

И. М. Якимов, А. П. Кирпичников, З. Т. Яхина

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РЕМОНТА АВТОМОБИЛЕЙ

Ключевые слова: автосервис, структурная модель, имитационная модель, математическая модель, регрессионный анализ, оптимизация, Statistica 8.0, Excel 2010.

Предлагается методика последовательного построения структурных и имитационных моделей в системе BPwin-Arena, построения математических моделей в виде совокупностей уравнений регрессии и оптимизации по ним работы автосервиса. Исследование проведено с помощью пакетов прикладных программ Statistica 8.0 и Excel 2010.

Keywords: auto repair, structural model, simulation model, mathematical model, regression analysis, optimization, Statistica 8.0, Excel 2010.

The technique of successive construction of structural and simulation models in the system BPwin-Arena, constructing mathematical models in the form of sets of regression equations and optimization on the basis of their auto repair is proposed. The study was conducted with the help of software packages Statistica 8.0 and Excel 2010.

На транспортных магистралях с интенсивным движением открывается всё больше автосервисов по обслуживанию автомобилей, и поэтому представляются вполне обоснованными работы по моделированию и оптимизации работы автосервисов. Выделим четыре вида производственных операций на автосервисах по обслуживанию автомобилей:

- шиномонтаж по замене или восстановлению резиновых покрышек, или колесных дисков;
- замена масла;
- ремонт и регулировка систем зажигания;
- ремонт и регулировка двигателя.

Цель публикуемой статьи: обеспечение эффективной работы автосервисов за счёт привлечения оптимального количества работников по проводимым операциям с учётом меняющихся условий по интенсивности запросов на обслуживание автомобилей.

Предлагается методика моделирования и оптимизации работы автосервисов, состоящая из следующих шести этапов.

1. Предварительный анализ объекта и постановка задач.

2. Разработка структурной и имитационной модели.

3. Построение стратегического плана проведения экспериментов и проведение имитационных экспериментов по стратегическому плану.

4. Корреляционный анализ.

5. Построение математической модели производственных процессов, состоящей из совокупности уравнений регрессии.

6. Вывод формул для вычисления оптимальных значений количества работников на выделенных операциях производственного процесса.

Подобные методики, которые использовались в других предметных областях, опубликованы в [1, 2].

Далее последовательно рассмотрим все выделенные этапы.

1. На первом этапе формируется перечень переменных, отобранных для исследования, который приведён в таблице 1. В перечне присутствуют

результативные показатели работы автосервиса – y_j ;

$j = 1, 14$, влияющие на них оптимизируемые факторы x_i ; $i = \overline{1, 4}$ и объективные факторы x_g ; $g = \overline{5, 9}$.

Таблица 1 – Перечень переменных, отобранных для исследования

№	Код	Наименование
1	2	3
1	y_1	Доход предприятия от обслуживания автотранспорта за вычетом расходов на заработную плату работников в рублях
2	y_2	Количество выполненных работ по шиномонтажу
3	y_3	Количество выполненных работ по замене масла
4	y_4	Количество выполненных работ по регулировке системы зажигания
5	y_5	Количество выполненных работ по ремонту и регулировке двигателя
6	y_6	Общее количество обслуженных автомобилей в месяц
7	y_7	Количество автомобилей, отказавшихся от обслуживания из-за большой очереди на обслуживание
8	y_8	Среднее время ремонта одного автомобиля в часах
9	y_9	Среднее время ожидания ремонта автомобиля в часах
10	y_{10}	Средняя длина очереди на обслуживание
11	y_{11}	Коэффициент занятости работников на операции по шиномонтажу
1	2	3
12	y_{12}	Коэффициент занятости работников на операции по замене масла
13	y_{13}	Коэффициент занятости работников по регулировке системы электропитания

