

**УПРАВЛЕНИЕ**

УДК 004.75

**И.В. Логинов****СРАВНЕНИЕ ДИСЦИПЛИН ОБСЛУЖИВАНИЯ ЗАЯВОК  
ПО ПОКАЗАТЕЛЮ СРЕДНЕЙ ПОЛЕЗНОСТИ РЕЗУЛЬТАТА**

*Представлен сравнительный анализ дисциплин обслуживания FCFS, FCLS, SIRO для системы массового обслуживания M/M/1/∞ по показателю средней полезности результата. Каждая заявка имеет заданную полезность результата ее обслуживания, представленную в виде монотонно убывающей на отрезке линейной функции полезности.*

**Ключевые слова:** дисциплина обслуживания, обслуживание заявок, вычислительная сеть, функция полезности, система массового обслуживания, средняя полезность.

**Введение.** Переход к распределенным вычислениям облачного типа и предоставление платного доступа к вычислительным и другим ресурсам в рамках концепции «все как сервис» приводят к необходимости рассмотрения эффективности использования вычислительных ресурсов. В связи с этим рассматривается полезность результата обработки запроса в вычислительной среде распределенного типа. В большинстве работ [1,2] полезность рассматривается как зависимость ценности от объема потребляемого ресурса. Однако на практике значение имеет не только объем предоставляемого ресурса, но и момент времени его получения. Для вычислительных систем рассматривается полезность результата обработки запроса. Полезность зависит от времени и представляется в большинстве случаев в виде убывающих функций. В существующих системах используется несколько моделей учета влияния полезности при планировании вычислений: указание приоритетов, критических сроков обработки запросов, определение классов обслуживания. Однако использование таких моделей существенным образом огрубляет планирование, что при платном потреблении ресурса является недопустимым.

Результат обработки запроса можно выразить в условно-денежных единицах, отражающих величину повышения эффективности решения задачи (принятия управленческого решения). Использование такого подхода к планированию в вычислительных системах рассмат-

ривалось в работах [3,4,5,6], которые показали возможность его применения. Также возможно применение экономического подхода к планированию в целях повышения своевременности управленческих решений [7]. В настоящей работе рассматривается вычислительная система, каждый запрос к которой (в отличие от рассмотренного в [3,8] случая с функциями полезности вида Кобба-Дугласа) обладает непрерывной убывающей на отрезке  $[0; t^{\max}]$  функцией полезности, представляющей собой зависимость ценности результата обработки запроса для оператора автоматизированной системы управления от времени  $u = u(t)$ , где  $t^{\max}$  - момент времени, в который значение функции полезности обращается в ноль.

Непосредственное использование функций полезности при оценивании результата распределенных вычислений, необходимость обработки запросов с наибольшей полезностью определяют актуальность проведения сравнительного анализа дисциплин обслуживания, широко применяемых в вычислительных системах при обработке ресурсоемких запросов. В настоящее время получили широкое распространение дисциплины обслуживания FCFS, FCLS, SIRO. При этом дисциплина обслуживания FCFS (First Come First Serve – первый пришел, первый обслужен) применяется при организации очередей на основе буфера памяти. Дисциплина обслуживания FCLS (First Come Last Serve – первый

пришел, последний обслужен) – при организации процесса доступа к данным на основе стека. Дисциплина обслуживания SIRO (Service In Random Order – обслуживание в случайном порядке, также для описания этой дисциплины обслуживания используется аббревиатура ROS – Random Order Service) применяется при использовании хэш-таблиц. В работе проведено сравнение указанных дисциплин обслуживания по показателю средней полезности результата обработки запроса.

**Постановка задачи.** Пусть на вход однопроцессорной одноядерной вычислительной системы поступает простейший поток запросов с интенсивностью  $\lambda$ . Каждый запрос  $q_i$ , из потока, имеет свойство его полезности, отражающее ценность результата обработки запроса в заданный момент времени, и представлен в виде убывающей на отрезке функции  $u_i = u_i(t)$ . Интенсивность обработки запросов составляет  $\mu$ . Представленная вычислительная система моделируется системой массового обслуживания M/M/1/∞. Рассматривается три дисциплины обслуживания FCFS, FCLS, SIRO. Для такой СМО известно [9], что вид дисциплины обслуживания не влияет на средние значения ее характеристик (размер очереди, время обработки, время нахождения в системе), а только определяют вид их функций распределения (функций плотности вероятности). Поскольку в статье вычислительная система моделируется системой массового обслуживания, то далее по тексту статьи термин запрос, заменяется термином заявка, а термин обработка запроса – на термин обслуживание заявок, что характерно для СМО.

Функция полезности имеет убывающий на отрезке вид. В вычислительных системах к функциям полезности предъявляются требования наглядности и простоты описания операторами. Таким требованиям удовлетворяют линейные функции. Исходя из этого, в рамках работы исследуются монотонно убывающие на отрезке функции полезности вида:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ b - kt, & t \in [0; b/k], \\ 0, & t > b/k. \end{cases} \quad (1)$$

где  $b$  - коэффициент, определяющий начальное значение полезности в момент поступления заявки;  $k$  - коэффициент наклона функции полезности. В качестве варьируемых параметров, выбираемых оператором, могут выступать коэффициенты линейной функции  $b$  и  $k$ , а также предельное время обращения значений функции

полезности в ноль, определяемое отношением  $b/k$ . В настоящей работе в качестве варьируемого параметра выступает коэффициент наклона  $k$ , который является случайной величиной, описываемой равномерным законом распределения:  $k \in [k^{\min}; k^{\max}]$ .

Поставщик вычислительного ресурса максимизирует суммарную полезность результатов обслуживания заявок из входного потока за заданный промежуток времени [9]:

$$Z = \sum_{i=1}^N u_i = \sum_{i=1}^N u_i(t_i) \rightarrow \max,$$

где  $u_i = u_i(t_i)$  - полезность результата обслуживания  $i$ -й заявки,  $t_i$  - момент времени завершения обслуживания  $i$ -й заявки,  $N = N(A, T)$  - количество обслуженных заявок за время  $T$  с использованием дисциплины обслуживания  $A$ ,  $T$  - промежуток времени обслуживания заявок.

