

Т. И. АЛИЕВ, Б. С. ПАДУН

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ МИКРООБЪЕКТИВОВ

Рассматриваются концептуальная и стохастические модели, а также подходы к оптимизации технологического процесса функционирования линии сборки.

Ключевые слова: технологическая линия сборки, технологический процесс, микрообъектив, материальный поток, виртуальная сборка, моделирование.

Введение. Высокая стоимость создания и обслуживания современного интеллектуального оборудования, к которому относится автоматизированная технологическая линия сборки (ТЛС) микрообъективов (МО), выдвигает на первый план задачу его эффективного использования. На данном этапе для современной экономики подобные задачи являются первоочередными. Поэтому необходима оптимизация процессов, выполняемых ТЛС, состав и концепция построения которой подробно описаны в работе [1].

Основные понятия

— Технологический процесс функционирования (ТПФ) ТЛС представляет собой совокупность действий, выполняемых на линии во время изготовления МО (сборка узлов и МО, перемещение объектов — деталей, узлов и МО, измерение деталей и узлов, контроль качества собранных узлов, складирование объектов, комплектация деталей и узлов, передача данных, ожидание). ТПФ имеет несколько уровней декомпозиции: уровень ТЛС, уровень зон и стационарного склада, уровень станций и транспортных линий, уровень отдельных устройств.

— Материальные потоки — это движение тары, деталей и узлов в ТЛС МО. Потоки вне станций — это потоки тары, на станциях — это потоки деталей и узлов.

— Виртуальная сборка — это процесс проектирования ТПФ, на котором по результатам измерений деталей и узлов определяются элементы, входящие в конкретный МО.

Постановка задачи. Следует определить загрузку ТЛС в целом и ее отдельных компонентов, оценить время сборки МО и возможность выполнения заказа в заданные сроки,

выявить возможность дополнительной загрузки оборудования, а также обеспечить наивысшую производительность ТЛС за счет применения эффективных методов управления материальными потоками, задаваемыми в виде различных дисциплин обслуживания.

Для решения поставленной задачи необходимо построить концептуальную и математические модели функционирования технологической системы, определить показатели эффективности, сформулировать критерий оптимальности и выполнить модельные эксперименты, направленные на выявление свойств и закономерностей, присущих процессам, которые протекают в исследуемой системе.

Концептуальная модель функционирования технологической линии сборки. В ТПФ можно выделить следующие этапы:

1) *начальный этап* — загрузка деталей из мобильных складов в стационарный и локальные склады, на станции измерений, виртуальная сборка узлов „линза в оправе“. На этом этапе функционирует только оборудование зоны измерений и комплектации. В качестве критерия оценки решений следует выбрать время поступления первой тары на ТЛС до начала проведения результативной виртуальной сборки узлов „линза в оправе“;

2) *переходный этап* — сборка и измерение узлов „линза в оправе“ и деталей, виртуальная сборка МО. На переходном этапе функционирует только оборудование зоны измерений и комплектации. В качестве критерия оценки решений следует выбрать время от начала сборки узлов „линза в оправе“ до проведения результативной виртуальной сборки МО;

3) *устойчивый этап* включает процессы комплектации стаканов и корпусов и сборки МО. В зоне измерения и комплектации могут параллельно измеряться детали и узлы, собираться узлы „линза в оправе“, комплектоваться детали и узлы с целью освобождения тары, производится виртуальная сборка узлов и МО. В качестве критерия оценки решений следует выбрать производительность линии по сборке МО;

4) *предаварийный этап* — дозагрузка локальных складов, выгрузка пустых тар, тар с браком и тар с собранными МО. В качестве критерия оценки решений следует выбрать время, затраченное на ликвидацию предаварийной ситуации;

5) *этап выхода из аварийного состояния* включает процесс освобождения на станции комплектации тары, которая не полностью заполнена, и выгрузки пустой тары со стационарного склада, а также загрузки специальной тары на стационарный склад. В качестве критерия оценки решений следует выбрать время, затраченное на ликвидацию аварийной ситуации;

5) *этап выхода из тупиковой ситуации* — освобождение станций и/или транспортных линий и/или стационарного склада. Этот этап возникает, если процессы сборки, измерений, складирования и т.п. не могут продолжаться из-за непредвиденных обстоятельств. В качестве критерия оценки решений следует выбрать время, затраченное на ликвидацию тупиковой ситуации.

