сервисного класса, качество обслуживания запросов первого и

второго сервисных классов упало более чем в 1,5 раза, хотя качество обслуживания запросов третьего сервисного класса остается крайне низким.

Вместе с тем, как показывают результаты, приведенные в столбцах 5–9, за счет правильного выбора границ гистерезиса для запросов третьего сервисного класса можно обеспечить заданные границы вероятностей отказа в обслуживании для запросов первого и второго сервисных классов, т.е. сделать для них незаметным наличие запросов третьего сервисного класса в тех случаях, когда для обслуживания запросов приоритетных классов имеется достаточное количество ОПЕ.

Таблица 1.

Результаты вычислений при  $a_1 = 2$ ,  $a_2 = 3$ ,  $a_3 = 1$ ,  $H_1 = 0,9$ ,  $H_2 = H_3 = 0,8$ ,  $v = 100$ .

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\lambda_1$	30	30	30	30	20	20	20	20	20
$\lambda_2$	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$\lambda_3$	30	30	30	30	30	30	30	10	10
$\rho$	1,2	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8
$\rho_{12}$	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$k_2$	96	93	93	93	93	96	96	96	96
$f_2$	94	90	90	90	90	93	93	93	93
$k_3$	70	70	80	89	80	80	90	90	90
$f_3$	40	40	75	85	75	75	85	85	88
$\pi_1$	0,0069	0,0021	0,0023	0,0035	0,0000	0,0001	0,0007	0,0003	0,0001
$\pi_2$	0,1456	0,2361	0,2617	0,3902	0,0183	0,0070	0,0795	0,0305	0,0156
$\pi_3$	0,9895	0,9907	0,9802	0,9003	0,9557	0,9365	0,9133	0,3744	0,1529
$\Lambda_1$	30,18	30,05	30,06	30,09	20,00	20,01	20,00	20,00	20,00
$\Lambda_2$	11,26	12,17	12,51	14,49	10,15	10,06	10,68	10,23	10,13
$\Lambda_3$	143,45	143,79	138,02	106,70	118,89	119,21	111,04	13,75	11,13
$m$	89,8	86,0	87,9	90,6	82,0	82,1	90,5	78,3	79,3

Следует отметить, что главным недостатком наличия запросов третьего сервисного класса при перегруженности узла за счет запросов этого сервисного класса является существенное возрастание числа повторных попыток обслуживания у третьего сервисного класса, что негативно сказывается на нагрузке на сигнальную систему сети. Так, например, при интенсивности исходного потока запросов третьего сервисного класса 30, интенсивность соответствующего потока запросов с учетом повторных попыток изменяется от 143,45 до 106,7 в зависимости от вероятности потерь таких запросов, что существенно больше интенсивности поступления первичных запросов всех сервисных классов.

С другой стороны, при наличии запросов третьего сервисного класса средняя обслуженная нагрузка в сети возрастает за счет более полного использования ее ресурсов. Так, если, например, в столбцах 1–4 среднее число заняты ОПЕ находится в районе 90, что соответствовало бы уровню использования ресурса звена, если бы все запросы первых двух сервисных классов обслуживались, то в столбцах 5–9 среднее число заняты ОПЕ уже значительно превосходит значение 70, которое соответствовало бы уровню использования ресурса звена, если бы все запросы первых двух сервисных классов обслуживались. Однако, как будет видно из результатов раздела 6, если учитывать и расходы, связанные с обслуживанием поступающих запросов, то рост доходов за счет более полного использования ресурсов звена может не приводить к росту прибыли.

Данные, приведенные в 1–4 столбцах, показывают, что при большой перегрузке границы гистерезиса для запросов третьего сервисного класса не оказывают существенное влияние

на значение параметра  $m$ , однако существенно влияют на вероятности потерь запросов более приоритетных сервисных классов. Таким образом, можно сделать вывод, что если общая нагрузка в сети оказалась существенно больше пропускной способности сети, то при выборе границ гистерезисов необходимо в первую очередь учитывать устойчивость пользователей приоритетных классов к качеству обслуживания.

Вместе с тем, после обеспечения заданных параметров качества обслуживания запросов приоритетных классов необходимо стремиться к уменьшению повторных попыток для запросов третьего сервисного класса.

В столбцах 5–7 табл. 1 приведены результаты вычислений, когда общая нагрузка в сети оказывается 100% пропускной способности, но для запросов первого и второго сервисных классов она составляет 70% пропускной способности. В этом случае обеспечено качество обслуживания запросов и первого, и второго сервисных классов; для второго сервисного класса потери не превосходят 1% при правильно подобранном гистерезисе для второго сервисного класса. Однако, если гистерезис третьего сервисного класса приблизить к гистерезису второго сервисного класса (столбец 7), то потери запросов второго сервисного класса уже составляют 8%. Это обстоятельство говорит о том, что в тех ситуациях, когда общая нагрузка всех потоков оказывается близкой к пропускной способности узла или ее превосходит, то гистерезис запросов третьего сервисного класса должен быть достаточно удален от гистерезиса запросов второго сервисного класса.

В столбцах 8–9 табл. 1 приведены результаты вычислений, когда общая нагрузка в сети оказывается 80% пропускной способности, но для запросов первого и второго сервисных классов она составляет 70% пропускной способности. В этом случае при предельном сближении гистерезисов качество обслуживания улучшается для запросов всех сервисных классов. Сравнение результатов этих столбцов показывает, что потери для всех запросов уменьшились в 2 раза, а полезная нагрузка возросла. Дальнейшее сближение гистерезисов приведет к их пересечению, что исследуется в следующем разделе.

Поскольку управление вероятностью доступа к ресурсам сети при  $\rho \geq 1$  ограничено, то важным является снижение вероятности настойчивости пользователей. Это позволит снизить неэффективную нагрузку на сигнальную систему сети. Обеспечить низкую вероятность настойчивости можно за счет предсказуемости состояния сети с точки зрения пользователя. Это означает, что в периоды пиковой нагрузки нужно обеспечивать устойчивость организации доступа к ресурсам сети: в тех случаях, когда произошло случайное падение нагрузки нужно сохранять запретные уровни доступа к ресурсам сети запросов третьего сервисного класса. Это позволит сформировать стратегию поведения пользователей: при возникновении отказов в обслуживании пользователи, формирующие запросы третьего потока, будут избегать повторных попыток соединения до завершения периода большой нагрузки.

В табл. 2 приведены результаты таких же вычислений, что и в табл. 1, но настойчивость пользователей, формирующих запросы третьего сервисного класса, снижена в 2 раза.

Приведенные в табл. 2 результаты показывают, что уменьшение настойчивости при формировании запросов третьего сервисного класса приводит не только к существенному уменьшению числа повторных запросов в сети, но и улучшает другие показатели качества функционирования сети; при этом улучшаются показатели и для запросов второго и первого сервисных классов. Действительно, для перегруженных узлов интенсивность запросов третьего сервисного класса снизилась почти в 3 раза (столбцы 1–7 таблиц 1 и 2), а вероятность потерь для запросов второго класса примерно на 10%–15%. Общая обслуженная нагрузка несколько снизилась за счет большего числа необслуженных запросов третьего сервисного класса. Более выпукло эти свойства проявляются при использовании стоимостных функционалов, когда учитывается стоимость обслуживания запроса, исследованных в разделах 6 и 7.

Таблица 2.

Результаты вычислений при  $a_1 = 2$ ,  $a_2 = 3$ ,  $a_3 = 1$ ,  $H_1 = 0,9$ ,  $H_2 = 0,8$ ,  $H_3 = 0,4$ ,  $v = 100$ .

