

ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ СИСТЕМ (продолжение 2)

Показатели роли элементов в системе. Тестовый пример расчета показателей с применением ПК АСМ

А. Определения понятий.

В исследованиях систем являются важными характеристиками и часто используются понятия места и роли систем и их элементов.

Следует отметить, что в технических приложениях, в том числе в ОЛВМ, ограничиваются использованием понятия **роли отдельных элементов**, под которой понимают количественные характеристики их значимости, положительного вклада и отрицательного вклада.

В теории вооружений [4] и в теории управления силами [5] пользуются понятиями **места и роли систем и их элементов**, причем, как правило, в масштабах, свойственных выполнению задач силами, т.е. стратегическом, оперативном и тактическом. Здесь под местом вооружения, группировки сил понимают качественную характеристику, определяющую совокупность задач, при выполнении которых используется или целесообразно использовать данное вооружение, группировку сил. Роль вооружения данного типа, группировки сил определяется как характеристика, количественно определяющая объем, долю задач, возлагаемых на них или выполняемых ими. Обычно роль отождествляют с процентным вкладом вооружения, группировки сил в показатель эффективности, достижения цели при выполнении задачи, в которой отведено место.

Ниже вкратце, что обусловлено журнальным вариантом публикации, рассматриваются вопросы теории и тестовые примеры ее применения как в технических (в данном номере журнала), так и военных приложениях (следующая и заключительная статья этой серии).

Б. Показатели роли элементов в системе.

В исследованиях систем, помимо общей вероятностной характеристики P_c надежности, работоспособности, эффективности системы, важное место занимают вопросы количественной оценки роли, которую играют ее элементы в способности системы реализовать свое функциональное назначение.

Показатели роли элементов выполняют прогностическую функцию, обеспечивая решение оптимизационных задач, задач параметрического и

структурного синтеза, выработки эффективных и научно обоснованных решений, направленных на повышение положительных или на уменьшение отрицательных свойств исследуемых системных объектов и процессов.

В ОЛВМ рассматриваются три показателя роли или ролевых показателя отдельных элементов – значимость, положительный вклад и отрицательный вклад.

1) Значимости и метод их расчета.

По своему физическому смыслу значимостью ξ_i отдельного элемента i исследуемой технической системы является прирост ΔP_c вероятностной функции P_c системы (надежности, стойкости, живучести) при изменении собственного вероятностного параметра p_i элемента i от 0 (достоверный отказ, деградация) до 1 (абсолютная надежность). Формально это записывается следующим образом:

$$\xi_i = \frac{P_c}{p_i = 1} - \frac{P_c}{p_i = 0}; (i = 1, 2, \dots, H). \quad (1)$$

Здесь $\frac{P_c}{p_i = 1}$ – значение вероятностной характеристики системы при условии абсолютной надежности, а $\frac{P_c}{p_i = 0}$ – при условии достоверного отказа элемента i на рассматриваемом интервале t времени функционирования.

Для случая, когда процессы отказов (или отказов и восстановлений) всех элементов системы являются независимыми в совокупности, значимости (1) элементов системы численно равны соответствующим частным производным:

$$\xi_i = \frac{\partial P_c}{\partial p_i}; (i = 1, 2, \dots, H). \quad (2)$$

Значимости элементов характеризуются следующими положениями:

1) Диапазоном значений вероятностного показателя значимости ξ_i является замкнутый интервал $[-1, +1]$. Значимость может быть положительной $\xi_i > 0$, отрицательной $\xi_i < 0$, абсолютной $\xi_i = \pm 1$ и нулевой $\xi_i = 0$.

2) Отрицательное значение $\xi_i < 0$ характеризует вредное влияние элемента i на систему. В этом случае увеличение, например, надежности самого элемента i приводит к уменьшению вероятности реализации рассматриваемого режима ее функционирования, заданного ЛКФ. Отрицательные значимости элементов характерны для немонотонных логико-вероятностных моделей систем. Все элементы монотонных систем могут иметь только положительные или нулевые значения характеристик их значимости.

3) Положительное значение $\xi_i > 0$ определяет то максимально возможное увеличение значения системной характеристики P_c , которое она может получить, если изменить вероятность p_i (только одного элемента i) от нуля до единицы.

4) Нулевое значение показателя значимости $\xi_i = 0$ говорит о том, что данный элемент i является несущественным для реализации рассматриваемого режима функционирования системы в целом (элемент i не влияет на исследуемое свойство устойчивости системы).