*Целью работы* является нахождение асимптотических значений средней полезности результатов обслуживания заявок в зависимости от дисциплины обслуживания. Математическое ожидание средней полезности результатов обслуживания заявок равно:

$$\bar{U} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n}. \quad (2)$$

**Расчет интегральной полезности обслуживания заявок.** Поскольку  $u_i$  зависит от времени, то выражение (2) можно представить в следующем виде:

$$\bar{U} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n u_i(t_i)}{n}. \quad (3)$$

Поскольку исследуемые дисциплины обслуживания не изменяют последовательность обслуживания заявок в зависимости от их полезности, то можно рассмотреть зависимость среднего значения функции полезности (1) от времени -  $\bar{u}(t)$  - среднюю функцию полезности. В результате выражение (3) можно привести к следующему виду:

$$\bar{U} = \int_{t=0}^{\infty} \bar{u}(t) f(t) dt, \quad (4)$$

где  $f(t)$  - функция плотности вероятности длительности нахождения заявки в системе, определяемая параметрами потоков заявок и обслуживания, а также дисциплиной обслуживания.

Выражения (2) - (4) определяют среднюю

полезность результата обслуживания заявок в СМО. Для сравнения исследуемых дисциплин обслуживания необходимо найти среднюю функцию полезности  $\bar{u}(t)$  и функции плотности вероятности нахождения заявок в системе для исследуемых дисциплин обслуживания.

**Расчет средней функции полезности.** Найдем среднюю функцию полезности  $\bar{u}(t)$  как предел отношения суммы множества реализаций функций полезности к количеству реализаций:

$$\bar{u}(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{j=1}^n u_j(t)}{n}. \quad (5)$$

В соответствии с выражением (1), при  $t < 0$   $\bar{u}(t) = 0$ .

При  $t > b/k_{\min}$  значения функции  $\bar{u}(t)$  равны нулю.

При  $t \in [0; b/k_{\max}]$  и  $t \in [b/k_{\max}; b/k_{\min}]$  поведение функции  $\bar{u}(t)$  различно, поскольку на первом интервале значения всех  $n$  реализаций положительны, а на втором интервале значения некоторых функций полезности становятся нулевыми.

*Расчет средней функции полезности на первом интервале*

Найдем  $\bar{u}(t)$  при  $t \in [0; b/k_{\max}]$ :

$$u_j(t) = b - k_j t.$$

Представим коэффициент  $k$  в виде:

$$k_j = k^{\max} - j\Delta k/n,$$

где  $\Delta k = k^{\max} - k^{\min}$ . Тогда:

$$u_j(t) = b - \left(k^{\max} - j\Delta k/n\right)t. \quad (6)$$

Исходя из выражения (6), выражение (5) приведем к виду:

$$\begin{aligned} \bar{u}(t) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{j=1}^n (b - k^{\max} t + j\Delta k t/n)}{n}, \\ \bar{u}(t) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{j=1}^n b - \sum_{j=1}^n k^{\max} t + \sum_{j=1}^n j\Delta k t/n}{n}, \\ \bar{u}(t) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{bn}{n} - \frac{k^{\max} tn}{n} + \frac{\Delta k t/n}{n} \sum_{j=1}^n j \right), \\ \bar{u}(t) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{bn}{n} - \frac{k^{\max} tn}{n} + \frac{\Delta k t n(n+1)}{2n^2} \right). \end{aligned}$$

$$\bar{u}(t) = b - k^{\max} t + \Delta k t/2 = b - \left(k^{\max} - \Delta k/2\right)t. \quad (7)$$

Выражение (7) можно представить в виде:

$$\bar{u}(t) = b - \left(k^{\max} + k^{\min}\right)t/2.$$

*Расчет средней функции полезности на втором интервале*

Найдем  $\bar{u}(t)$  при  $t \in [b/k_{\max}; b/k_{\min}]$ .

Зададим момент времени  $t_X$  на рассматриваемом промежутке времени. Часть значений функций полезности в этот момент времени обращаются в ноль, а часть рассчитываются на основе выражения (1). Для таких функций коэффициент наклона кривой функции полезности распределяется по равномерному закону в следующем диапазоне:  $k \in [k_X^{\min}; k_X^{\max}]$ . Значение средней функции полезности составляет:

$$\bar{u}(t) = P(u=0) \cdot 0 + P(u>0) \bar{u}_X, \quad (8)$$

где  $P(u=0)$  - вероятность того, что значение функции полезности равно нулю,  $P(u>0)$  - вероятность того, что значение функции полезности больше нуля,  $\bar{u}_X$  - значение средней функции полезности для функций с ненулевыми значениями полезности.

Поскольку нулевые значения не учитываем, то выражение (8) приводится к виду:

$$\bar{u}(t) = P(u>0) \bar{u}_X. \quad (9)$$

При этом, поскольку закон распределения коэффициента  $k$  - равномерный, то

$$P(u>0) = \frac{(k_X^{\max} - k_X^{\min})/\Delta k}{\Delta k}, \quad (10)$$

где  $k_X^{\max}$  - такой коэффициент, для которого значения всех функций полезности с коэффициентом  $k > k_X^{\max}$  равны нулю при  $t > t_X$ .

Коэффициент  $k_X^{\max}$  можно рассчитать исходя из выражения (1), поскольку в точке  $t_X$  значение функции полезности становится равным нулю:

$$b - k_X^{\max} t_X = 0.$$

Откуда следует:

$$k_X^{\max} = b/t_X.$$

В результате выражение (10) приводится к виду:

$$P(u>0) = \frac{b/t_X - k^{\min}}{\Delta k}. \quad (11)$$

Поскольку выражение (11) характерно для

всего интервала  $\left[ \frac{b}{k^{\max}}; \frac{b}{k^{\min}} \right]$ , то его можно представить в виде:

$$P(u > 0) = \frac{b/t - k^{\min}}{\Delta k}. \quad (12)$$

Значение средней функции полезности для положительных значений функций полезности можно рассчитать по формуле (7):

$$u_X = b - \left( k_X^{\max} - \frac{k_X^{\max} - k^{\min}}{2} \right) t_X,$$

$$u_X = b - \left( \frac{k_X^{\max}}{2} + \frac{k^{\min}}{2} \right) t_X,$$

$$u_X = b - \left( \frac{b}{2t_X} + \frac{k^{\min}}{2} \right) t_X. \quad (13)$$

Поскольку выражение (13) характерно для всего  $t \in \left[ \frac{b}{k^{\max}}; \frac{b}{k^{\min}} \right]$  интервала, то его можно представить в виде:

$$u_X(t) = b - \left( \frac{b}{2t} + \frac{k^{\min}}{2} \right) t.$$

$$u_X(t) = b - \frac{b}{2} - \frac{k^{\min}t}{2} = \frac{b - k^{\min}t}{2}. \quad (14)$$