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\lambda_1$	30	30	30	30	20	20	20	20	20
$\lambda_2$	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$\lambda_3$	30	30	30	30	30	30	30	10	10
$\rho$	1,2	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8
$\rho_{12}$	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$k_2$	96	93	93	93	93	96	96	96	96
$f_2$	94	90	90	90	90	93	93	93	93
$k_3$	70	70	80	89	80	80	90	90	90
$f_3$	40	40	75	85	75	75	85	85	88
$\pi_1$	0,0058	0,0020	0,0031	0,0022	0,0000	0,0001	0,0006	0,0002	0,0001
$\pi_2$	0,1248	0,2191	0,2418	0,2419	0,0163	0,0063	0,0659	0,0244	0,0128
$\pi_3$	0,9724	0,9781	0,8141	0,9526	0,8376	0,8387	0,7668	0,3022	0,1270
$\Lambda_1$	30,12	30,05	30,08	30,05	20,00	20,00	20,01	20,00	20,00
$\Lambda_2$	10,80	11,83	13,55	12,13	10,13	10,05	10,53	10,17	10,01
$\Lambda_3$	48,35	49,07	44,23	48,25	44,96	44,99	42,93	11,17	10,10
$m$	85,2	85,1	89,9	87,4	81,2	81,3	88,5	77,5	78,3

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. При нагрузке в узле, превосходящей его пропускную способность или близкой к ней, необходимо использовать достаточно далеко отстоящие гистерезисы для запросов второго и третьего сервисных классов.
2. Гистерезис для запросов второго сервисного класса должен быть достаточно узким, если суммарная нагрузка первого и второго сервисных классов составляет не более 0,7 эрл. на ОПЕ.
3. Гистерезис по обслуживанию запросов третьего класса должен быть достаточно широким, чтобы обеспечить сохранения режима доступа при колебаниях нагрузки в области ее больших значений.
4. Если вся поступающая нагрузка в узле может быть пропущена с малой вероятностью потерь, то гистерезисы для второго и третьего сервисных классов должны быть близкими.
5. Снижение вероятности настойчивости пользователей, создающих нагрузку третьего сервисного класса, позволяет улучшить показатели эффективности использования ресурсов сети в случае, когда показатель удельной общей нагрузки запросов всех сервисных классов на одну ОПЕ  $\rho < 1$ .

### 3. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ С ПЕРЕСЕКАЮЩИМИСЯ ГИСТЕРЕЗИСАМИ

Здесь будут рассматриваться результаты расчетов моделей с пересекающимися гистерезисами только в области относительно небольших нагрузок, т.е.  $\rho \leq 0,8$ , поскольку, как показано в предыдущем разделе, при бóльшей нагрузке сближение гистерезисов не целесообразно.

Для удобства в первом столбце приведены результаты расчетов из последнего столбца табл.

1. Сравнение данных из первого и второго столбцов табл. 3 подтверждают сформулированное в предыдущем разделе предположение о том, что увеличение верхней границы гистерезиса для запросов третьего сервисного класса повышает эффективность использования ресурсов сети при сохранении ограничений к качеству обслуживания запросов первого сервисного класса.

Таблица 3.

Результаты вычислений при  $a_1 = 2, a_2 = 3, a_3 = 1, H_1 = 0,9, H_2 = 0,8, H_3 = 0,8, v = 100$ .

0	1	2	3	4	5	6	7
$\lambda_1$	20	20	20	10	10	10	10
$\lambda_2$	10	10	10	10	10	10	10
$\lambda_3$	10	10	10	30	30	40	40
$\rho$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9
$\rho_{12}$	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5
$k_2$	96	96	96	96	96	96	96
$f_2$	93	93	93	90	90	93	93
$k_3$	90	95	95	95	91	95	91
$f_3$	88	88	80	80	80	80	80
$\pi_1$	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$\pi_2$	0,0156	0,0139	0,0111	0,0090	0,0016	0,0414	0,0058
$\pi_3$	0,1529	0,0511	0,1015	0,0723	0,1164	0,3308	0,4222
$\Lambda_1$	20,00	20,00	20,00	10,00	10,00	10,00	10,00
$\Lambda_2$	10,13	10,01	10,01	10,06	10,01	10,33	10,05
$\Lambda_3$	11,13	10,04	10,10	31,44	32,31	53,5	59,64
$m$	78,3	79,1	78,6	79,1	78,5	85,5	84,4

Сравнение результатов вычислений, приведенных во втором и третьем столбцах табл. 3, показывают, что увеличение границ гистерезиса для запросов третьего сервисного класса за счет его нижней границы не очень существенно ухудшают характеристики использования ресурсов сети, хотя вероятность потерь для запросов третьего сервисного класса, естественно, возрастает. Одновременно уменьшается и показатель эффективности использования ресурсов звена  $m$ .

Далее проводится численное исследование характеристик сети при существенно большей доле запросов третьего сервисного класса. Здесь проводится сравнение двух верхних границ гистерезиса для запросов третьего сервисного класса. Из приведенных результатов видно, что дальнейшее улучшение качества обслуживания запросов третьего сервисного класса невозможно, поскольку действует ограничение сверху на границы гистерезиса, задаваемое верхней границей гистерезиса для запросов второго сервисного класса; выше указанного уровня границу поднять нельзя, поскольку предположение об объеме используемого ресурса запросами второго сервисного класса состоит в том, что они используют одновременно 3 ОПЕ. С другой стороны, качество обслуживания запросов первых двух сервисных классов таково, что имеется определенный запас неиспользуемых ими ресурсов, который может быть предоставлен для запросов третьего сервисного класса; но в этом случае верхняя граница гистерезиса для запросов третьего сервисного класса окажется выше верхней границы гистерезиса для запросов второго сервисного класса. Такое расположение гистерезисов рассматривается в следующем разделе.

В последующих столбцах проведены расчеты в случае, когда доля запросов третьего класса в общей нагрузке еще больше. Здесь картина несколько другая: сближение верхних границ гистерезисов для запросов второго и третьего сервисных классов существенно ухудшает показатели вероятности потерь для запросов второго сервисного класса, поскольку при удельной нагрузке 0,9 эрл. уже нет запаса в ресурсах, выделенных для запросов первых двух сервисных классов.

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.



1. Если суммарная нагрузка всех потоков составляет не более 0,8 эрл. на ОПЕ, то при большой доле нагрузки, создаваемой запросами третьего сервисного класса, является целесообразным устанавливать верхнюю границу гистерезиса для запросов третьего сервисного класса выше верхней границы гистерезиса для запросов второго сервисного класса.
2. Если суммарная нагрузка всех потоков составляет не более 0,8 эрл. на ОПЕ, а доля нагрузки, создаваемой запросами третьего сервисного класса, невелика, то следует использовать пересекающееся расположение гистерезисов, при этом гистерезис для запросов третьего класса должен быть достаточно широким, чтобы обеспечить сохранения режима доступа при колебаниях нагрузки в области ее больших значений.

#### 4. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ В СЛУЧАЕ, КОГДА ОДИН ГИСТЕРЕЗИС СОДЕРЖИТ ВНУТРИ СЕБЯ ДРУГОЙ ГИСТЕРЕЗИС

Здесь будут рассматриваться результаты расчетов характеристик модели, когда один гистерезис содержит внутри себя другой гистерезис. Поскольку, как следует из предыдущих вычислений, такая ситуация может быть целесообразна лишь в области относительно небольших нагрузок, то рассматриваются случаи с  $\rho = 0,8$  и  $\rho_{12} = 0,7$  или  $\rho_{12} = 0,5$ .

В рассматриваемых примерах практически отсутствуют потери запросов первого сервисного класса. Однако, как видно из результатов столбца 3 табл. 4, потери запросов второго сервисного класса могут оказаться большими, если верхняя граница гистерезиса для запросов третьего сервисного класса окажется слишком высокой, что облегчает доступ запросам этого класса к ресурсам сети. В то же время, нижняя граница гистерезиса для запросов третьего сервисного класса оказывает слабое влияние на характеристики сети. Показатель  $m$  оказывается достаточно стабильным, поскольку в рассматриваемых обстоятельствах практически все запросы обслуживаются (возможно не с первой попытки), а поток повторных запросов практически отсутствует.

Таблица 4.

Результаты вычислений при  $a_1 = 2$ ,  $a_2 = 3$ ,  $a_3 = 1$ ,  $H_1 = 0,9$ ,  $H_2 = 0,8$ ,  $H_3 = 0,8$ ,  $v = 100$ .

0	1	2	3	4	5
$\lambda_1$	20	20	20	10	10
$\lambda_2$	10	10	10	10	10
$\lambda_3$	10	10	10	30	30
$\rho$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
$\rho_{12}$	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5
$k_2$	96	96	96	96	96
$f_2$	93	93	93	93	93
$k_3$	99	97	99	99	97
$f_3$	90	90	80	90	90
$\pi_1$	0,0004	0,0002	0,0002	0,0001	0,0000
$\pi_2$	0,0351	0,0265	0,0661	0,0305	0,0189
$\pi_3$	0,0221	0,0229	0,0164	0,0168	0,0203
$\Lambda_1$	20,00	20,00	20,00	10,00	10,00
$\Lambda_2$	10,03	10,02	10,05	10,01	10,02
$\Lambda_3$	10,02	10,02	10,02	30,04	30,05
$m$	79,5	79,0	78,6	79,4	79,2

Слабая зависимость характеристик от нижней границы гистерезиса связана с тем, что мала вероятность достижения верхней границы гистерезиса, т.е. вообще возникновения ограничений

в сети. После возникновения ограничений процесс, задающий объем используемого ресурса, очень быстро достигает нижней границы гистерезиса, если она существенно выше интенсивности поступления запросов остальных потоков, что всегда выполнялось в рассматриваемых примерах.