Технологический процесс функционирования ТЛС микрообъективов имеет три особенности. Первая состоит в том, что на начальном и переходном этапах ТПФ является детерминированным, что обеспечивается наличием моделей тар в базе данных, а на переходном этапе к этому добавляется результат виртуальной сборки узлов. Вторая особенность — это неопределенность ТПФ. Сборка МО выполняется по результатам виртуальной сборки, но из-за неточности математических моделей обеспечения качества МО может быть не получена заданная точность сборки стакана и корпуса. Следовательно, во время выполнения ТПФ возникает необходимость его изменения — например, положить стакан или корпус после контроля в тару с браком, отправить специальную тару или тару с браком на склад. Третья особенность — это открытость ТПФ, т.е. его можно пополнять действиями по сборке новых МО после выполнения виртуальной сборки по новым результатам измерений деталей и узлов.

Материальные потоки могут быть трех типов:

а) *независимые* — могут одновременно требовать одни и те же ресурсы и задерживать друг друга. Поэтому возникает задача определения дисциплины обслуживания материальных потоков с наивысшей пропускной способностью;

б) *зависимые* — развиваются строго последовательно. В этом случае требуется только оценка времени обслуживания материальных потоков, чтобы определить общую загрузку ТЛС;

в) *частично зависимые* — при их разветвлении требуется решение задачи обеспечения наивысшей пропускной способности технологической системы сборки, но, учитывая периоды последовательного их выполнения, необходимо отдельно определить общую загрузку ТЛС.

В каждом типе выделяются детерминированные и стохастические материальные потоки.

В складской зоне материальные потоки обслуживаются роботом-штабелером, поэтому все процессы по перемещению тары могут выполняться строго последовательно. Время обслуживания одного материального потока определяется по зависимости:

$$T = t_x + t_b + t_d + t_y, \quad (1)$$

где t_x — время подхода робота-штабелера к заданной позиции, t_b — время взятия тары, t_d — время доставки тары в заданную позицию, t_y — время установки тары (здесь и далее если используется „ T “, предполагается, что существуют различные варианты расчета времени, если „ t “ — возможен только один вариант расчета).

Схема обслуживания материальных потоков в складской зоне определяется непосредственно во время виртуальной сборки, поэтому все составляющие выражения (1) — это детерминированные величины. Исключение составляют некоторые материальные потоки, связанные с зоной 2 [1]: доставка на стационарный склад бракованных узлов, загрузка пустой тары и тары с новым комплектом компенсаторов. Следовательно, возникает необходимость установления вероятности задержки процессов сборки МО и определения дисциплин обслуживания материальных потоков, что позволит минимизировать время задержки процессов сборки МО. На основе анализа материальных потоков формируются рекомендации по реорганизации работы складской зоны.

В зоне измерений и комплектации обслуживание материальных потоков происходит с помощью транспортной линии и трех станций (комплектации и сборки узлов, бесконтактного и контактного измерения деталей и узлов). Транспортная линия зоны не имеет параллельных веток. Но технология работы станций зоны предполагает съем с транспортной линии тары на специальные столики станций, что позволяет организовать параллельное обслуживание материальных потоков. Время обслуживания материального потока определяется в соответствии со следующими зависимостями:

— при комплектации и сборке или при комплектации, или при измерении

$$T = T_n + T_p + T_c, \quad (2)$$

— при комплектации, сборке и измерении узла „линза в оправе“

$$T = T_n + t_{py} + T_{и} + T_{ри} + T_c, \quad (3)$$

где T_n — время перемещения шаттла (с тарой или без нее) на соответствующую станцию, T_p — время выполнения работ по комплектации или измерениям, t_{py} — время выполнения работ по сборке узла „линза в оправе“, $T_{и}$ — время перемещения тары с узлами „линза в оправе“ на позицию соответствующей станции измерений, $T_{ри}$ — время измерения узлов на соответствующей станции измерений, T_c — время перемещения тары от соответствующей станции до позиции съема.