Прагматику значимостей можно пояснить таким образным примером: при одинаковой стоимости мероприятий по повышению надежности каждого из элементов системы, распределение средств на улучшение элементов целесообразно осуществлять пропорционально их значимостям.

Выше говорилось о значимостях элементов по отношению к выходной функции системы. Однако понятие значимости применимо и к выходным функциям любых подсистем, в состав которых входят соответствующие элементы.

Вычисление характеристик значимости предполагает двойной расчет системной характеристики P_c : при $p_i = 1$ и при $p_i = 0$. Вычитая из первого результата второй, получаем искомую характеристику значимости элемента.

Важным является следующее обстоятельство: значения значимостей элементов системы зависят не только от структуры, но и от состояния системы, значений собственных вероятностных параметров элементов. Иначе говоря, значимости являются не абсолютной, а ситуативной характеристикой системы.

2) Положительные и отрицательные вклады.

Наряду с ролевыми характеристиками значимости ξ_i , в анализе систем находят применение ролевые показатели положительного β_i^+ и отрицательного β_i^- вкладов элементов.

Недостаточность знания показателя значимости ξ_i элемента определяется тем обстоятельством, что он характеризует влияние на систему только предельно теоретически возможного изменения этого параметра от 0 до 1.

Однако исследователя интересует реальная возможность изменения собственного параметра элемента от текущего значения p_i до 0 (достоверный отказ, деградация) до 1 (абсолютная надежность). Оценки влияния именно такого изменения значения собственного параметра элемента на изменение значения вероятностной функции системы и дают показатели положительного и отрицательного вкладов.

Эти показатели определяют, насколько изменится системный показатель P_c при указанных изменениях параметра p_i элемента i исследуемой системы, а именно:

– показатель отрицательного вклада – при изменении параметра от текущего значения p_i до значения $p_i = 0$, характеризующего достоверный отказ, деградацию

$$\beta_i^- = -\left(\frac{P_c}{p_i} - \frac{P_c}{p_i = 0}\right); (i = 1, 2, \dots, H); \quad (3)$$

– показатель положительного вклада – при изменении параметра от текущего значения p_i до теоретически возможного предельного значения $p_i = 1$

$$\beta_i^+ = \frac{P_c}{p_i = 1} - \frac{P_c}{p_i}; (i = 1, 2, \dots, H); \quad (4)$$

Следует отметить возможность иной интерпретации вкладов, которая определяется соотношением теоретического и прагматического аспектов, а именно:

– показатель (3) отрицательного вклада, взятый со знаком «-», т.е. рассчитываемый по формуле

$$\beta_i^- = \frac{P_c}{p_i} - \frac{P_c}{p_i = 0}; (i = 1, 2, \dots, H), \quad (5)$$

есть показатель **реального, осуществленного вклада** элемента в системный показатель P_c за счет его достигнутого значения p_i ;

– показатель (4) положительного вклада есть показатель **потенциально возможного предельного вклада** элемента при увеличении параметра элемента от текущего значения p_i до теоретически возможного предельного значения $p_i = 1$.

Различная интерпретация вкладов есть результат терминологического и понятийного разнообразия, которое свойственно специалистам различных предметных областей исследования. Мы привыкли терпимо относиться к употреблению понятий «показатель» и «критерий» в семантических значениях, которые в разных научных школах могут не совпадать и даже быть противоположными. Главное – понять, в каком смысловом значении употребляется тот или иной термин. И здесь мы наблюдаем то же явление: кто-то согласится или привык к одной интерпретации, а кто-то – к другой.

Интерпретация вкладов как положительного и отрицательного возникла при анализе монотонных систем, для которых положительный вклад действительно всегда имеет знак «+», а отрицательный – знак «-». Однако в немонотонных системах увеличение вероятностей одних элементов приводит к увеличению, а увеличение вероятностей других элементов – к уменьшению значения P_c . Причем это изменение общесистемной характеристики P_c в обоих случаях называется положительным вкладом. Таким образом, для немонотонных систем эти термины вносят путаницу.

Поэтому целесообразно было бы придерживаться интерпретации вкладов, которая определяется соотношением теоретического и прагматического аспектов.

На удобный способ терминологического различения вариантов совпадения и различия знаков приращений вероятностей элементов p_i и общесистемной характеристики P_C указал Р. И. Трухаев [6]. Он ввел понятие инградиента показателя свойства: инградиент положителен ($\beta^{(+)}$), если знак изменения качества системы совпадает со знаком изменения показателя, и отрицателен ($\beta^{(-)}$), если знак изменения качества системы противоположен знаку изменения показателя.