### 5. СТОИМОСТНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЫ ЗВЕНА БШС С ТРЕМЯ ПОТОКАМИ И ГИСТЕРЕЗИСАМИ

На основании упрощенной трехпоточковой модели обслуживания запросов БШС, приведенной в [5] (раздел 3), рассмотрим эффективность использования различных видов расположения гистерезисов при управлении доступом для запросов трех сервисных классов с учетом таких дополнительных параметров как тариф за использование одной ОПЕ в единицу времени запросом  $i$ -го сервисного класса, обозначаемый через  $c_i$ , и стоимость обработки одного запроса вне зависимости от того, была предоставлена услуга или нет, обозначаемую через  $\alpha$ .

На основании расчета характеристик обслуживания запросов можно вычислить стоимостной функционал, показывающий стоимость оказанных услуг:

$$R = \Lambda_1(1 - \pi_1)c_1a_1 + \Lambda_2(1 - \pi_2)c_2a_2 + \Lambda_3(1 - \pi_3)c_3a_3, \quad (7)$$

и

$$P = R - \alpha(\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3) \quad (8)$$

— “доход”, полученный от оказанных услуг с учетом стоимости установления соединения.

Для обеспечения экономической эффективности работы сети необходимо добиваться максимально возможной загрузки сети, поэтому при выборе исходных данных для расчетов использовалось следующее соображение. Предполагается, что сеть спроектирована на обслуживание запросов первых двух сервисных классов в ЧНН с необходимым качеством, однако из-за неравномерности нагрузки часть оборудования простаивает, поэтому допускается обслуживание запросов третьего сервисного класса с негарантированным качеством обслуживания, т.е. для запросов третьего сервисного класса потери не нормируются. Последнее обстоятельство позволяет рассматривать различные ситуации, когда потери запросов третьего сервисного класса могут быть весьма большими и интенсивность запросов третьего сервисного класса регулируется лишь соображениями практической целесообразности для абонентов использовать сеть с большими потерями, но с относительно низкими тарифами на обслуживание. При таких предположениях разница между  $R$  и  $P$  может быть весьма значительной, что может изменять качественную картину на сети и, соответственно, влиять на выбор гистерезиса при управлении доступом запросов третьего сервисного класса к ресурсам сети, при котором обеспечивается максимальный доход от эксплуатации сети.

Для выяснения эффективности дополнительного обслуживания сетью запросов третьего сервисного класса вычисляются как справочные параметры  $R_0$  и  $P_0$  — значения  $R$  и  $P$  соответственно, если вся поступающая нагрузка была бы обслужена, которые вычисляются по формулам

$$R_0 = \lambda_1c_1a_1 + \lambda_2c_2a_2 + \lambda_3c_3a_3, \quad (9)$$

и

$$P_0 = R_0 - \alpha(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3), \quad (10)$$

а так же соответствующие характеристики для сети, если обслуживаются только запросы двух первых классов без потерь, которые обозначаются через  $R_0^*$  и  $P_0^*$  и вычисляются по формулам

$$R_0^* = \lambda_1c_1a_1 + \lambda_2c_2a_2, \quad (11)$$

и

$$P_0^* = R_0^* - \alpha(\lambda_1 + \lambda_2). \quad (12)$$

Следовательно, разности  $R_0 - R$  и  $P_0 - P$  указывают на потери, связанные с отказами в обслуживании части запросов, а  $R - R^*$  и  $P - P^*$  указывают на дополнительный доход, обеспеченный обслуживанием запросов третьего сервисного класса.

Во многих случаях пользователи, порождающие запросы первого сервисного класса, используют безлимитные тарифы. В этом случае доход сети не зависит от объема оказанных услуг, а зависит только от количества таких пользователей. В этом случае важен только показатель качества обслуживания таких запросов — вероятность потерь. Поэтому в такой ситуации было бы более правильным использовать значение  $c_1 = 0$ . Однако такое изменение стоимостного функционала окажется несущественным с точки зрения анализа разностей  $R - R^*$  и  $P - P^*$ , поскольку во всех рассматриваемых вариантах расчетов вероятностью потерь запросов первого сервисного класса можно пренебречь.

## 6. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СТОИМОСТНЫХ ФУНКЦИОНАЛОВ

Используя те же исходные данные, что и в предыдущих разделах, было проведено вычисление стоимостных функционалов, которое показывает, что вид функционала, который предполагается оптимизировать за счет выбора гистерезисов управления потоками запросов, оказывает существенное влияние на вид гистерезисов.

Таблица 5.

Результаты вычислений при  $a_1 = 2$ ,  $a_2 = 3$ ,  $a_3 = 1$ ,  $c_1 = 5$ ,  $c_2 = 3$ ,  $c_3 = 1$ ,  $H_1 = 0,9$ ,  
 $H_2 = H_3 = 0,8$ ,  $v = 100$ .

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda_1$	30	30	30	30	20	20	20	20	20	20
$\lambda_2$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$\lambda_3$	30	30	30	30	30	30	30	10	10	10
$\rho$	1,2	1,2	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8
$\rho_{12}$	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$k_2$	96	96	93	93	93	96	96	96	96	96
$f_2$	93	93	90	90	90	93	93	93	93	93
$k_3$	70	70	80	89	80	80	90	90	90	95
$f_3$	40	60	75	85	75	75	85	85	88	88
$R$	237,0	235,5	237,4	242,6	187,4	187,5	188,4	188,0	189,0	188,6
$P$	218,6	216,6	219,3	227,4	172,5	172,5	174,2	183,6	184,9	184,6
$R_0$	270,0	270,0	270,0	270,0	210,0	210,0	210,0	190,0	190,0	190,0
$R_0^*$	240,0	240,0	240,0	240,0	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0
$P_0$	263,0	263,0	263,0	263,0	204,0	204,0	204,0	186,0	186,0	186,0
$P_0^*$	236,0	236,0	236,0	236,0	177,0	177,0	177,0	177,0	177,0	177,0

В столбцах 1–4 табл. 5 приведены результаты расчетов при перегруженном общим потоком запросов звене ВШС. Как следует из результатов, приведенных в соответствующих столбцах табл. 1, в этом случае потери запросов третьего сервисного класса составляют от 90 до 99%, потери запросов первого сервисного класса соответствуют нормативу (за исключением первого столбца), а второго — составляют от 15 до 39%, что намного превосходит допустимый уровень потерь, поскольку пропускная способность узла не позволяет обслужить запросы первых двух сервисных классов с заданным качеством.

Значение показателя  $R$  достигает своего максимума в четвертом столбце, так же как и значение показателя  $m$  в табл. 1, при этом оно здесь впервые превосходит значение величины  $R_0^*$ , учитывающей только наличие запросов первых двух сервисных классов. Значение показателя  $P$ , учитывающего стоимость обслуживания каждого поступившего запроса, всегда остается меньше соответствующего показателя  $P_0^*$ . Это дает основание считать, что при значениях  $\rho > 1$  наличие запросов третьего сервисного класса приводит к снижению показателя  $P$ , указывающего на доход сети от обслуживания запросов всех сервисных классов. Следовательно, такие периоды в работе сети должны быть относительно короткими, а выпадающие за счет этих периодов доходы должны компенсироваться периодами, когда узел не будет перегруженным.

В столбцах 5–7 табл. 5 приведены результаты расчетов при сильно нагруженном общим потоком запросов узле БШС, однако потоки запросов первых двух сервисных классов могут быть обслужены с заданным качеством. В этом случае имеется возможность из множества расположений гистерезисов, обеспечивающих заданные параметры потерь для запросов первых двух сервисных классов, выбирать такие, которые обеспечивают наименьшие потери запросов третьего сервисного класса. Как следует из результатов, приведенных в соответствующих столбцах табл. 1, в этом случае потери запросов третьего сервисного класса составляют от 90 до 95%, потери запросов первого и второго сервисных классов соответствуют нормативам (за исключением 7-го столбца, когда потери запросов второго сервисного класса равны почти 8%). Значения показателей  $R$  и  $P$  оказываются наибольшими в седьмом столбце за счет более полного доступа к ресурсам запросов третьего сервисного класса. Отметим, что во всех столбцах значение показателя  $R$  превосходит значение  $R_0^*$ , а значение показателя  $P$  близко к значению  $P_0^*$ .