Исходя из выражения (12) и (14), выражение (9) можно привести к виду:

$$\bar{u}(t) = \frac{b/t - k^{\min}}{\Delta k} \cdot \frac{b - k^{\min}t}{2},$$

$$\bar{u}(t) = \frac{(b/t - k^{\min})(b - k^{\min}t)}{2\Delta k} = \frac{(b - k^{\min}t)^2}{2\Delta kt}. \quad (15)$$

На основе полученных выражений (7) и (15) средняя функция полезности описывается выражением:

$$\bar{u}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ b - \left( k^{\max} - \frac{\Delta k}{2} \right) t, & t \in \left[ 0; \frac{b}{k^{\max}} \right]; \\ \frac{(b - k^{\min}t)^2}{2\Delta kt}, & t \in \left[ \frac{b}{k^{\max}}; \frac{b}{k^{\min}} \right]; \\ 0, & t > \frac{b}{k^{\min}}. \end{cases} \quad (16)$$

Выражение (16) однозначно определяет среднюю функцию полезности в случае линейной функции полезности вида (1), в которой  $b = const$ , а параметр  $k$  является случайной величиной, описываемой равномерным законом распределения:  $k \in [k^{\min}; k^{\max}]$ .

График функции средней полезности (16) представлен на рисунке 1 при различных диапа-

зонах изменения коэффициента  $k$ . На представленном графике время нормировано к среднему времени обслуживания заявок в системе  $\bar{t}_{обсл}$ . На графике: для функции  $\bar{u}_1(t)$  параметр  $k$  изменяется в диапазоне  $k_1 \in [0; b/\mu]$ ; для функции  $\bar{u}_2(t)$  -  $k_2 \in [b/2\mu; b/\mu]$ ; для функции  $\bar{u}_3(t)$  -  $k_3 \in [0; b/2\mu]$ .

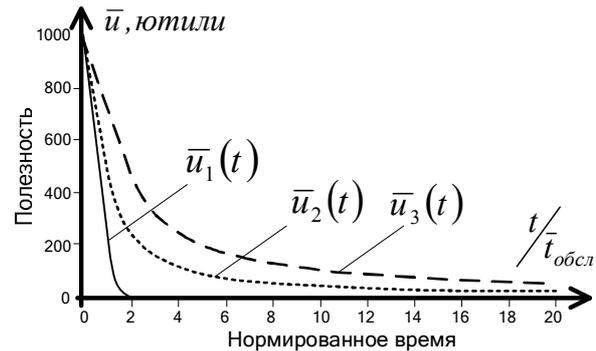


Рисунок 1 – График функции средней полезности результата обслуживания заявок

**Определение функций плотности вероятности времени нахождения заявок в системе.** Анализ литературы показал, что даже для простейших случаев, например исследуемой СМО вида М/М/1/∞, определение функций плотности вероятности длительности нахождения заявок в системе является сложной задачей. При этом они имеют сложный вид, затруднительный для проведения математических расчетов. С этой точки зрения отличается дисциплина обслуживания FCFS, для которой функция плотности вероятности длительности нахождения заявок в системе  $f^{FCFS}(t)$  и вероятность времени нахождения заявки в системе в течение времени больше заданного в соответствии с [9] описываются довольно простыми выражениями вида:

$$f^{FCFS}(t) = \mu(1 - \rho)e^{-\mu(1-\rho)t},$$

$$P^{FCFS}(w > t) = \rho e^{-\left(\frac{1}{\rho}-1\right)t} = \rho e^{-\left(\frac{1-\rho}{\rho}\right)t}, \quad (17)$$

где  $w$  - время нахождения заявки в системе,  $\rho$  - нагрузка, определяемая отношением интенсивности поступления заявок к интенсивности их обслуживания  $\rho = \lambda/\mu$ .

В отличие от выражения (17) для модели М/М/1/∞/SIRO вероятность времени нахождения заявки в системе в течение времени больше заданного имеет следующий вид [10]:

$$P^{SIRO}(w > t) = 2(\rho^{-1} - 1) \int_0^\pi \frac{e^{(2\phi(\theta) - \theta)ctg\theta}}{e^{\pi ctg\theta} + 1} \times \frac{e^{-\left(1 - 2\rho^{-1/2} \cos\theta + \rho^{-1}\right)t}}{\left(1 - 2\rho^{-1/2} \cos\theta + \rho^{-1}\right)^2} \sin\theta d\theta, \quad (18)$$

где

$$\phi(\theta) = \arctan\left[\frac{\sin\theta}{\cos\theta - \rho^{1/2}}\right]. \quad (19)$$

Сложность непосредственных расчетов с помощью формул (17) - (19) обуславливает необходимость определения функций плотности вероятности длительности нахождения заявок в системе с использованием имитационного моделирования. Для определения функций плотности вероятности длительности нахождения заявок в системе в среде имитационного моделирования LabView, применяемой в том числе и для моделирования СМО [11], разработана имитационная модель СМО вида M/M/1/∞ и реализованы исследуемые дисциплины обслуживания.

Адекватность разработанной имитационной модели проверялась путем сравнения теоретической и модельной функций плотности вероятности для дисциплины обслуживания FCFS. Погрешность аппроксимации функции плотности вероятности длительности нахождения заявки в системе при экспериментах составила меньше 1 процента:

Функции плотности вероятности длительности нахождения заявки в системе зависят от нагрузки  $\rho$ .

В связи с этим в результате имитационного моделирования получены плотности вероятности длительности нахождения заявки в системе для различных дисциплин обслуживания при различной нагрузке, принадлежащей следующему множеству:

$$\rho \in \{0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9\}.$$

Результаты расчетов для  $\rho = 0,5$  и  $\rho = 0,9$  представлены на рисунке 2. На представленном графике время нормировано к среднему времени обслуживания заявок в системе  $\bar{t}_{обсл}$ .