Окончание табл. 1

1	2	3
14	y_{14}	Коэффициент занятости работников по ремонту и регулировке двигателя
15	x_1	Количество работников по шиномонтажу
16	x_2	Количество работников по замене масла
17	x_3	Количество специалистов по регулировке системы электропитания
18	x_4	Количество специалистов по ремонту и регулировке двигателя
19	x_5	Среднее время между поступлением автотранспорта на обслуживание
20	x_6	Вероятность, что требуется операция по шиномонтажу
21	x_7	Вероятность, что требуется замена масла
22	x_8	Вероятность, что требуется операция по регулировке системы питания топливом и системы электропитания
23	x_9	Вероятность, что требуется операция по ремонту и регулировке двигателя

$$y_1 = x_{10}y_2 + x_{11}y_3 + x_{12}y_4 + x_{13}y_5 - x_1x_{14} - x_2x_{15} - x_3x_{16} - x_4x_{17}. \quad (1)$$

В формуле (1) используются стоимостные показатели, значения которых не меняются в различных вариантах моделирования:

x_{10} – средняя стоимость операции по шиномонтажу автотранспорта, не меняется (распределена по треугольному симметричному закону от 500 до 2000 рублей);

x_{11} – средняя стоимость операции по замене масла, не меняется (распределена по треугольному симметричному закону от 100 до 200 рублей);

x_{12} – средняя стоимость операции по регулировке системы питания, не меняется (распределена по треугольному симметричному закону от 1000 до 2000 рублей);

x_{13} – средняя стоимость операции по диагностике, ремонту и регулировке двигателя, не меняется (распределена по треугольному симметричному закону от 1500 до 3000 рублей);

x_{14} – средняя месячная заработная плата шиномонтажника, не меняется и равна 15 тыс. руб. в месяц;

x_{15} – средняя месячная заработная плата работника по замене масла, не меняется и равна 10 тыс. руб. в месяц;

x_{16} – средняя месячная заработная плата специалиста по регулировке системы электропитания, не меняется и равна 20 тыс. руб. в месяц;

x_{17} – средняя месячная заработная плата специалиста по ремонту и регулировке двигателя, не меняется и равна 22 тыс. руб. в месяц.

Ставится задача разработки математической модели функционирования автосервиса, состоящей из совокупности уравнений регрессии, представляемых в виде следующей функции:

$$y_j = f_j(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9). \quad (2)$$

По математической модели (1) ставится задача оптимизации.

Наиболее целесообразно в качестве целевой функции принять доход от производственной деятельности

$$y_1 = (x_1, x_2, x_3, x_4) \rightarrow \max. \quad (3)$$

На остальные результативные показатели и оптимизируемые факторы x_i , $i = \overline{1,4}$ накладываются ограничения. Объективные факторы x_g ; $g = \overline{5,9}$ в процессе оптимизации не меняются.

Ставится задача вывода формул для вычисления оптимальных значений оптимизируемых показателей по значениям объективных факторов.

$$x_{i\text{opt}} = F_i(x_5, x_6, x_7, x_8, x_9); \quad (4)$$

2. На втором этапе разрабатываются структурная и имитационная модели функционирования автосервиса. Структурная схема модели, разработана в системе BPwin [3].

Диаграмма IDEF3 отражает процесс обслуживания клиентов в автосервисе в виде последовательности операций, потребность в которых возникает с задаваемыми вероятностями. Если же на выбранный тип работ имеется очередь более чем в 2 автомашины, то клиент отказывается от услуг.

С диаграммы IDEF3 производится переход в систему Arena [3]. Структурная модель автосервиса в системе Arena, приведённая на рис.1, является более детализированной, чем в системе BPwin, а для разработки имитационной модели требуется ещё и дополнительное введение количественных характеристик введённых элементов модели и видов статистических законов распределения этих характеристик (кроме вероятностей).

По результатам моделирования выдаётся структурная модель с указанием количества транзактов в элементах модели на время завершения моделирования. Принятое время моделирования – 6 месяцев. Кроме того, результаты моделирования выдаются в виде таблиц.