Здесь следует заметить, что стоимостные показатели слабо учитывают требования к уровню потерь: значения этих показателей в седьмом столбце больше, чем в шестом, хотя при данных, рассматриваемых в шестом столбце, потери запросов второго сервисного класса более чем в 10 раз ниже, чем потери запросов этого сервисного класса в седьмом столбце, и соответствуют нормативам потерь.

В столбцах 8–10 табл. 5 приведены результаты расчетов при значительном снижении интенсивности потока запросов третьего сервисного класса. Как следует из результатов, приведенных в столбцах 8 и 9 табл. 1 и 2 табл. 3, в этом случае потери запросов третьего сервисного класса составляют от 5 до 37%, потери запросов первого и второго сервисных классов соответствуют нормативам, при этом потери запросов третьего сервисного класса при данных, рассматриваемых в девятом столбце, в 3 раза выше, чем потери запросов этого сервисного класса в десятом столбце, хотя стоимостные показатели в этом случае несколько выше. Значения показателей  $R$  и  $P$  оказываются больше значений соответствующих значений показателей  $R_0^*$  и  $P_0^*$  во всех рассмотренных случаях. Заметим, что в этих случаях значения показателей  $R$  и  $P$  оказываются близки к значениям стоимостных показателей  $R_0$  и  $P_0$ , поскольку теперь обслуживается почти вся поступающая нагрузка. Следовательно, при таком объеме поступающей нагрузки наличие запросов третьего сервисного класса позволяет более эффективно использовать ресурсы сети и получать дополнительный доход за счет обслуживания таких запросов.

Отметим, что разница в ситуациях, рассматриваемых в столбцах 8–10 и столбцах 5–7 табл. 5 состоит лишь в том, что уменьшилась интенсивность потока запросов третьего сервисного класса. И это обстоятельство привело к росту как показателя  $P$ , что и не удивительно, поскольку общий поток запросов упал, но и показателя  $R$  за счет уменьшения потерь запросов двух первых сервисных классов.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. Стоимостные функционалы слабо чувствительны к вероятности потерь запросов, в особенности запросов приоритетных классов.
2. При перегруженной сети ( $\rho > 1$ ) наличие запросов третьего сервисного класса приводит к снижению стоимостных показателей, в особенности показателя  $P$ , указывающего на доход сети от обслуживания запросов всех сервисных классов, значение которого уменьшается за счет большой интенсивности потока повторных запросов третьего сервисного класса.
3. В сильно нагруженной сети ( $\rho > 0,8$ ) за счет запросов третьего сервисного класса ресурсы сети используются более полно, однако функционал  $P$  чувствителен к выбору границ гистерезиса для запросов третьего сервисного класса.
4. В слабо нагруженной сети ( $\rho \leq 0,7$ ) за счет запросов третьего сервисного класса ресурсы сети используются более эффективно, чем при обслуживании только запросов двух первых классов.

## 7. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ УЗЛА БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ СУТОЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ НАГРУЗКИ

Как показано в предыдущем разделе, не во всех случаях наличие запросов третьего сервисного класса приводит к увеличению доходов сети, т.е. является экономически целесообразным. С другой стороны, профиль суточной нагрузки в сети обычно выглядит таким образом, что имеются временные промежутки, когда нагрузка в сети мала и наличие запросов третьего сервисного класса приводит к дополнительному доходу сети. Поэтому целесообразно исследовать влияние суточных колебаний нагрузки на эффективность обслуживания запросов третьего сервисного класса. Результаты этого исследования приведены в этом разделе.

Рассмотрены два варианта нагрузки: они различаются объемом нагрузки, создаваемой запросами третьего сервисного класса. Нагрузка, создаваемая запросами первых двух сервисных классов, выбрана таким образом, что сеть в ЧНН способна обслужить все запросы с заданным качеством: потери запросов первого класса не превосходят 0,5 %, а потери запросов второго класса не превосходят 5 %. Запросы третьего сервисного класса имеют ненормированные потери. В первом случае максимальная нагрузка в сети с учетом запросов всех сервисных классов не превосходит в ЧНН 0,9 эрл. на одну ОПЕ (см. рис. 1), а во втором случае рассматривается удвоенная нагрузка запросов третьего сервисного класса и в этом случае общая нагрузка в ЧНН превосходит 1 эрл. на одну ОПЕ (см. рис. 2). В первом случае будем говорить о малой нагрузке, создаваемой запросами третьего сервисного класса, а во втором случае — о большой.

На рис. 1 приведен суточный профиль анализируемой нагрузки. Для запросов первого класса предполагается примерно одинаковая нагрузкой в дневное время (на рис. 1 интенсивность нагрузки запросов первого класса обозначена цифрой 1). Интенсивность запросов второго сервисного класса предполагается вечерний ЧНН с достаточно высокой интенсивностью в дневное время (на рис. 1 и 2 интенсивность поступления запросов второго сервисного класса обозначена цифрой 2). Для запросов третьего сервисного класса предполагается вечерний ЧНН, сдвинутый на более позднее время по сравнению с ЧНН запросов второго сервисного класса с относительно более медленным нарастанием интенсивности нагрузки в дневное время (на рис. 1 и 2 интенсивность поступления запросов третьего сервисного класса обозначена цифрой 3). Как и в предыдущих вычислениях предполагается, что запросы различных сервисных классов используют различное количество ОПЕ: запросы первого сервисного класса используют 2 ОПЕ, запросы второго сервисного класса — 3 ОПЕ и запросы третьего сервисного класса — одну ОПЕ. На рис. 1 и 2 приведены интенсивности общей нагрузки: создаваемой всеми запросами с учетом их потребностей в ОПЕ (график, обозначенный цифрой 4) и создаваемой всеми запросами первых двух сервисных классов с учетом их потребностей в ОПЕ (график, обозначенный цифрой 5).

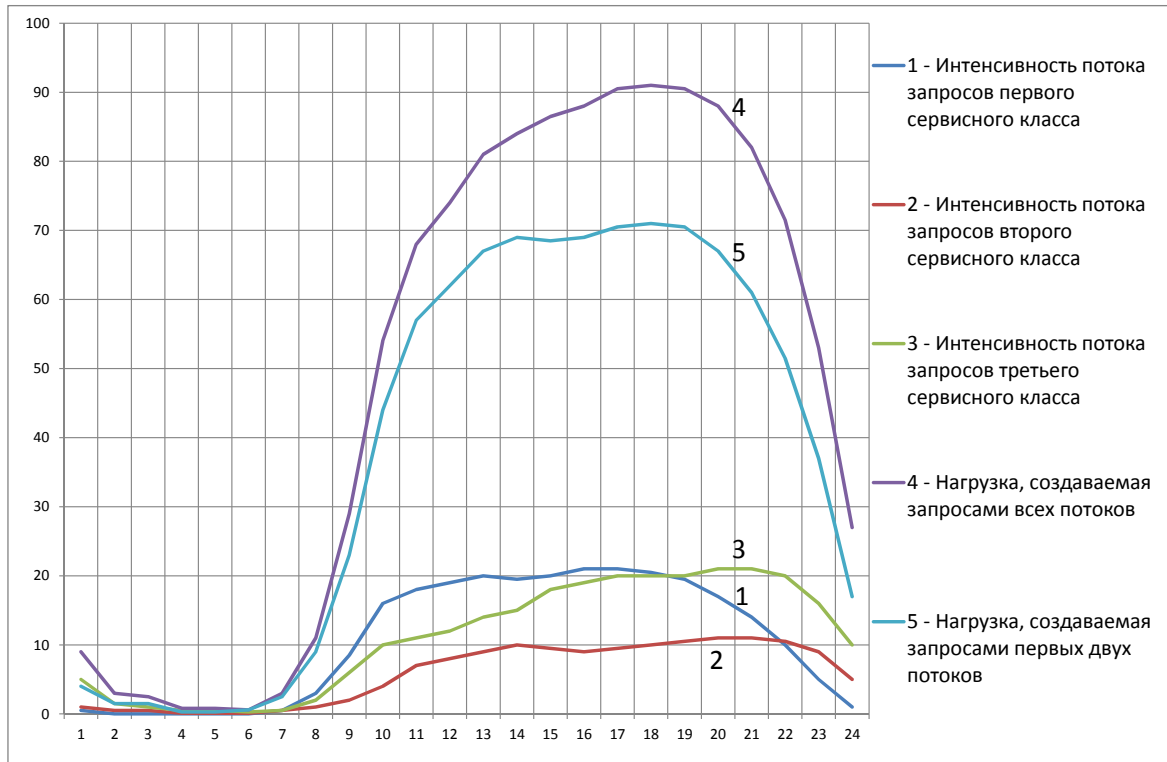


Рис. 1. Профиль суточной нагрузки с малой нагрузкой, создаваемой запросами третьего сервисного класса