Время T_n в общем случае определяется по зависимости:

$$T_n = t_T + T_o + t_{cr}, \quad (4)$$

где t_t — время движения шаттла по транспортной линии до соответствующей станции, T_o — время ожидания около предыдущих станций, если занято оборудование, t_{ct} — время снятия тары с шаттла на станцию.

За счет виртуальной сборки все составляющие выражений (2)—(4) являются детерминированными величинами, а значение T_o можно свести к нулю. Исключение составляет время t_{py} , которое является стохастической величиной. Поэтому необходимо определить значения вероятности сборки узлов МО, определить дисциплины обслуживания материальных потоков, позволяющие минимизировать время их задержки, и сформировать рекомендации по организации работы станции сборки узлов „линза в оправе“.

В зоне сборки МО материальные потоки обслуживаются с помощью транспортной линии и пяти станций сборки и контроля качества МО. Технологические операции по сборке и контролю МО выполняются строго последовательно. Для организации материальных потоков выявленных в результате контрольных операций бракованных узлов МО предусмотрены параллельные транспортные ветви. Таких потоков два. Технология работы станций зоны сборки предполагает возможность съема с транспортной линии тары на специальные устройства станций. Поэтому станции можно условно рассматривать как дополнительные ветки транспортной линии и, следовательно, освобождать транспортную линию для перемещения тары с дополнительными комплектующими деталями и удаления освободившейся тары.

Время обслуживания материального потока определяется по зависимостям:

— при комплектации станций

$$T = T_{п} + T_{лс}, \quad (5)$$

— при сборке МО

$$T = T_{п} + t_{рс} + t_{ра} + t_{рк} + t_{рв} + t_{ро} + T_{м} + T_{с}, \quad (6)$$

— при удалении со станции тары (с браком МО, пустой тары и т.д.)

$$T = T_{п} + T_{с}, \quad (7)$$

где $T_{лс}$ — время установки тары в локальный склад, $t_{рс}$ — время выполнения работ по сборке узла „стакан“, $t_{ра}$ — время выполнения работ по контролю качества изображения, $t_{рк}$ — время выполнения работ по сборке узла „корпус“, $t_{рв}$ — время выполнения работ по контролю высоты МО, $t_{ро}$ — время выполнения работ по окончательной сборке МО, $T_{м}$ — время перемещения тары между станциями.

За счет виртуальной сборки многие составляющие выражения (5)—(7) являются детерминированными величинами, время T_o можно свести к нулю. Исключением являются материальные потоки удаления бракованных МО, выгрузки и догрузки измеренных деталей и узлов, а также времена $t_{ра}$ и $t_{рв}$, которые являются стохастическими величинами. Поэтому необходимо определить значение вероятности сборки узлов МО, определить дисциплины обслуживания материальных потоков, позволяющие минимизировать время их задержки, и сформулировать рекомендации по организации работы станций сборки узлов МО.

Модель ТПФ технологической линии сборки. В качестве моделей ТПФ могут использоваться стохастические модели, позволяющие учесть случайный характер протекающих в ТЛС процессов, а также принцип многоуровневого иерархического моделирования [2], в соответствии с которым на основе простейших базовых моделей, учитывающих наиболее важные особенности ТЛС, могут строиться более сложные модели, отображающие свойства отдельных подсистем (локальные модели) или всей системы в целом (глобальные модели). Для обеспечения корректности и повышения достоверности результатов моделирования эффективным является комбинированный подход, основанный на сочетании аналитического и имитационного моделирования ТПФ ТЛС.

Оценка загрузки оборудования и анализ влияния различных способов организации на характеристики ТПФ линии сборки микрообъективов могут быть выполнены с использованием структурно-функциональных моделей, построенных в терминах теории очередей, изучающей стохастические системы обслуживания с дискретным характером функционирования [2].

Модель ТПФ ТЛС МО может быть представлена как открытая сеть очередей. На рис. 1 представлен фрагмент модели, отображающий процессы, протекающие в зоне комплектации и измерений изделий и зоне сборки МО. Каждый узел отображает соответствующие этапы ТЛС МО: этап 1 с двумя параллельными фазами P_{11} и P_{12} — измерение оптических (фаза P_{11}) и механических (фаза P_{12}) деталей МО; этап 2 — сборка узлов; этап 3 — сборка МО.