Анализ функций плотностей вероятности длительности нахождения заявки в системе показывает, что при высокой нагрузке их отличия приобретают существенный вид, несмотря на одинаковое среднее время нахождения заявки в системе  $\bar{t}_{сист}$ .

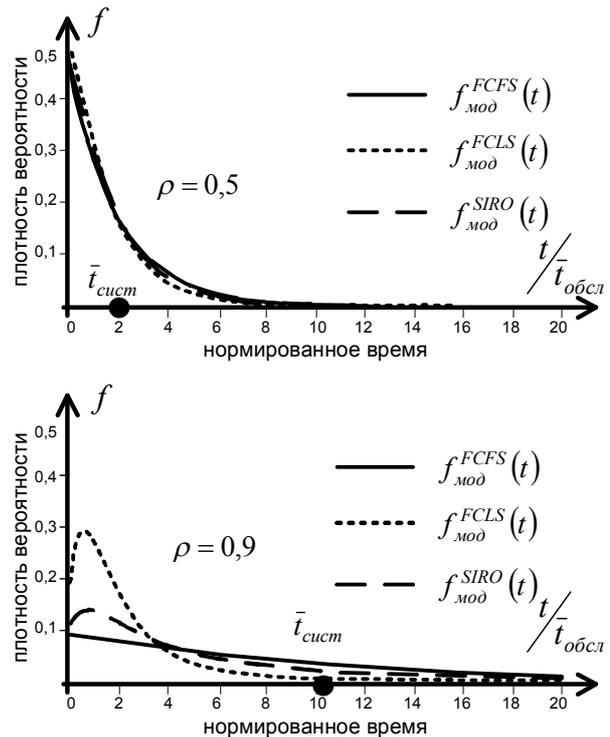


Рисунок 2 – Функции плотности вероятности длительности нахождения заявки в системе при различных дисциплинах обслуживания

**Практический расчет средней полезности результата обслуживания заявок.** На основе полученных функций плотности вероятности длительности нахождения заявки в системе и средней функции полезности проведен расчет средней полезности результата обслуживания заявок. Исходные данные для проведения расчетов следующие:

- среднее время обслуживания заявок нормировано  $\bar{t}_{обсл} = 1/\mu = const$ ;
- коэффициент  $b = 1000$  ютилей;
- выполнялось три эксперимента с различными диапазонами изменения коэффициента  $k$  :  $k_1 \in [0; b/\mu]$ ,  $k_2 \in [b/2\mu; b/\mu]$ ,  $k_3 \in [0; b/2\mu]$ .

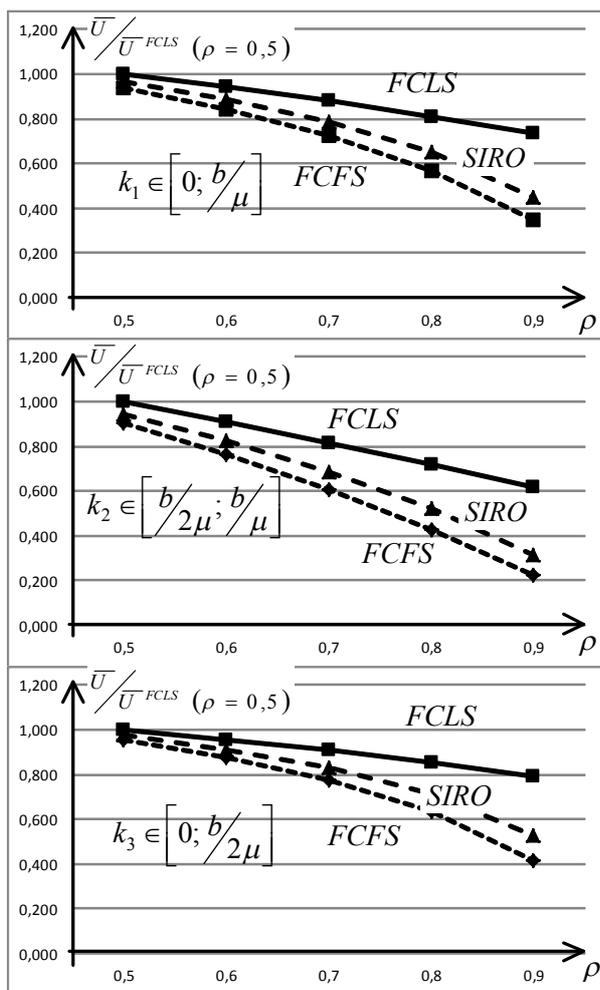
В результате расчетов получены зависимости средней полезности результата обслуживания заявки от нагрузки при различных дисциплинах обслуживания, представленные на рисунке 3. Результаты экспериментов нормированы к максимальному значению средней полезности результата обслуживания заявок ( $\bar{U}^{FCLS}(\rho = 0,5)$ ). Эксперимент производился с уменьшением ошибки моделирования до достижения уровня меньше 1 % в соответствии с [12].

Представленные зависимости показывают, что с увеличением нагрузки (вследствие роста среднего времени нахождения заявки в системе)

происходит значительное уменьшение средней полезности обслуживания. Рассмотренные альтернативы дисциплин обслуживания упорядочиваются по показателю ожидаемой полезности следующим образом:

$$\bar{U}^{FCLS} > \bar{U}^{SIRO} > \bar{U}^{FCFS}.$$

При этом ожидаемая полезность обслуживания заявок с использованием дисциплины обслуживания FCLS значительно превосходит остальные исследуемые альтернативы.