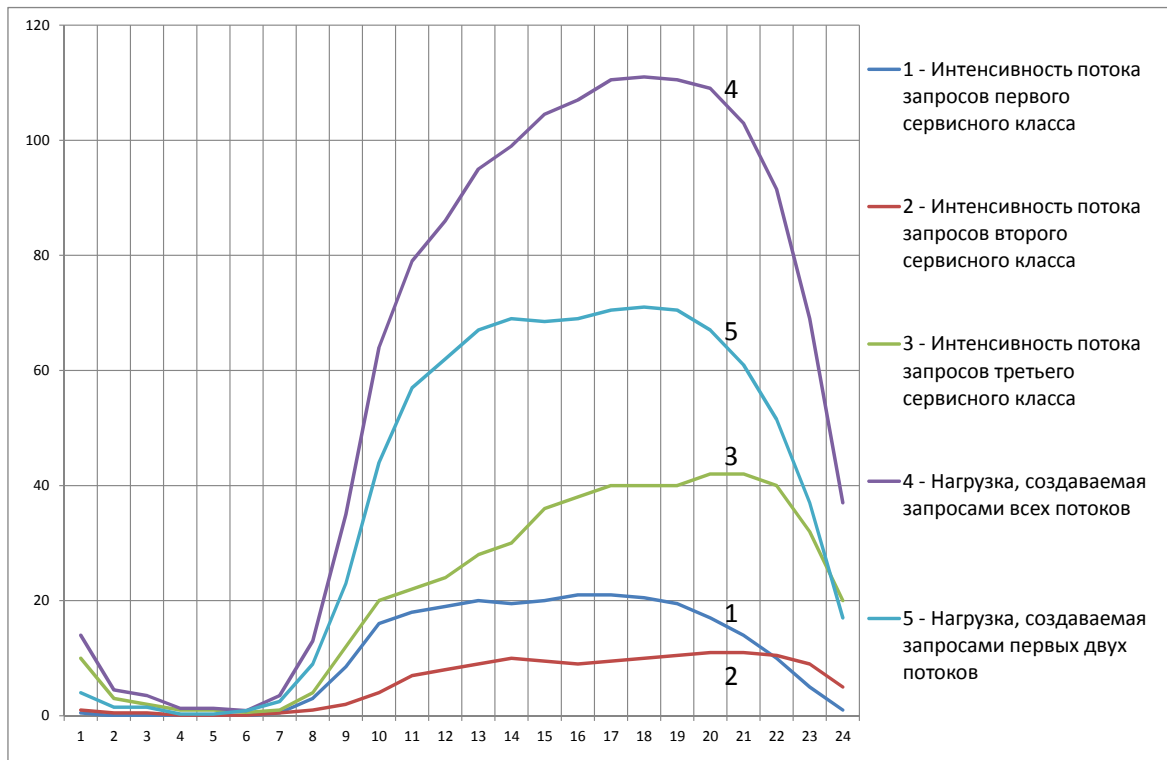


Рис. 2. Профиль суточной нагрузки с большой нагрузкой, создаваемой запросами третьего сервисного класса

Таким образом, большая нагрузка создается запросами первых двух классов на интервале времени с 10 до 21 часа; при этом ресурсов сети достаточно для обслуживания средней нагрузки, создаваемой запросами этих классов.

Общая нагрузка, создаваемая запросами всех классов, достигает своего пика в интервале между 16 и 20 часами, когда уровень нагрузки не позволяет обеспечить всем запросам приемлемое качество обслуживания и необходимо использовать ограничения доступа к ресурсам сети. Поскольку этот временной интервал соответствует и большой нагрузке, создаваемой запросами третьего сервисного класса, то желательно стимулировать источники такой нагрузки снизить активность в этот интервал времени.

В том случае, когда нагрузка, создаваемая запросами третьего сервисного класса, в 2 раза больше (см. рис. 2), система будет сильно перегружена на временном интервале с 12 до 22 часов. Как показывают результаты расчетов, приведенные в предыдущих разделах, для сохранения экономической целесообразности обслуживания запросов третьего класса, необходимо снизить их настойчивость при получении сигнала о занятости системы в часы большой нагрузки (или более точно, значение параметра  $p_a$ ) и снизить активность таких пользователей. Выбранные границы гистерезиса для запросов третьего сервисного класса таковы, что такие запросы не будут обслуживаться в этом временном интервале; предполагается, что пользователи будут использовать в этом временном интервале альтернативные сети.

Для учета влияния такого поведения пользователей рассмотрены два случая настойчивости пользователей с третьим классом обслуживания: их настойчивость рассматривается при значениях 0,8 и 0,4. Выбор второго значения обусловлен тем соображением, что получив повторно отказ в обслуживании пользователь прекращает повторные попытки воспользоваться этой сетью.

В тех случаях, когда границы гистерезиса для запросов третьего сервисного класса выбраны слишком узкими, возможно случайное попадание таких запросов на обслуживание в интервалы с высокой нагрузкой в сети, что может стимулировать пользователя на дополнительные повторные попытки. Целью исследования является, в частности, выяснить влияние настойчивости пользователей с третьим классом обслуживания на стоимостные характеристики работы сети.

Во всех случаях при расчетах использовались следующие параметры модели:  $a_1 = 2$ ,  $a_2 = 3$ ,  $a_3 = 1$ ,  $c_1 = 5$ ,  $c_2 = 3$ ,  $c_3 = 1$ ,  $H_1 = 0,9$ ,  $H_2 = 0,8$ ,  $v = 100$ . Границы гистерезисов были фиксированы на протяжении суток и составляли значения  $k_2 = 95$ ,  $f_2 = 90$ ,  $k_3 = 93$ ,  $f_3 = 70$ . На рис. 3–8 приведены графики стоимостных функционалов  $R$ ,  $R_0^*$ ,  $P$  и  $P_0^*$ , которые помечены цифрами 1, 2, 3 и 4 соответственно.

На рис. 3 приведены графики стоимостных функционалов при малой нагрузке, создаваемой запросами третьего сервисного класса, и настойчивости  $H_3 = 0,8$ . В этом случае суммарное значение за сутки показателя  $R$  составило 3922,8, а показателя  $P$  — 3712,7. Поскольку выбранный уровень нагрузки, создаваемой запросами первых двух классов, таков, что они могли быть обслужены без потерь при отсутствии запросов третьего сервисного класса, то суммарное значение за сутки показателя  $R_0^*$  составило 3840,34, а показателя  $P_0^*$  — 3674,27. Поэтому дополнительный рост объема оказанных услуг за счет обслуживания запросов третьего сервисного класса составил 5,7%, а дополнительный рост доходов — 4,5%. Второй показатель оказался ниже из-за большого числа необслуженных запросов третьего сервисного класса, поступающих во временном интервале с высокой общей нагрузкой.

Таким образом, видно, что при использовании показателя  $R$  увеличение интенсивности потока запросов третьего сервисного класса ведет к росту этого показателя, а при использовании показателя  $P$  — к снижению этого показателя. Поэтому важно правильно выбирать показатель эффективности работы сети для выбора управления доступом к ресурсам сети.