В соответствии с подходом Р. И. Трухаева, целесообразно обозначать и называть показатели вкладов следующим образом:

– показатель **реального, осуществленного вклада** элемента

$$\beta_{PB.i}^{(\pm)} = \frac{P_C}{p_i} - \frac{P_C}{p_i} = 0; (i = 1, 2, \dots, H) \quad (6)$$

имеет положительный инградиент при $\beta_{PB.i}^{(+)} > 0$ и отрицательный инградиент – при $\beta_{PB.i}^{(-)} < 0$;

– показатель **потенциально возможного предельного вклада** элемента

$$\beta_{PB.i}^{(\pm)} = \frac{P_C}{p_i} = 1 - \frac{P_C}{p_i}; (i = 1, 2, \dots, H) \quad (7)$$

имеет положительный инградиент при $\beta_{PB.i}^{(+)} > 0$ и отрицательный инградиент – при $\beta_{PB.i}^{(-)} < 0$.

Однако следует иметь в виду, что ПК АСМ создавался в расчете на применение к монотонным техническим системам, вследствие чего в нем реализована терминология положительного и отрицательного вкладов. По этой причине приводимый ниже пример расчета с использованием ПК АСМ будет изложен именно в этих терминах.

В завершение этой части следует отметить, что значения вкладов, как и значимостей элементов системы, зависят не только от структуры, но и от состояния системы, значений собственных вероятностных параметров элементов.

3) Соотношения между значимостями, положительными и отрицательными вкладами.

Аналогично с показателями вкладов, инградиентом будет характеризоваться и показатель значимости.

Когда процессы отказов (или отказов и восстановлений) всех элементов системы являются независимыми в совокупности, для показателей вкладов справедливы формулы:

$$\beta_{PB.i}^{(\pm)} = (1 - p_i) \xi_i^{(\pm)}; \quad (8)$$

$$\beta_{PB.i}^{(\pm)} = -p_i \xi_i^{(\pm)}, \quad (9)$$

откуда следует

$$\xi_i^{(\pm)} = \beta_{PB.i}^{(+)} + \beta_{PB.i}^{(-)}. \quad (10)$$

Соотношение (10) трактуется следующим образом: значимость элемента системы представляет собой сумму реального, осуществленного, и потенциально возможного вкладов элемента в системный показатель P_C .

Из (8) следует, что если значение p_i близко к 1, то даже при большой по модулю значимости $\xi_i^{(\pm)}$ элемента i его потенциально возможный вклад в изменение P_c системы может оказаться крайне незначительным, что и покажет $\beta_{ПВ.i}^{(\pm)}$.

Наконец, можно привести еще одно эвристическое соображение по поводу реального, осуществленного, и потенциально возможного, предельного вклада. Первый из них должен интересовать исследователя при синтезе новой, проектируемой системы, когда целью исследования является определение места и роли всех элементов в системной совокупности, второй – на этапе совершенствования, модернизации, адаптации существующей системы, когда требуется корректировка качества отдельных элементов системы, оказывающих наибольшее влияние на системную функцию.

С учетом ограничений на ресурсы и затраты, показатели значимости и вкладов предоставляют оптимизационные возможности по требуемому изменению параметров элементов системы, которое обеспечивает достижение максимума выходной характеристики, функции отклика, показателя эффективности системы.

В. Пример расчета показателей роли элементов в системе.

1) Расчет показателей значимости элементов.

С применением ПК АСМ решение задачи вычисления ролевых характеристик, в том числе показателей значимости, осуществляется автоматически.

На рис. 12 показан вид окна ввода СФЦ программного комплекса ПК АСМ при решении задачи оценки эффективности гипотетической боевой системы, рассмотренной в предыдущем выпуске журнала, а на рис. 13 – вид окна автоматизированного моделирования ПК АСМ при решении этой задачи.

Напомним, что рассматривается оценка эффективности выполнения гипотетической боевой системой задачи поражения противника с учетом его противодействия. Основными функциональными вершинами, знание назначения которых достаточно для восприятия дальнейшего изложения, являются:

- 1 – функционирование (наличие) ударной подсистемы;
- 2 – функционирование (наличие) оборонительной огневой подсистемы;
- 3 – функционирование (наличие) оборонительной подсистемы РЭБ;
- 4 – функционирование (наличие) обеспечивающей подсистемы наблюдения и целеуказания (ЦУ) ударной подсистеме;
- 5 – функционирование (наличие) подсистемы наблюдения и ЦУ оборонительным подсистемам;
- 6 – функционирование (наличие) подсистемы «противник».