**Рисунок 3 – Зависимость средней полезности результата обслуживания заявки от нагрузки для различных дисциплин обслуживания**

**Заключение.** Исследования СМО М/М/1/∞ по показателю средней полезности результата обслуживания заявки показывают, что при задании полезности результата в виде зависимости его ценности от времени, выбор дисциплины обслуживания оказывает значительное влияние на эффективность обслуживания. Это свидетельствует о том, что при использовании экономического подхода к планированию необходимо осуществлять обоснованный выбор дисциплины обслуживания (метода планирования). Направле-

ниями дальнейших исследований является исследование зависимостей средней полезности результата обслуживания заявки для гомогенных и гетерогенных многопроцессорных вычислительных систем, использование законов распределения для моделирования потоков поступления заявок и их обслуживания (Вейбулла, Парето, логнормального), характерных для вычислительных систем, а также дисциплин обслуживания, учитывающих дополнительные параметры, например длительность обработки (SJN – Shortest Job Next – кратчайшая работа следующая, SJL – Shortest Job Last – кратчайшая работа последняя), или функции полезности (FMT – First Most Timeliness – первая наиболее своевременная [13]).

### Библиографический список

1. Мальшева А.Н. Аддитивные полезности в теории выбора альтернатив // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. Т. 113. № 12. С. 83-88.
2. Рзаев Р.Р., Кулиев Р.А. Об одном подходе к идентификации потребительской функции полезности // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. Т. 108. № 7. С. 125-131.
3. Бредихин С.В., Тиунова Е.М., Хуторецкий А.Б. Ценовое согласование спроса и предложения при распределении мощности многопроцессорной системы // Сиб. журн. инд. матем. 2007. 10:3. 20–28.
4. Buyya R. An Economy Driven Resource Management Architecture For Global Computational Power Grids / R. Buyya, D. Abramson, J. Giddy. International Conference on Parallel and Distributed Processing. Techniques and Applications, 2000.
5. Киселев А.В., Голосов П.Е. Планирование заданий на основе экономической модели как подход к обеспечению качества обслуживания в распределенной вычислительной среде // Сб. тр. конференции «Научный сервис в сети интернет - 2008». 2008. С. 216-220.
6. Yeo C.S., Buyya R. Integrated Risk Analysis for a Commercial Computing Service in Utility Computing, Journal of Grid Computing, Volume 7, Number 1, Pages: 1-24, ISSN: 1570-7873, Springer, Germany, March 2009.
7. Лебеденко Е.В., Логинов И.В. Повышение своевременности подготовки управленческих решений в системах административного управления сетями связи // Телекоммуникации. 2010. № 2. С. 13-16.
8. Бредихин С.В., Вялков И.А., Савченко И.Ю., Хуторецкий А.Б. Две модели ценового согласования при распределении вычислительных ресурсов // Сиб. журн. инд. матем. 2006. 9:1. 28–46.
9. Таха Х.А. Введение в исследование операций, 7-е издание: пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 912 с.: ил.
10. Flatto L. The Waiting Time Distribution for the Random Order Service M|M|1 Queue // Ann. Appl. Probability. 1997. V. 7. № 2. P. 382-409.
11. Евдокимов Ю.К., Кирсанов А.Ю. Экспериментальное исследование и статистическая модель

динамики системы дистанционного управления // Вестник КазГТУ им. А.Н. Туполева. 2006. № 3. С. 31-36.

12. Desic S. Different approaches to experiments for load balancing method comparison // 6th international

conference on Telecommunications. 2001. P. 177-184.

13. Логинов И.В. Планирование процессов обработки запросов в однородной вычислительной сети АСУП на основе функций полезности // Вестник РГРТУ. № 2 (выпуск 32). Рязань. 2010. С. 105-109.

УДК 658

*А.О. Михалев, М.Ю. Новикова*

## УПРАВЛЕНИЕ РАЗРАБОТКОЙ НОВОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО ПРОГНОЗА ТЕХНИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ АППАРАТУРЫ КОНТРОЛЯ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

*Обоснована целесообразность применения метода научного прогнозирования при разработке сложных технических систем. Рассмотрены методические вопросы применения прогнозирования изменения отдельных характеристик аппаратуры контроля и поколения техники в целом. Результаты исследования позволят разрабатывающему предприятию своевременно и адекватно подготовиться к ожидаемым изменениям техники специального назначения, что обеспечит его конкурентоспособность.*

**Ключевые слова:** аппаратура контроля, конкурентоспособность, коэффициент технического уровня, логистическая кривая, поколение техники, ракетно-космическая техника, системный прогноз, экспертная оценка.

**Введение.** Работы по созданию систем автоматического сбора и контроля информации ведутся более сорока лет. За это время контрольно-проверочная аппаратура (КПА) прошла большой путь совершенствования и развития от узкоспециализированной аппаратуры контроля параметров до автоматизированных систем управления подготовки и пуска ракет космического назначения (АСУ ПП). Эти АСУ ПП предназначены для сокращения сроков, повышения эффективности и качества подготовки и проведения пусков ракет космического назначения (РКН) за счёт автоматизации, информатизации и координации деятельности всех сторон, задействованных в процессе подготовки и пуска, в том числе специалистов космодромов, предприятий-разработчиков и изготовителей ракет.

За последние двадцать лет ракетно-космическая отрасль претерпела значительные изменения, что было вызвано относительным уменьшением объемов финансирования, сокращением сроков создания образцов ракетно-космической техники (РКТ), повышением требований к надёжностным и экологическим характеристикам изделий, сокращением затрат на эксплуатацию и выведение единицы полезной нагрузки [1].

**Цели.** Обосновать целесообразность применения метода научного прогнозирования при

разработке сложных технических систем, рассмотреть методические вопросы применения прогнозирования изменения отдельных характеристик аппаратуры контроля и поколения техники в целом.

**Теоретические исследования.** Развитие КПА непосредственно связано с развитием РКТ, для проверки которой она предназначена. Исходя из этого, рассмотрим тенденции развития РКТ и требований к ней на этапе испытаний, являющемся наиболее показательным в жизненном цикле изделия.

Закономерности эволюции ракетно-космических комплексов (РКК) соответствуют законам эволюции больших технических систем, исследованных в работах Фостера Р., С.А. Саркисяна, С.В. Моисеева, Д.Э. Старика и других ученых [2]. Доказано, что динамика развития технических систем описывается логистическими (S-образными) кривыми:

$$K_{my}(t) = 1/(1+d*exp(-c[t-t_0])). \quad (1)$$

В формуле 1 постоянные «d» и «c» определяют темпы нарастания технического уровня и его начальный уровень, соответствующий моменту начала разработки первого образца соответствующего поколения техники (момент  $t_0$ ). Их значения могут быть в ретроспективном периоде

определены по регрессионным значениям, на этапе развития поколения новой техники оценка возможна только путем экспертизы. Графически логисты, описываемые этой формулой, приведены на рисунке 1.