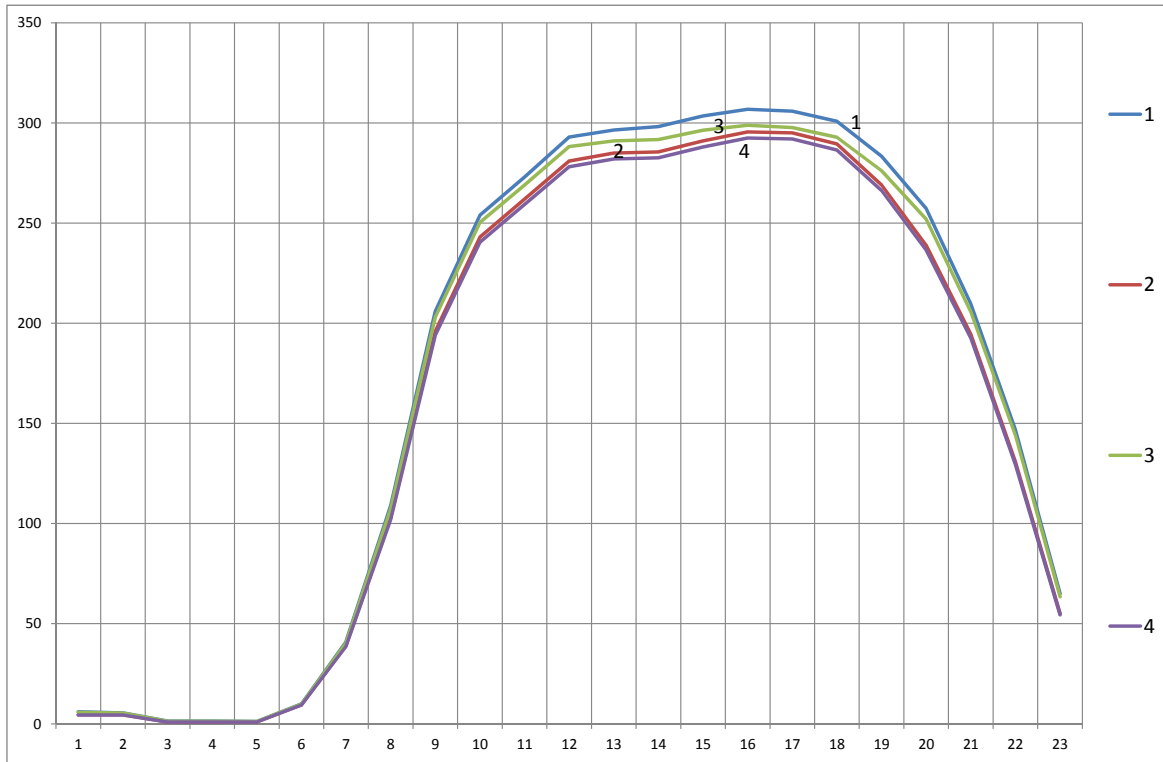


Рис. 3. Профиль значений стоимостных функционалов при малой нагрузке, создаваемой запросами третьего сервисного класса

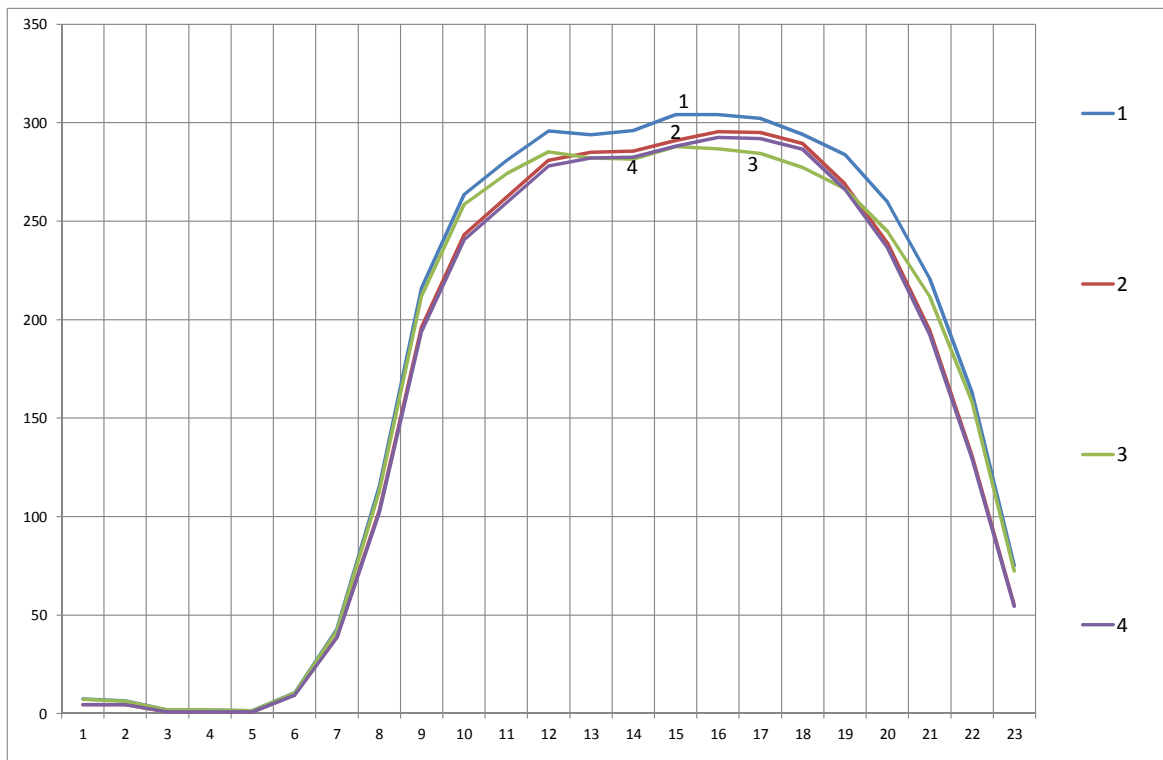


Рис. 4. Профиль значений стоимостных функционалов при большой нагрузке, создаваемой запросами третьего сервисного класса



На рис. 4 приведены графики стоимостных функционалов при большой нагрузке, создаваемой запросами третьего сервисного класса, и настойчивости  $H_3 = 0,8$ . В этом случае суммарное значение за сутки показателя  $R$  составило 4052,8, а показателя  $P$  — 3789,2. Значения  $R_0^*$  и  $P_0^*$  остаются, естественно, такими же, как и в предыдущем случае. Дополнительный рост объема оказанных услуг за счет обслуживания запросов третьего сервисного класса теперь составил 7,0%, а дополнительный рост доходов — 3,5%. Первый показатель вырос за счет более полной загрузки системы в основном в том временном промежутке, когда общая нагрузка на звене не очень высокая, второй показатель уменьшился из-за еще большего числа необслуженных запросов третьего сервисного класса, поступающих во временном интервале с высокой общей нагрузкой и удлинения этого временного интервала.

Понятно, что наиболее интересные процессы происходят на временном промежутке, когда общая нагрузка в узле высокая, поэтому далее будет рассматриваться временной интервал с 10 до 21 часа.

На рис. 5 приведены графики при малой нагрузке, создаваемой запросами третьего сервисного класса, и  $H_3 = 0,8$ . Из приведенных графиков видно, что значение стоимостного функционала  $R$  всегда больше значения  $R_0^*$ , а значение  $P$  больше значения  $P_0^*$ , т.е. обслуживание запросов третьего сервисного класса всегда целесообразно.

На рис. 6 приведены графики при большой нагрузке, создаваемой запросами третьего сервисного класса, и  $H_3 = 0,8$ .

Из приведенных графиков видно, что значение стоимостного функционала  $R$  всегда больше значения  $R_0^*$ , а значение  $P$  на временном интервале с 12 до 18 меньше значения  $P_0^*$ , т.е. обслуживание запросов третьего сервисного класса в этом промежутке времени является убыточным. Однако в целом за сутки сохраняется прибыль 3,5%.

Далее приводятся результаты расчетов при тех же параметрах модели, но настойчивость запросов третьего сервисного класса снижена вдвое.

На рис. 7 приведены графики при малой нагрузке, создаваемой запросами третьего сервисного класса, и  $H_3 = 0,4$ . Из приведенных графиков видно, что как и на рис. 5 значение стоимостного функционала  $R$  всегда больше значения  $R_0^*$ , а значение  $P$  больше значения  $P_0^*$ , при этом графики  $R$  и  $P$  более близки друг к другу, поскольку количество повторных попыток запросов третьего сервисного класса существенно снижено. Дополнительный рост объема оказанных услуг за счет обслуживания запросов третьего сервисного класса теперь составил 5,1%, а дополнительный рост доходов — 4,4%.

На рис. 8 приведены графики при большой нагрузке, создаваемой запросами третьего сервисного класса. Из приведенных графиков видно, что как и на рис. 5 значение стоимостного функционала  $R$  всегда больше значения  $R_0^*$ , а значение  $P$  больше значения  $P_0^*$ , что отличает получившуюся ситуацию от аналогичной на рис. 6. Дополнительный рост объема оказанных услуг за счет обслуживания запросов третьего сервисного класса теперь составил 6,7%, а дополнительный рост доходов — 5,0%. Сравнение результатов расчетов случая с настойчивостью  $H_3 = 0,8$  и  $H_3 = 0,4$  показывает, что теперь при росте интенсивности потока запросов третьего сервисного класса возрастает как значение функционала  $R$ , так и значение функционала  $P$ .