В качестве показателя боевой эффективности выбрана вероятность поражения противника (критерий $Y_{БВ} = y_{36}$), а показателя боевой

устойчивости – вероятность сохранения боеспособности своей боевой системы (критерий $Y_{БЭ} = y_{34}$).

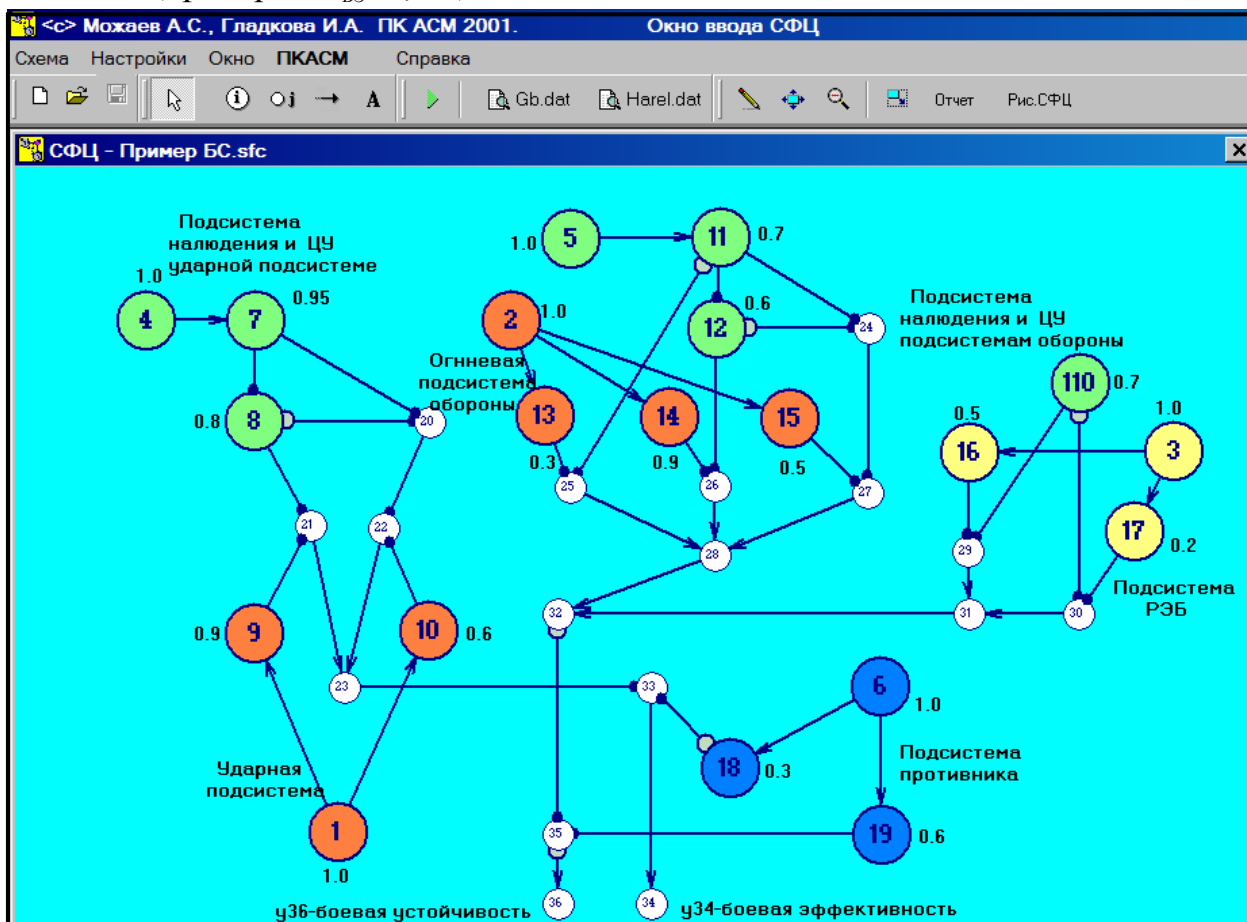


Рис. 12. Вид окна ввода СФЦ ПК АСМ для примера моделирования боевой системы

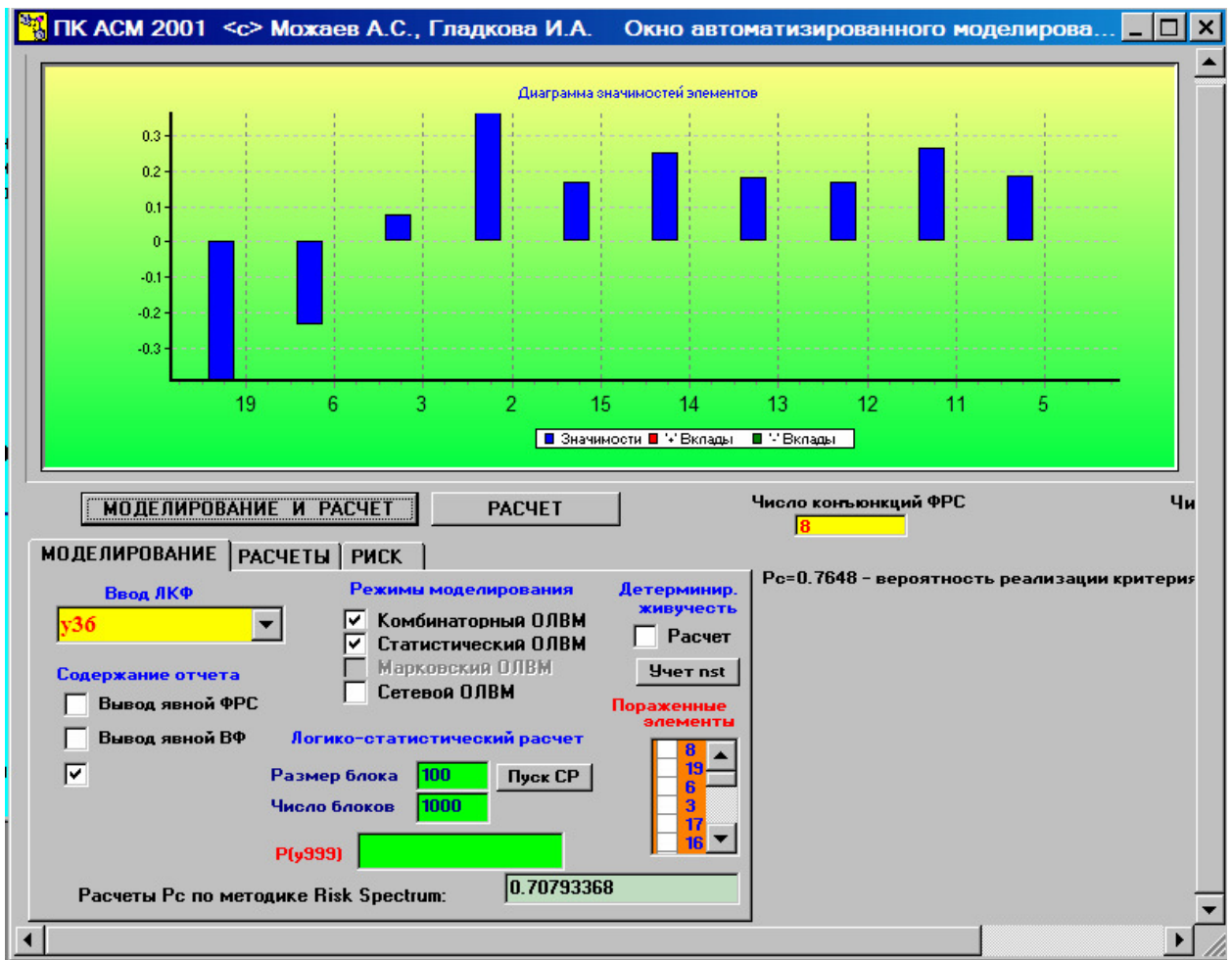


Рис. 13. Вид окна автоматизированного моделирования ПК АСМ с диаграммой значимостей элементов

В окно автоматизированного моделирования выведены:

- заданный пользователем логический критерий функционирования у36, по смыслу – сохранение боеспособности своих сил (формула 17);
- полученное значение вероятности реализации критерия $P_c=0.7648$ (формулы 18, 19);
- диаграмма значимостей элементов системы по отношению к ЛКФ у36; вид графика задается в закладке «Расчеты» установлением режима «Значимость».