Исследования поименованных выше учёных

показали, что эта зависимость в полной мере относится как к отдельным техническим и эксплуатационным характеристикам систем  $(Z, (t), j=1, \dots, m)$ , так и к их обобщенным характеристикам, например к показателям технического уровня.

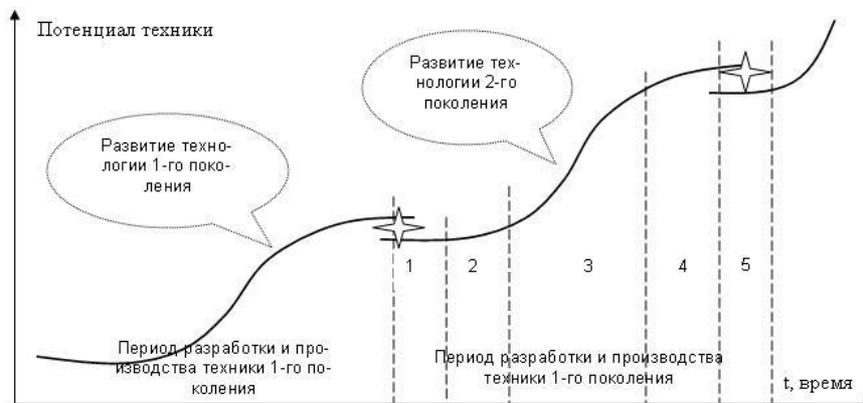


Рисунок 1 – Динамика развития поколений техники

Согласно закону логистического развития техника, основанная на определенном принципе функционирования, проходит следующие основные этапы (фазы) развития:

1 - зарождение научной области (нового поколения техники);

2 - становление научной области;

3 - нормальное развитие (реализация основных возможностей);

4 - насыщение (основные проблемы решены);

5 - «умирание» научной области (появление новых потенциально более совершенных принципов архитектуры, материалов и элементной базы).

Отбор значимых параметров для прогнозирования требований внешней среды к РКК из множества характеристик, определяющих большие технические системы, проводимый, как правило, на основе экспертных оценок, требует использования научно обоснованных методов экспертизы и высокой квалификации экспертов. Общие требования к системе параметров состоят в том, что они должны принадлежать к множеству признаков анализируемой техники, характеризовать возможности всех изделий параметрического ряда, их изменение должно отражать процесс развития техники, параметры должны быть функционально независимы.

Условиями целесообразности включения каждого отдельного параметра в перечень, определяющий прогнозируемое состояние РКК, являются:

- значимость (приоритетность) для потребителей инновационного продукта;

- управляемость ресурсами разрабатывающей организации;

- количество параметров должно быть достаточным для оценки потребительских свойств изделий, но при этом по возможности ограниченным. Условие достаточности выбранной номенклатуры определяется возможностью построения состоятельной интегральной оценки технического уровня, которое можно записать в следующем виде:

$$K_{нту}(t+t_0) = K_{нту}(t) + \Delta K_{нту}(\Delta t, Z_{интегр}, C_{жц}). \quad (2)$$

В (2)  $K_{нту}(\Delta t, Z_{интегр})$  есть потенциальный прирост научно-технического уровня разработок, определяющийся временем, интенсивностью исследований (затратами на их проведение) и стадией жизненного цикла техники  $C_{жц}$  (положением точки «t» на логистической кривой).

Суть метода моделирования

$K_{нту}(t+t_0)$  состоит в том, что обобщенным оценкам технического уровня ставится в соответствие совокупность локальных относительных показателей изделий и рассчитывается зависимость

$$K_{нту} = \psi(X_1, X_2, \dots, X_n, \Omega, t), \quad (3)$$

где  $\Omega$  отражает значимость новых качеств техники, отсутствовавших или имевших низкий приоритет ранее.

В указанных выше исследованиях определены области эффективного использования отдельных методов прогнозирования развития авиационной и электронной техники. Выделены

основные требования к применяемым методам прогнозирования:

- достаточный уровень научной обоснованности метода;
- информационная обеспеченность прогноза;
- приемлемый уровень трудоемкости и сложности выполнения прогнозов и др. [3, 4].

Поэтому, не проводя специальных исследований, далее мы используем для прогнозирования характеристик РКК дискрептивные модели, основанные на использовании методов экспертных оценок (балльные оценки) и статистические (авторегрессионные и многофакторные) зависимости. Для РКК, находящихся на 3-й и последующих стадиях жизненного цикла поколения, авторы предлагают использование метода, основанного на интеграции моделирования логисты по характеристикам первых этапов развития и методов экспертизы. Этот способ можно использовать как для оценки динамики отдельных характеристик поколений техники, так и ее интегрального показателя. Его преимущества состоят в том, что он позволяет прогнозировать сроки формирования нового поколения и, соответственно, сроки подготовки характеристик внутренней среды организации. Интеграция метода моделирования с инструментарием экспертных опросов состоит в выявлении возможного возникновения новых качеств техники или смены приоритетности известных характеристик. Ограничением применения этого метода является неопределенность оценки длительности жизненного цикла поколения техники.

Алгоритм расчета включает следующие этапы.

- Формирование экспертами наиболее полной совокупности функциональных и технических характеристик всех изделий одного поколения и выделение из их числа наиболее значимых. С этой целью по каждой из характеристик оцениваются показатели значимости с позиций заказчика (значимость показателя с позиции влияния на конкурентоспособность изделия) и разработчика (возможности и относительной стоимости регулирования параметра). Характеристики значимости, возможности и относительной стоимости изменения параметра оцениваются качественно в шкалах:

- значимость «определяющая; высокая; средняя; низкая»;

- возможность и относительная стоимость увеличения параметра «при современном научно-техническом уровне организации невозможно; возможно при привлечении значительных дополнительных ресурсов относительно выполненной аналогичной разработки; возможно при

относительно малом привлечении дополнительных ресурсов». Эти показатели необходимы при управлении стратегическим развитием организации.

Этот этап должен выполняться и для первых изделий нового поколения.