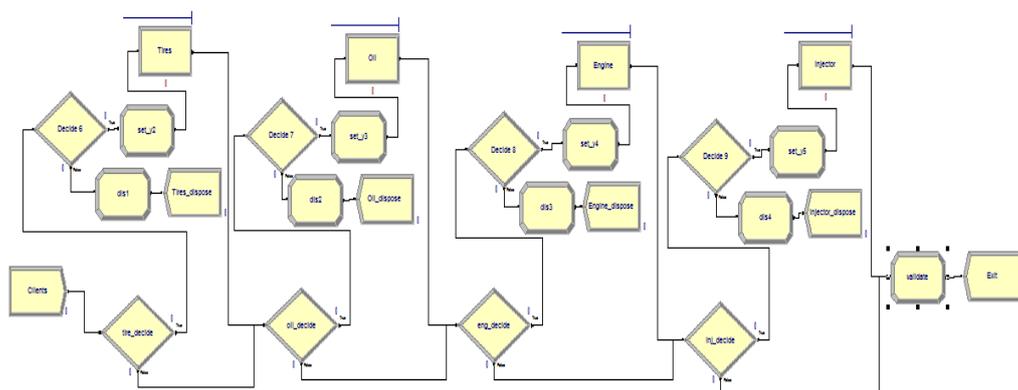


Рис. 1 – Структурная модель автосервиса в системе Arena

3. На третьем этапе разрабатывается стратегический план моделирования. В качестве ядра стратегического плана принят план дробного факторного эксперимента (ДФЭ). В качестве основных факторов взяты пять первых факторов: $x_1 - x_5$ и в качестве дополнительных четыре объективных фактора: $x_6 - x_9$. К вершинам пятимерного куба добавляется центральная точка и $2 \cdot k = 18$ звёздных точек.

Таким образом, общее количество вариантов стратегического плана будет:

$$N = 1 + 2^k + 2 \cdot k = 1 + 2^5 + 2 \cdot 9 = 51.$$

4. На четвёртом этапе вычисляются коэффициенты линейной корреляции по стандартной процедуре пакета прикладных программ (ППП) Statistica 8.0 [4]. Для наглядности представим результат вычислений для двух наиболее существенных ре

зультативных показателей в графическом виде на рис.2.

Наиболее сильно влияют на прибыль автосервиса такие факторы как время между прибытием «соседних» машин (величина обратная интенсивности прибытия машин) – x_5 , потребность в ремонте и регулировке двигателя – x_9 и количество работников по шиномонтажу – x_1 (рис.2). Похожие результаты получены и для количества обслуженных автомобилей (рис.2).

Величина корреляционной связи между результативными показателями эффективности и производственно-экономическими факторами варьируется в весьма широких пределах. Поэтому для сохранения всех переменных в уравнениях регрессии целесообразно использовать нелинейную регрессию.