Это позволяет сделать вывод о том, что снижение вероятности настойчивости пользователей, создающих запросы третьего сервисного класса, позволяет повышать эффективность функционирования сети. Поэтому наиболее эффективным с учетом суточных колебаний нагрузки является обслуживание запросов третьего сервисного класса таким образом, что в интервалах с высокой общей нагрузкой запросов первых двух сервисных классов интенсивность потока запросов третьего сервисного класса снижается за счет ухода на альтернативные сети.

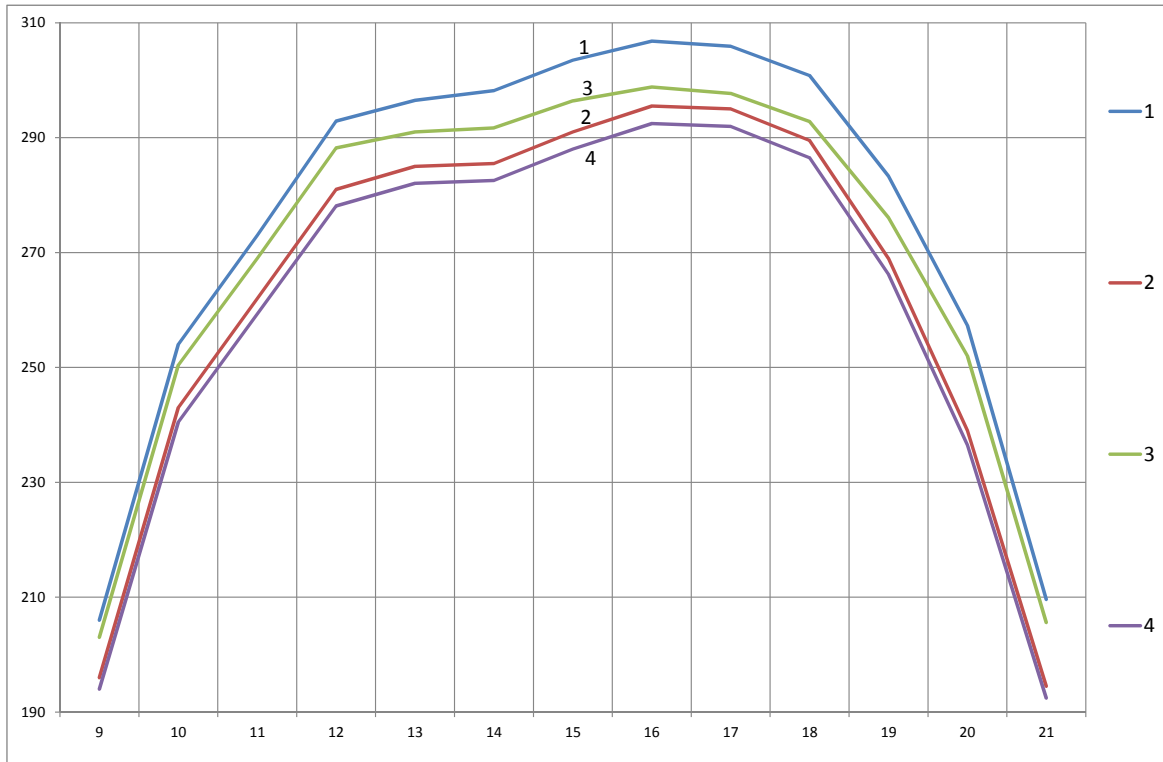


Рис. 5. Профиль значений стоимостных функционалов в дневное и вечернее время при малой нагрузке, создаваемой запросами третьего сервисного класса, и  $H_3 = 0,8$

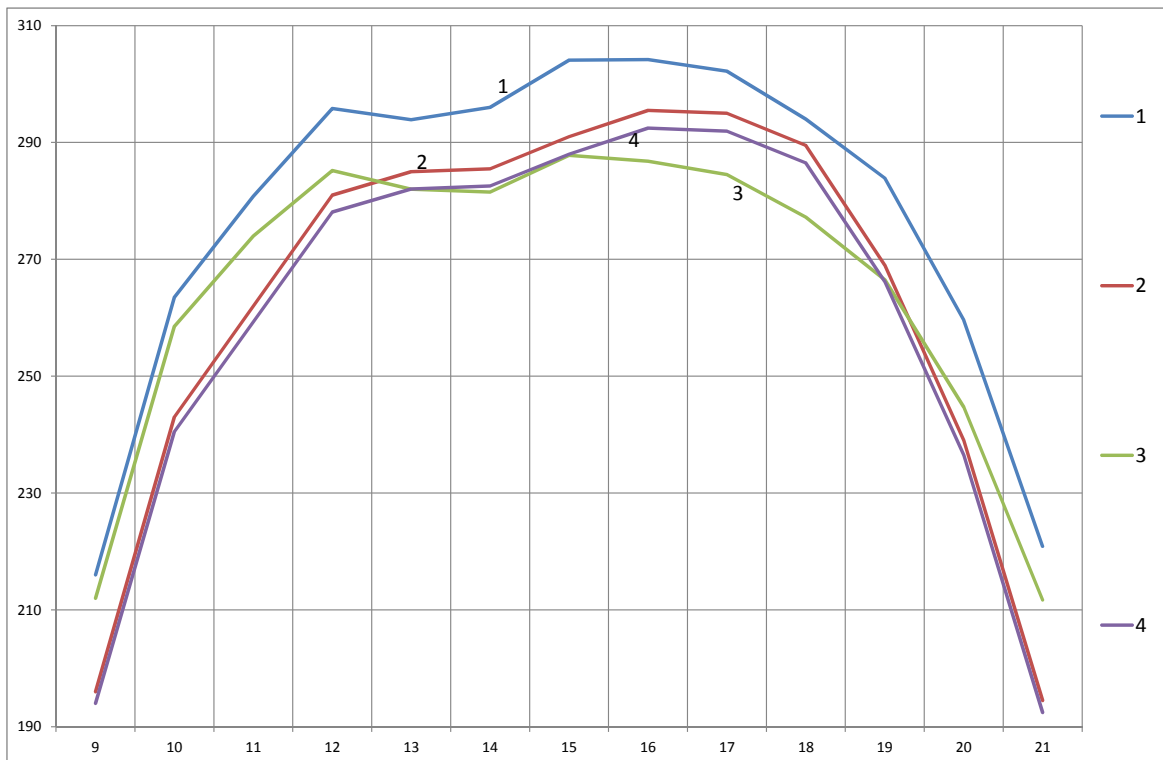


Рис. 6. Профиль значений стоимостных функционалов в дневное и вечернее время при большой нагрузке, создаваемой запросами третьего сервисного класса, и  $H_3 = 0,8$