- Формирование исходной информации по изделиям поколения, включающей: - отбор совокупности наиболее значимых показателей поколения техники с учетом возможности появления новых требований, отсутствующих ранее;

- представление показателей всех изделий поколения в количественном измерении с указанием сроков и затрат на разработку изделия.

- Определение уровня развития поколения техники в виде экспертных оценок: - длительности жизненного цикла поколения (рисунок 1);

- текущего (настоящего) состояния поколения в виде точек  $Z_j(t)$ ,  $j = 1, \dots, m$  на логистической кривой.

Эти характеристики целесообразно определять для различных сценариев развития внешней и внутренней сред организации.

- Аналитический расчет логисты для поколения техники по интегральному показателю научно-технического уровня разработок и (или) по важнейшему показателю. При расчете начальные значения отдельной характеристики и (или) интегрального показателя (в формуле 1 показатель «с») принимаются равными единице. Значение постоянных «d» (темпов нарастания технического уровня) определяется из условий  $K_{my} = 1/(1 + d * \exp[-c * (t - t_0)])$  или

$$Z_j(t), j = 1, \dots, m.$$

- Прогноз параметров, ожидаемых заказчиками, определяется двумя методами: - результатами экспертного опроса, выполненного одним из известных методов; - расчетами по логистическим кривым  $Z_j(t)$ ,  $j = 1, \dots, m$  и (или)  $K_{my}(t)$ .

- Динамика развития поколения техники по отдельным характеристикам может не совпадать с динамикой обобщенного показателя. Это определяется объективно различными темпами роста отдельных характеристик и жизненными циклами поколения техники по этим характеристикам, а также тем, что интегральные требования к конкретному комплексу по отдельным характеристикам могут быть меньше их максимального достигнутого уровня. Поэтому необходим экспертный анализ результатов 3-х прогнозов: прогнозов отдельных характеристик (экспертный и аналитический) и интегрального показателя (ана-

литический метод). Анализ должен сформировать итоговое представление о динамике характеристик проектируемой техники.

• Особое значение для прогнозирования техники имеет определение пределов развития технологии, положенной в основу технических решений, времени и количественных изменений характеристик (разрывов) при переходе к технике новых поколений. Исследование разрывов в динамике характеристик РКК является задачей специалистов в области науки, проектирования и производства и потому нами не рассматривается. Но обоснование параметров логист позволяет определить временные пределы развития поколения техники и тем самым сроки ожидаемого скачка параметров. Рассмотрим далее использование предложенного способа для прогнозирования развития техники.

Знание закона развития техники в общем виде и умение построить графики конкретных

проявлений этого закона обеспечивают разработывающему предприятию большие возможности в разработке конкурентоспособной техники. Для этого необходимо прогнозным путём определить конкретные значения важнейших характеристик в кратко- и долгосрочной перспективе для адекватной и заблаговременной подготовки потенциала предприятия к разработке техники нового поколения.

**Экспериментальные исследования.** Далее рассмотрим использование предложенного способа для прогнозирования развития КПА, предназначенной для наземных испытаний (НИ). Данные, характеризующие тенденцию изменений ТТХ КПА НИ за последние 20 лет, приведены в таблице 1. Для КПА НИ приведены ТТХ комплексов САУИ, КСА НИСИ, НИУКСИ, АКА НИСИ, АНИК с учетом их исполнений.

Таблица 1

№ п/п	Наименование характеристики	Коэффициент значимости параметра, $\alpha_j$	Значение характеристик по годам							
			1976	1988	1996	1998	2000	2002	2006	2011
1	Количество типов проверяемых параметров	0,25	4	4	6	8	8	8	16	19
2	Количество проверяемых параметров	0,05	56	62	128	128	128	136	256	256
3	Количество каналов управления	0,15	2	6	6	12	36	36	32	42
4	Максимальная точность измерений, %	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,8	0,95	0,95
5	Вероятность безотказной работы	0,3	0,95	0,95	0,95	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99
6	Объёмы зарегистрированной информации, GB	0,05	0,03	0,03	0,05	0,08	1	1	2	4
7	Интегральная оценка технического уровня, Кту	1	1	1,31	1,52	2,26	5,59	4,08	7,75	12,02

КПА, предназначенная для обеспечения наземных испытаний, имеет специфические тактико-технические характеристики (ТТХ), что обусловлено следующими факторами при проведении НИ:

- отсутствием жестких требований к работе в реальном времени;
- локальностью КПА, иными словами, сосре-

доточенностью аппаратуры в одном месте;

- необходимостью выдачи управляющих команд на изделие;
- возможностью повторных проверок.

На основе экспертных оценок высококвалифицированных специалистов разработывающего предприятия были выделены наиболее важные характеристики КПА и их коэффициенты

значимости ( $\alpha_j$ ), анализ которых позволит оценить перспективы развития КПА. Выбраны следующие характеристики:

- 1) количество типов проверяемых параметров;
- 2) количество проверяемых параметров;
- 3) количество каналов управления;
- 4) максимальная точность измерений аналоговых параметров;
- 5) вероятность безотказной работы;
- 6) объемы зарегистрированной информации.

Теперь рассчитаем  $K_{тj}$  каждой из характеристик по формуле (4), разделив значение каждой характеристики на значение характеристики, принятое за базовое. В качестве базовых значений характеристик приняты параметры первой

системы автоматического сбора и контроля информации выбранной группы - АСК СИ 77 (1976 г.)

$$K_{mj} = \frac{x_{jt}}{x_{jo}}, \quad (4)$$

где  $x_{jt}$  - значение  $j$ -й технической характеристики в определённый момент времени;

$x_{jo}$  - базовое значение  $j$ -й технической характеристики.

Используя полученные относительные значения достигнутого уровня основных характеристик, построим графики их динамики (рисунок 2).