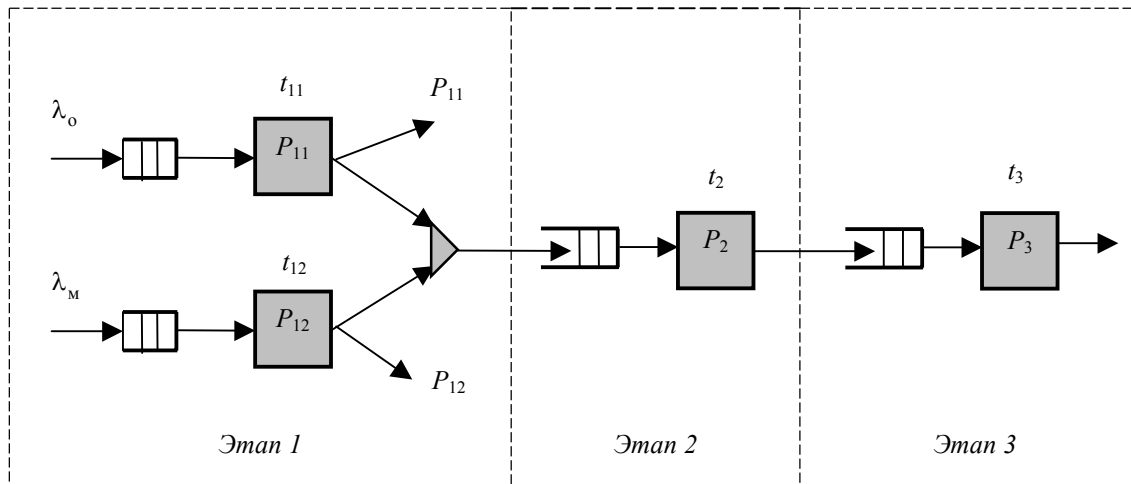


Рис. 1

В качестве исходных параметров модели задаются интенсивность поступления оптических λ_o и механических λ_m деталей, время t_{11}, t_{12}, t_2, t_3 выполнения технологических операций на каждом этапе и вероятность p_{11}, p_{12} появления бракованных оптических и механических деталей. Без потери общности положим, что $\lambda_o = \lambda_m = \lambda$. Кроме того, учитывая, что некоторые материальные потоки и процессы сборки узлов ТПФ являются случайными, необходимо задать вероятностные законы распределения соответствующих случайных величин. Поскольку не все значения априори известны, моделирование может проводиться при различных предположениях о характере поступления и обработки деталей с целью анализа различных вариантов организации ТПФ.

Реализация представленной модели может выполняться с использованием как аналитических, так и имитационных методов [3]. Применение аналитических методов предполагает введение ряда ограничений на параметры и характер функционирования ТЛС в виде допущений и предположений. В частности, точные методы расчета характеристик разомкнутых сетевых моделей могут быть получены только для так называемых экспоненциальных моделей, в которых процессы поступления и обслуживания заявок, в качестве которых в нашем случае выступают оптические и механические детали, должны быть марковскими, т.е. временные интервалы между поступающими заявками и времена их обслуживания должны быть распределены по экспоненциальному закону [2]. Если указанные законы распределения отличаются от экспоненциальных, погрешности расчета вероятностно-временных характеристик ТПФ технологической линии сборки МО могут оказаться значительными. В то же время при оценке загрузки оборудования аналитический подход позволяет получить точные результаты, поскольку нагрузка определяется средними значениями параметров и не зависит от вероятностных распределений.

Характеристики процесса функционирования ТЛС. На основе перечисленных параметров могут быть рассчитаны характеристики, описывающие эффективность функционирования ТЛС. Расчет характеристик ТПФ линейных разомкнутых однородных экспоненциальных сетевых моделей базируется на эквивалентном преобразовании сети [2].