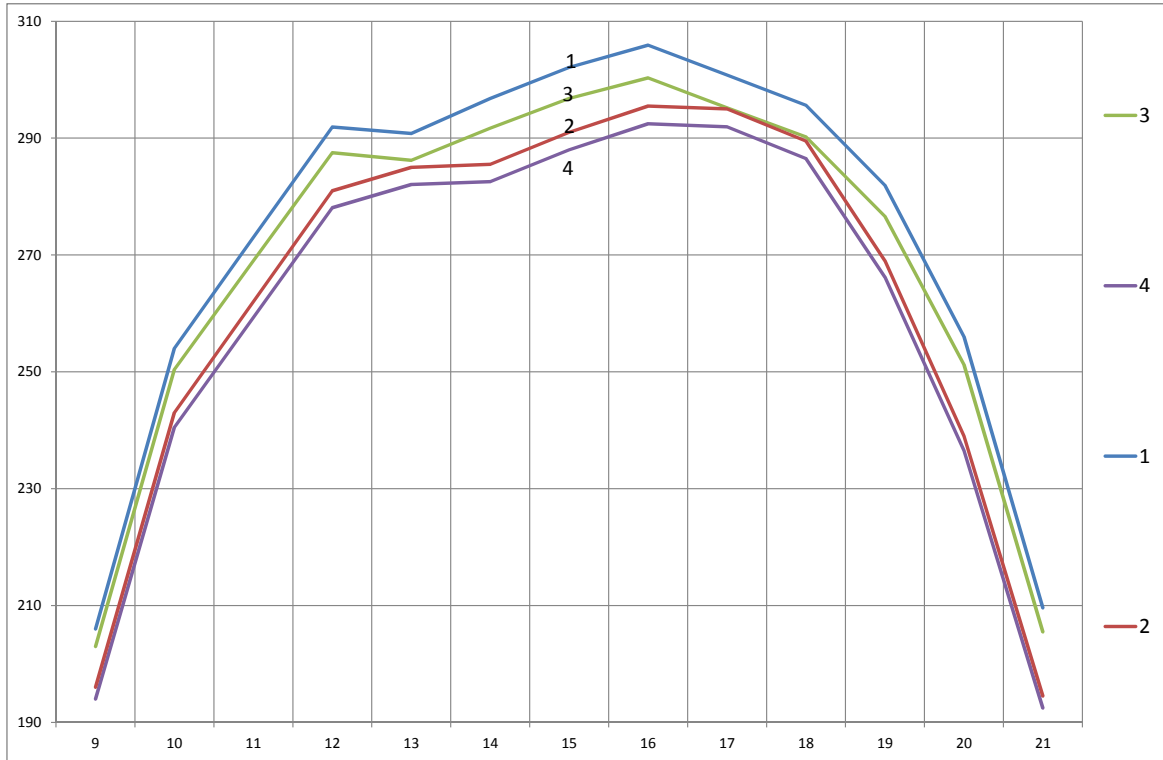


Рис. 7. Профиль значений стоимостных функционалов в дневное и вечернее время при малой нагрузке, создаваемой запросами третьего сервисного класса, и  $H_3 = 0,4$

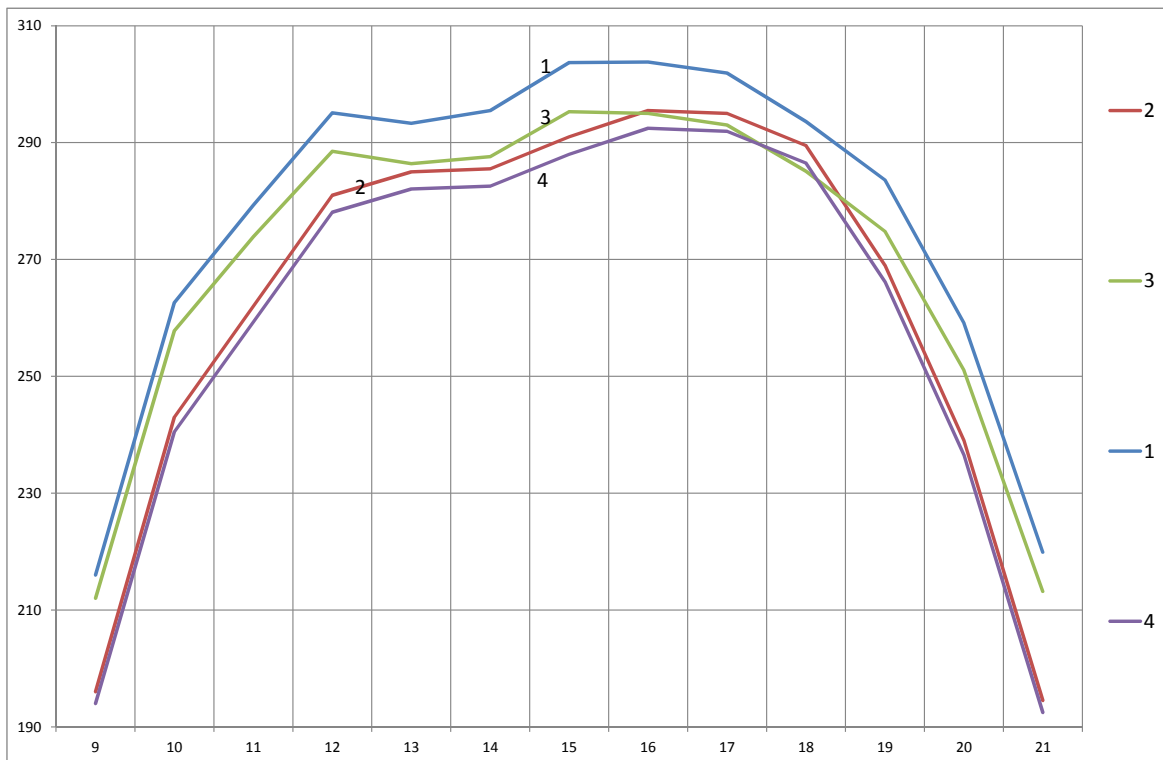


Рис. 8. Профиль значений стоимостных функционалов в дневное и вечернее время при большой нагрузке, создаваемой запросами третьего сервисного класса, и  $H_3 = 0,4$

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ проведенных численных исследований позволяет сделать следующие выводы.

1. При нагрузке в узле, превосходящей его пропускную способность или близкой к ней, необходимо использовать достаточно далеко отстоящие гистерезисы для запросов второго и третьего сервисных классов.
2. Гистерезис для запросов второго сервисного класса должен быть достаточно узким, если суммарная нагрузка первого и второго сервисных классов составляет не более 0,7 эрл. на ОПЕ.
3. Гистерезис по обслуживанию запросов третьего класса должен быть достаточно широким, чтобы обеспечить сохранения режима доступа при колебаниях нагрузки в области ее больших значений.
4. Если суммарная нагрузка всех потоков составляет не более 0,8 эрл. на ОПЕ, то при большой доле нагрузки, создаваемой запросами третьего сервисного класса, является целесообразным устанавливать верхнюю границу гистерезиса для запросов третьего сервисного класса выше верхней границы гистерезиса для запросов второго сервисного класса.
5. Если суммарная нагрузка всех потоков составляет не более 0,8 эрл. на ОПЕ, а доля нагрузки, создаваемой запросами третьего сервисного класса, невелика, то следует использовать пересекающееся расположение гистерезисов, при этом гистерезис для запросов третьего класса должен быть достаточно широким, чтобы обеспечить сохранения режима доступа при колебаниях нагрузки в области ее больших значений.
6. Стоимостные функционалы слабо чувствительны к вероятности потерь запросов, в особенности запросов приоритетных классов, поэтому их оптимизацию нужно проводить только при сохранении ограничений на качество обслуживания запросов первых двух классов.
7. При перегруженной сети ( $\rho > 1$ ) наличие запросов третьего сервисного класса приводит к снижению стоимостных показателей, в особенности показателя  $P$ , указывающего на доход сети от обслуживания запросов всех сервисных классов.
8. В сильно нагруженной сети ( $\rho > 0,8$ ) за счет запросов третьего сервисного класса ресурсы сети используются более полно, однако функционал  $P$  чувствителен к выбору границ гистерезиса для запросов третьего сервисного класса.
9. В слабо нагруженной сети ( $\rho \leq 0,7$ ) за счет запросов третьего сервисного класса ресурсы сети используются более эффективно, чем при обслуживании только запросов двух первых классов.
10. Снижение вероятности настойчивости пользователей, создающих запросы третьего сервисного класса, позволяет повышать эффективность функционирования сети.
11. Наиболее эффективным с учетом суточных колебаний нагрузки является обслуживание запросов третьего сервисного класса таким образом, что в интервалах с высокой общей нагрузкой запросов первых двух сервисных классов интенсивность потока запросов третьего сервисного класса снижается за счет ухода на альтернативные сети.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрианов Г.А., Цитович И.И. О некоторых особенностях влияния потерь на интерпретацию результатов измерения качества обслуживания // Труды 64-й научной сессии РНТОРЭС. М.: РНТОРЭС. 2009. С. 341–343.
2. Андрианов Г.А., Порязов С., Цитович И.И. Обслуживание транзитного трафика на сети оператора связи // Информационные процессы. 2010. Т.10, № 1. С. 36–53.
3. Андрианов Г.А. Учет влияния повторных вызовов при интерпретации результатов измерения качества обслуживания // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2010. Т. 17, вып. 2. С. 247–248.

4. Богомолова Н.Е., Чернушевич Я.В. Динамическое управление приоритетами при дифференцированном обслуживании абонентов в фиксированной инфраструктуре подвижной сети // Информационные процессы. Т. 5, № 3. 2005. С. 194–200.
5. Цитович И.И., Чернушевич А.В. Расчет стационарных вероятностей трехпоточковой модели управления доступом к ресурсам БШС с гистерезисами // Информационные процессы. Т. 11, № 2. 2011. С. 262–276.