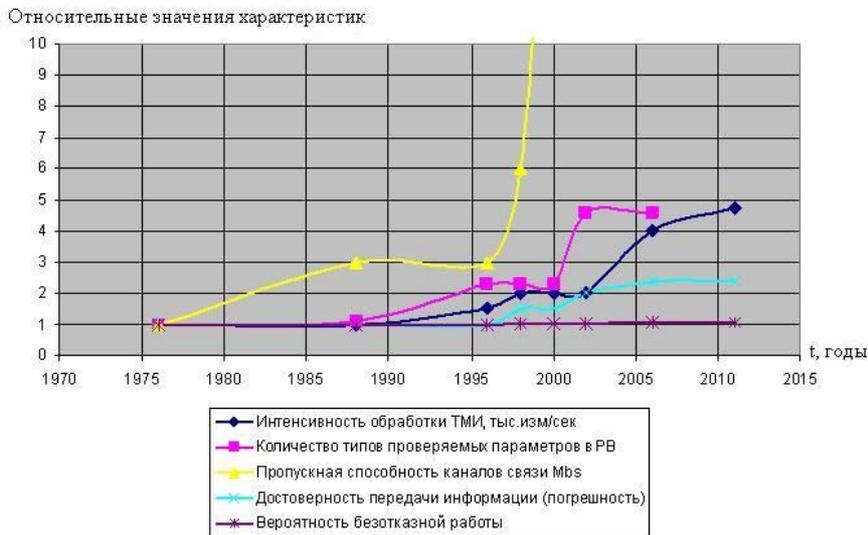


Рисунок 2 - Динамика  $K_{тj}$  основных технических характеристик поколения КПА

Рассчитаем интегральное значение  $K_{тj}$  в конкретные годы для поколения КПА по формуле 5 (таблица 1) и построим по полученным данным логистическую кривую, характеризующую данный ретроспективный период времени. На рисунке 3 приведена динамика интегрального значения  $K_{тj}$  поколения КПА.

$$K_{mj} = \sum_{j=1}^m \frac{x_{jt}}{x_{jo}} \alpha_j = \sum_{j=1}^m K_{mj} \alpha_j \quad (5)$$

Далее, выберем на данном графике точку на наиболее характерном участке графика (2004г.), в которой  $K_{тj} = 6$ . Подставив значения  $K_{тj}$  и  $t$  в

формулу 6 и приняв значение показателя «с» равным единице, в соответствии с теоретическими выкладками, приведёнными выше, вычислим значение  $d$

$$d = \frac{1 - K_{mj}}{K_{mj} * \exp([-c(t - t_o)])} \quad (6)$$

В результате получаем общий вид логистической кривой текущего поколения КПА, из которого определяем ожидаемые значения обобщённого показателя  $K_{тj}$  (таблица 2), что позволяет построить прогнозный отрезок логистической кривой современного поколения аппаратуры контроля РКК (рисунок 4).

Таблица 2

t, годы	2012	2015	2018	2021	2024	2027	2030
Интегральная оценка технического уровня, $K_{тj}$	16,02	19,35	20,09	20,40	20,71	20,92	21,02

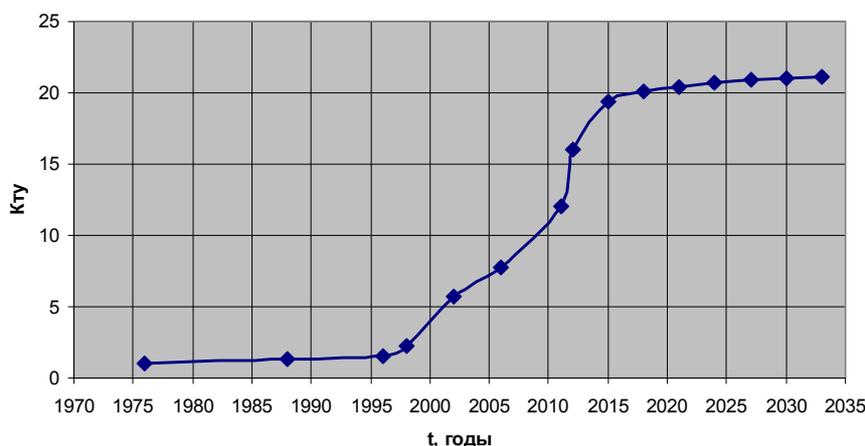


Рисунок 4 - Динамика интегрального и прогноз дальнейшего изменения значения  $K_{ту}$  современного поколения КПА

**Выводы.** Из графика видно, что логистическая кривая достигает своего насыщения к 2017г., то есть продолжать разработку аппаратуры контроля в рамках старой технологии не является рациональным, и уже в 2013г. следует начать подготовку предприятия к созданию нового поколения КПА.

С точки зрения обеспечения долгосрочной конкурентоспособности задача научного прогнозирования времени перехода на новое поколение КПА и требований, которым она должна отвечать, является весьма актуальной. Такой прогноз позволит увеличить вероятность получения новых заказов на создание целевых КПА нового поколения за счёт сокращения сроков разработки конструкторской документации (КД) и отказа от стадий эскизного и технического проектирования. Для более достоверного прогнозирования в целях обеспечения долгосрочной конкурентоспособности предприятия будет проведено исследование влияния уровня развития перспективных ракет-носителей на уровень развития соответствующей КПА. Кроме того, в продолжение данного исследования прогнозные данные планируется скорректировать с учётом технического уровня КПА, разрабатываемой отечественными и зарубежными предприятиями-

конкурентами.

Ошибки в планировании и организации разработки новой техники могут привести к отставанию ракетно-космической отрасли от зарубежных конкурентов. Чтобы этого избежать, необходимо в отрасли в целом и на разрабатывающих предприятиях в отдельности разработать методологию формирования проведения и финансирования работ, связанных с созданием НТЗ для перспективной техники [5].

#### Библиографический список

1. *Фостер Р.* Обновление производства: атакующие выигрывают. – М.: Прогресс, 1987.
2. *Саркисян С.А., Старик Д.Э., Акопов П.Л., Минаев С.Э., Кастин В.И.* Экономическое прогнозирование развития больших технических систем. М.: Машиностроение, 1977. 318 с.
3. Рабочая тетрадь по прогнозированию/ Редкол.: И.В. Бестужев-Лада (отв.ред.). – М.: Мысль, 1982. – 430 с.
4. *Моисеев С.В.* Экономические критерии выбора радиоэлектронных комплексов самолётов. – М.: Машиностроение, 1984 – 224 с.
5. *Павлинич С.П., Поезжалова С.Н., Селиванов С.Г.* Метод системного анализа инновационных проектов развития техники и технологий//Системный анализ, управление и обработка информации. № 2 (27) С. 3-11, Уфа – 2008.