Значения интенсивности потоков деталей, поступающих на этапы 2 и 3, одинаковы и рассчитываются как

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \min\{(1-p_{11}); (1-p_{12})\}\lambda.$$

Общее время, затрачиваемое на сборку МО, может быть рассчитано по формуле

$$T = \max\left\{\frac{t_{11}}{1-\rho_{11}}; \frac{t_{12}}{1-\rho_{12}}\right\} + \frac{t_2}{1-\rho_2} + \frac{t_3}{1-\rho_3} = \sum_{i=1}^3 \frac{t_i}{1-\rho_i},$$

где

$$\max\left\{\frac{t_{11}}{1-\rho_{11}}; \frac{t_{12}}{1-\rho_{12}}\right\} = \frac{t_1}{1-\rho_1};$$

$\rho_{11} = \lambda t_{11}$; $\rho_{12} = \lambda t_{12}$ — коэффициенты загрузки оборудования на обеих фазах первого этапа; $\rho_1 = \max\{\rho_{11}; \rho_{12}\}$; $\rho_2 = \Lambda_2 t_2$; $\rho_3 = \Lambda_3 t_3$ — коэффициенты загрузки оборудования соответственно на первом, втором и третьем этапах ТПФ ТЛС МО.

На рис. 2 представлен характер зависимости $T' = f'(\lambda)$ времени, затрачиваемого на сборку МО, от интенсивности λ поступления деталей на ТЛС. Отметим, что имеется некоторое предельное значение интенсивности λ'_{\max} , при

котором среднее время сборки МО становится бесконечно большим, что свидетельствует о перегрузке в ТЛС, наступающей, когда загрузка одного из узлов становится равной единице. Такой узел называется „узким местом“ и характеризуется тем, что очередь из деталей перед ним со временем растет до бесконечности. Разгрузить „узкое место“ возможно, например, повышая скорость сборки узлов и МО, что позволяет увеличить производительность ТЛС в целом и как следствие — улучшить характеристики ее функционирования.

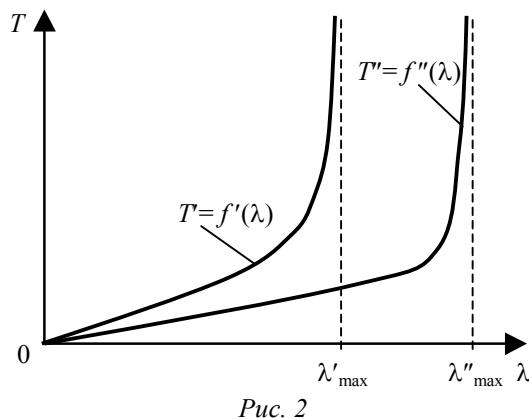


Рис. 2

Зависимость среднего времени сборки МО от интенсивности λ поступления деталей в ТЛС принимает вид $T'' = f''(\lambda)$, т.е. время сборки МО при одной и той же интенсивности поступления деталей λ становится меньше, а предельное значение интенсивности λ''_{\max} , при котором наступает перегрузка, становится больше: $\lambda''_{\max} > \lambda'_{\max}$. При этом, возможно, появится новое „узкое место“, и дальнейшее улучшение ТЛС может быть достигнуто путем его разгрузки, что, очевидно, означает увеличение ее стоимости. Наилучший вариант построения ТЛС достигается в случае равенства загрузки всех устройств, входящих в состав ТЛС. Такая система называется сбалансированной.

Для того чтобы в системе не было перегрузок, необходимо выполнение условия [2]:

$$\lambda < \min(t_{11}^{-1}; t_{12}^{-1}; qt_2^{-1}; qt_3^{-1}),$$

где $q = \min\{(1-p_{11}); (1-p_{12})\}$.

Выражение в правой части представленного неравенства определяет максимально допустимую интенсивность поступления деталей на ТЛС МО. Если указанное условие не выполняется, то стационарный режим в ТЛС может быть реализован одним из следующих способов: уменьшением интенсивности λ поступления деталей на ТЛС или уменьшением

длительности t_j обработки в перегруженных узлах до значений, при которых это условие будет выполняться.