Из диаграммы следует, что наибольшую положительную значимость имеют элементы 11 «обнаружение обеспечивающей подсистемой средств нападения противника в дальней зоне, наличие данных ЦУ средствами коллективной обороны» и 14 «отражение средств нападения противника коллективными и индивидуальными огневыми средствами при наличии данных ЦУ». Отрицательной значимостью характеризуется элемент 19 «удар противника по боевой системе», на который исследователь оказать влияния не может, и потому его не рассматривает. Элемент 2 со значением $p_2 = 1$

имеет смысл факта безусловного наличия оборонительной огневой подсистемы, с точки зрения значимости не является критичным и рассмотрению также не подлежит.

Итак, наиболее в качестве наиболее значимых выявлены элементв 11 и 14. Точные значения показателей значимости $\xi_{11} = 0.264$ и $\xi_{14} = 0.252$ выбираются из файла отчета с результатами в табличном виде, который выдается в окне ввода СФЦ ПК АСМ при нажатии кнопки «Отчет».

Таблица характеристик элементов системы в целом			
номер:	Pi	значимость	вклад "-" : вклад "+" :
эл-та:	эл-та	эл-та	0 <-- p : p --> 1 :
:	8:	0.80000000:	0.00000000: -0.00000000: 0.00000000:
:	19:	0.60000000:	-0.39200000: 0.23520000: -0.15680000:
:	6:	1.00000000:	-0.23520000: 0.23520000: -0.00000000:
:	3:	0.00000000:	0.07728000: -0.00000000: 0.07728000:
:	17:	0.20000000:	0.00000000: -0.00000000: 0.00000000:
:	16:	0.50000000:	0.00000000: -0.00000000: 0.00000000:
:	2:	1.00000000:	0.36480000: -0.36480000: 0.00000000:
:	15:	0.50000000:	0.16800000: -0.08400000: 0.08400000:
:	14:	0.90000000:	0.25200000: -0.22680000: 0.02520000:
:	13:	0.30000000:	0.18000000: -0.05400000: 0.12600000:
:	12:	0.60000000:	0.16800000: -0.10080000: 0.06720000:
:	11:	0.70000000:	0.26400000: -0.18480000: 0.07920000:
:	5:	1.00000000:	0.18480000: -0.18480000: 0.00000000:
:	1:	1.00000000:	0.00000000: -0.00000000: 0.00000000:
:	10:	0.60000000:	0.00000000: -0.00000000: 0.00000000:
:	9:	0.90000000:	0.00000000: -0.00000000: 0.00000000:
:	4:	1.00000000:	0.00000000: -0.00000000: 0.00000000:
:	18:	0.30000000:	0.00000000: -0.00000000: 0.00000000:
:	7:	0.95000000:	0.00000000: -0.00000000: 0.00000000:

2) Расчет показателей значимости, положительных и отрицательных вкладов элементов.

В условиях рассматриваемого примера боевой системы, на рис. 13 показан вид окна автоматизированного моделирования ПК АСМ при решении задачи оценки ее эффективности, с отражением:

– заданного пользователем логического критерия функционирования у36, по смыслу – сохранения боеспособности своих сил (формула 17);

– полученного значения вероятности реализации критерия $P_c=0.7648$ (формулы 18, 19);

– диаграммы значимостей, положительных и отрицательных вкладов элементов системы по отношению к ЛКФ у36; вид графика задается в закладке «Расчеты» установлением режима «Все».

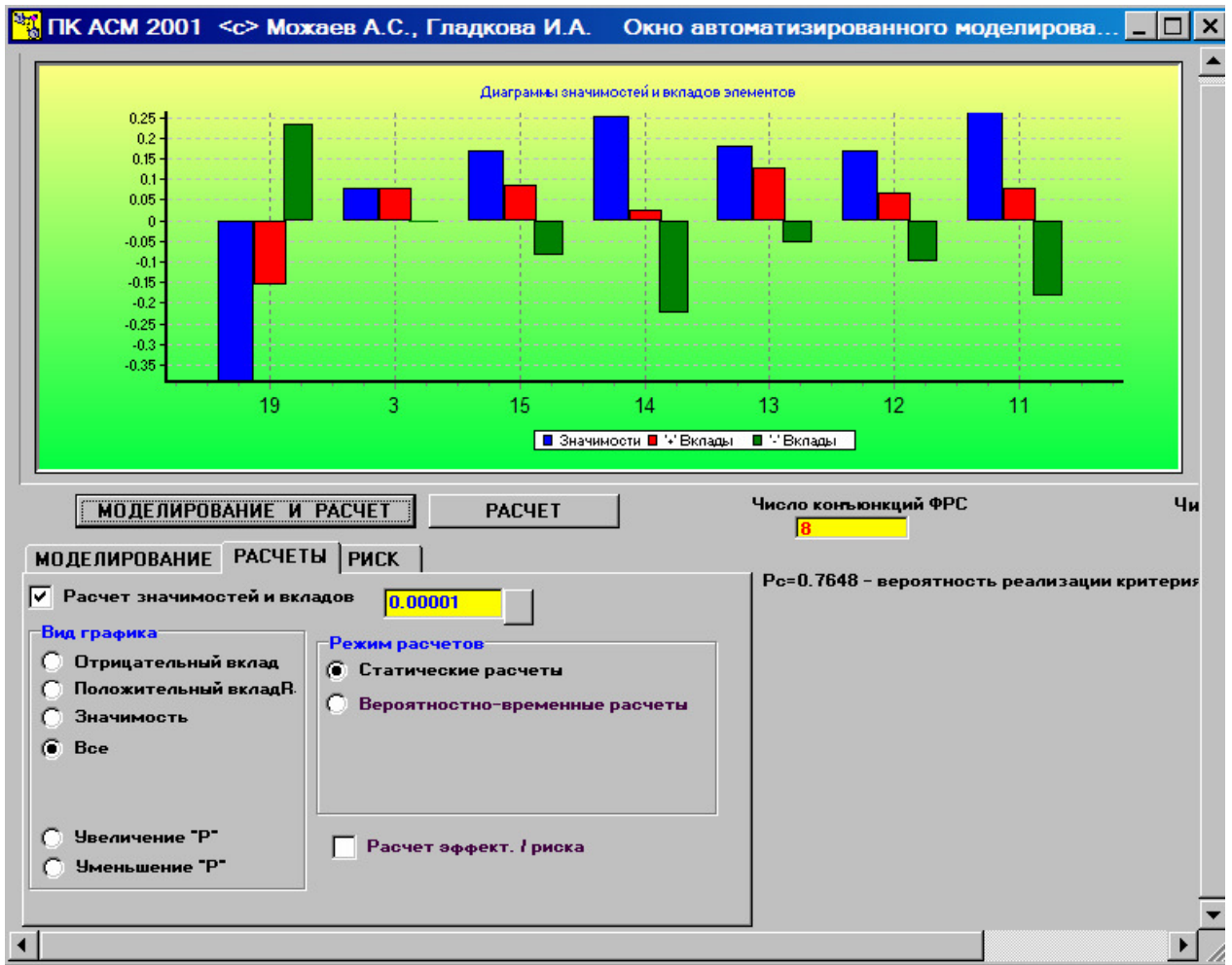


Рис. 14. Вид окна автоматизированного моделирования ПК АСМ с диаграммой значимостей и вкладов элементов

Из графика следует, что для упомянутых элементов имеет место:

– для элемента 11

$$\begin{aligned}
 \beta_{11}^- &= -p_{11}\xi_{11} = -0.7 \cdot (0.264) = -0.1848; \\
 \beta_{11}^+ &= (1 - p_{11})\xi_{11} = (1 - 0.7) \cdot (0.264) = 0.0792; \\
 \xi_{11} &= \beta_{11}^+ - \beta_{11}^- = 0.0792 - (-0.1848) = 0.264.
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

– для элемента 14

$$\begin{aligned}
 \beta_{14}^- &= -p_{14}\xi_{14} = -0.9 \cdot 0.252 = -0.2268; \\
 \beta_{14}^+ &= (1 - p_{14})\xi_{14} = (1 - 0.9) \cdot 0.252 = 0.0252; \\
 \xi_{14} &= \beta_{14}^+ - \beta_{14}^- = 0.0252 - (-0.2268) = 0.252.
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Если вклады рассматривать в плане соотношения теоретического и прагматического аспектов, то полученные результаты следует трактовать следующим образом:

– для элемента 11:

$\beta_{PB,11}^{(+)} = 0.1848$ – реальный, осуществленный вклад элемента 11 с положительным инградиентом (за счет его достигнутого значения $p_{11} = 0.7$);

$\beta_{ПВ.11}^{(+)} = 0.0792$ – потенциально возможный, предельный вклад элемента 11 с положительным инградиентом (при увеличении его значения от текущего $p_{11} = 0.7$ до теоретически возможного предельного $p_{11} = 1$);

– для элемента 14:

$\beta_{РВ.14}^{(+)} = 0.2268$ – реальный, осуществленный вклад элемента 14 с положительным инградиентом (за счет его достигнутого значения $p_{14} = 0.9$);

$\beta_{ПВ.14}^{(+)} = 0.0252$ – потенциально возможный предельный вклад элемента 14 с положительным инградиентом (при увеличении его значения от текущего $p_{14} = 0.9$ до теоретически возможного предельного $p_{14} = 1$).