Задача оптимизации. Рассмотрим теперь задачу оптимизации ТПФ линии сборки МО с использованием представленной модели. Предположим, что для любой конфигурации технических средств и стратегии управления ТПФ, содержащим в общем случае n этапов обработки и сборки МО, могут быть определены коэффициенты простоя оборудования η_1, \dots, η_n на каждом из этапов, $\eta_i = 1 - \rho_i$, и среднее время T сборки МО. Значения η_1, \dots, η_n и T зависят, в первую очередь, от времени обслуживания на каждом этапе, которое определяется быстроедействием оборудования и количеством параллельно обрабатывающих станций, а также от стратегии управления в ТЛС.

Положим, что z — „штраф“ за задержку на единицу времени в процессе сборки МО. Рассмотрим суммарные потери

$$F = \sum_{i=1}^n s_i \eta_i + zT \quad - \quad \min, \quad (8)$$

где s_i — стоимость оборудования, используемого на i -м этапе.

Первое слагаемое $F_1 = \sum_{i=1}^n s_i \eta_i$ в (8) определяет цену простоя оборудования, а второе

$F_2 = zT$ — цену задержки в процессе сборки МО. Таким образом, величина $F = F_1 + F_2$ характеризует суммарные потери в ТЛС: чем меньше эти потери, тем выше эффективность ВС. Показатель F называется критерием сбалансированности выполнения процесса. Загрузка оборудования определяет эффективность использования ресурсов системы. При равных условиях более высокую эффективность имеет система, оборудование которой наиболее полно используется в процессе сборки МО, так как система с большей загрузкой оборудования имеет в среднем более высокую производительность, т.е. обеспечивает сборку большего количества МО в единицу времени. Указанные характеристики зависят от целого ряда параметров, определяющих как нагрузку (время сборки МО на каждом этапе и интенсивность поступления деталей для сборки МО), так и структурно-функциональную организацию системы.

Для определения оптимальных значений времени обработки t_1, \dots, t_n на каждом этапе ТПФ запишем выражения для расчета коэффициентов простоя и времени сборки МО:

$$\eta_i = 1 - \rho_i = 1 - \lambda_i t_i \quad (i = \overline{1, n}); \quad T = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{1 - \lambda_i t_i}.$$

Тогда выражение (8) примет вид

$$F = \sum_{i=1}^n s_i (1 - \lambda_i t_i) + z \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{1 - \lambda_i t_i} \quad - \quad \min.$$

Взяв частные производные от F по t_i и приравняв их к нулю, получим систему уравнений, решение которой имеет вид:

$$t_i = \frac{1}{\lambda_i} \left(1 - \sqrt{\frac{z}{s_i \lambda_i}} \right) \quad (i = \overline{1, n}). \quad (9)$$

Выражение (9) определяет оптимальные значения $\{t_1, \dots, t_n\}_{\text{opt}}$ времени сборки МО на каждом этапе ТПФ, которые могут быть достигнуты за счет использования оборудования с соответствующей производительностью или за счет параллельной сборки на нескольких однотипных устройствах в пределах одного этапа.

Заключение. Рассмотренная задача моделирования и оптимизации ТПФ ТЛС микрообъективов решалась при использовании ряда допущений и предположений, которые позволили получить результат в явном аналитическом виде. Одним из таких допущений являлось предположение о беспriorитетной дисциплине обслуживания в процессе сборки МО. При использовании других дисциплин, в том числе приоритетных, в качестве моделей ТЛС необходимо применять неоднородные сетевые модели [2]. Задачи оптимизации процесса с использованием неоднородных моделей будут рассмотрены в последующих публикациях.

В общем случае оптимизация технологического процесса функционирования линии сборки микрообъективов потребует громоздких математических выкладок, которые могут привести к получению приближенных аналитических результатов. В этом случае необходимо проведение детального исследования оптимизированной системы с использованием средств имитационного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Падун Б. С., Латышев С. М. Интегрированная система автоматизации сборки микрообъектива // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 8. С. 34—39.
2. Алиев Т. И. Математические методы теории вычислительных систем. Л.: ЛИТМО, 1979.
3. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS. СПб: Питер; Киев: Издательская группа ВНУ, 2004. 847 с.

Сведения об авторах

Тауфик Измайлович Алиев

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра вычислительной техники; E-mail: aliev@d1.ifmo.ru

Борис Степанович Падун

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: bsp.tps.ifmo@mail.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
14.12.09 г.