Таким образом, теоретические положения (8)-(10) подтверждены численным расчетом, реализованным ПК АСМ.

Здесь следует обратить внимание на следующее обстоятельство, уже отмеченное в конце раздела А. В качестве наиболее значимых мы выбрали элементы 11 и 14 (см. рис. 13). Однако по показателю положительного или, что то же, потенциально возможного вклада $\beta_{14}^{+} = 0.0252$ элемент 14 оказался далеко не самым достойным претендентом на выделение средств и мероприятий для его совершенствования в целях повышения эффективности боевой системы.

Действительно, по этому показателю гораздо большая роль принадлежит:

– элементу 12 «обнаружение обеспечивающей подсистемой средств нападения противника в ближней зоне, наличие данных ЦУ индивидуальным средствам обороны», ролевой показатель положительного или, что то же, потенциально возможного вклада $\beta_{12}^{+} = 0.0672$;

– элементу 13 «отражение средств нападения противника дежурными огневыми средствами самообороны при отсутствии данных обнаружения», ролевой показатель положительного или, что то же, потенциально возможного вклада $\beta_{13}^{+} = 0.126$;

– элементу 15 «отражение средств нападения противника коллективными огневыми средствами при отсутствии данных ЦУ средствам обороны в ближней зоне», ролевой показатель положительного или, что то же, потенциально возможного вклада $\beta_{15}^{+} = 0.084$.

Высокая значимость элемента 14 оказалась уже востребованной и реализованной с показателем $p_{14} = 0.9$, близким к предельному значению 1.0. Поэтому следует сделать вывод о целесообразности выделения средств на повышение эффективности выполнения задач элементами 13, 15 и 12 в указанной последовательности или с соответственно следующими приоритетами.

Такова прагматика ролевых характеристик значимости и вкладов элементов.

Теперь, когда в обзорном плане рассмотрены все основные аспекты технологии общего логико-вероятностного метода (ОЛВМ), реализованной в

программном комплексе автоматизированного структурного моделирования (ПК АСМ), в завершающей, четвертой публикации этой серии будут рассмотрены иллюстративные постановка и решение задачи оценивания показателей функционирования реальной разнородной системы, обладающей высокой структурной сложностью. Будут показаны стандартные приемы оптимизации характеристик системы, с учетом ограничений на ресурсы, для достижения экстремума целевой функции.

(Окончание следует)

Литература (см. также выпуск МРЭ №3 (21), сентябрь 2007)

1. АРБИТР, «Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем (ПК АСМ СЗМА), базовая версия 1.0». Автор Можяев А.С. Правообладатель ОАО «СПИК СЗМА». // Свидетельство об официальной регистрации № 2003611101. – М.: РОСПАТЕНТ РФ, 2003. Аттестационный паспорт программного средства № 222 от 21 февраля 2007 г. Совета по аттестации ПС НТЦ ЯРБ при Ростехнадзоре РФ.
2. Можяев А.С., Гладкова И.А. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем 2001 (ПК АСМ 2001). // Свидетельство об официальной регистрации № 2003611099. – М.: РОСПАТЕНТ РФ, 2003.
3. Можяев А.С. Автоматизированное структурно-логическое моделирование систем // Учебник. – СПб: ВМА им Кузнецова Н.Г, 2006. 590 с.
4. Свиринов С. К. Организация научного обеспечения развития вооружения ВМФ. – Военная мысль, № 8, 2006.
5. Современные проблемы управления силами ВМФ: Теория и практика. Состояние и перспективы / И. В. Соловьев, В.В. Геков, С. М. Доценко и др. Под ред. В. И. Куроедова. – СПб: Политехника, 2006. – 432 с.
6. Трухаев Р.И. Методы исследования процессов принятия решений в условиях неопределенности. - Л.: ВМОЛА, 1972. - 437 с.

Дополнительные сведения по применению и развитию комплекса АРБИТР, ОЛВМ и технологии АСМ можно получить на сайте ОАО «СПИК СЗМА»: <http://www.szma.com>.