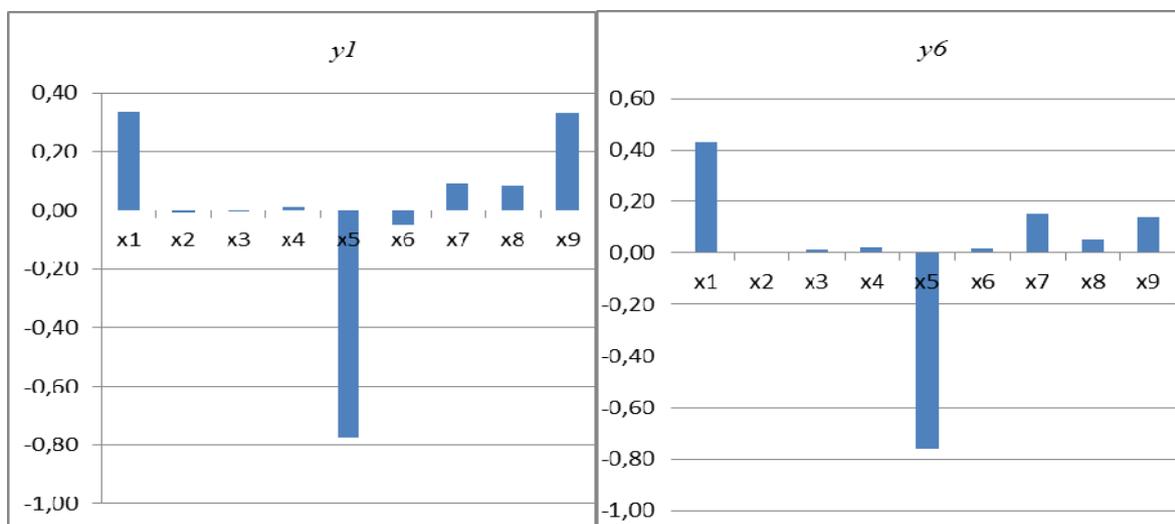


Рис. 2 – Диаграмма коэффициентов линейной корреляции между прибылью – y_1 и факторами и количеством обслуженных автомобилей – y_6 и факторами

5. На пятом этапе построена математическая модель производственных процессов, состоящая из совокупности уравнений регрессии. Так как все переменные, используемые для исследования являются случайными, количественными и непрерывными величинами, то в этом случае наиболее целесообразно применение регрессионного анализа, основанного на методе наименьших квадратов, который требует, чтобы сумма квадратов отклонений экспериментальных значений от вычисленных по аппроксимирующей зависимости была минимальной:

$$\sum_{i=1}^N (y_{ij} - f_j(x_1, x_2, \dots, x_m))^2 \rightarrow \min; \quad j = \overline{1, k}, \quad (5)$$

где y_{ij} – экспериментальное значение j -го результативного показателя эффективности в i -ом варианте стратегического плана; $f_j(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ – значение j -го результативного показателя эффективности в i -ом, варианте стратегического плана вычисленное по аппроксимирующей зависимости; N – количество вариантов стратегического плана; m – количество факторов; k – количество результативных показателей эффективности y_j .

Уравнения регрессии (5) получены с помощью стандартной процедуры пакета прикладных программ Statistica 8.0 [4] с выполнением следующих требований: чтобы отношение стандартной ошибки к среднему значению не превышало 0.1;

уровень значимости по коэффициенту множественной детерминации и критерию Фишера для уравнения регрессии и уровни значимости по критерию Стьюдента для коэффициентов уравнения регрессии не превышали 0.05.

Приведём полученные уравнения регрессии для двух результативных показателей по прибыли – y_1 и по количеству обслуженных автомобилей – y_6 :

$$y_1 = 5628301 + 3959117 * x_1 + 87233 * x_2 + 865012 * x_3 - 446503 * x_4 - 171973106 * x_5 + 29373907 * x_6 + 15102326 * x_7 + 11658751 * x_8 + 31765570 * x_9 - 316926 * x_1^2 - 44705 * x_2^2 - 151955 * x_3^2 + 91295 * x_4^2 + 264404457 * x_5^2 - 24095543 * x_6^2 - 12020543 * x_7^2 + 6517829 * x_8^2 - 8920543 * x_9^2. \quad (6)$$

$$y_6 = 6464 + 5470 * x_1 - 327 * x_2 + 692 * x_3 + 11 * x_4 - 190816 * x_5 + 33300 * x_6 + 22565 * x_7 + 7948 * x_8 + 17491 * x_9 - 418 * x_1^2 + 95 * x_2^2 - 98 * x_3^2 + 34 * x_4^2 + 287897 * x_5^2 - 22553 * x_6^2 - 12103 * x_7^2 + 6589 * x_8^2 - 9053 * x_9^2. \quad (7)$$

На рис.3 приведены значения коэффициентов эластичности, и на рис.4 удельных весов факторов для двух результативных показателей по прибыли – y_1 и по количеству обслуженных автомобилей – y_6 .

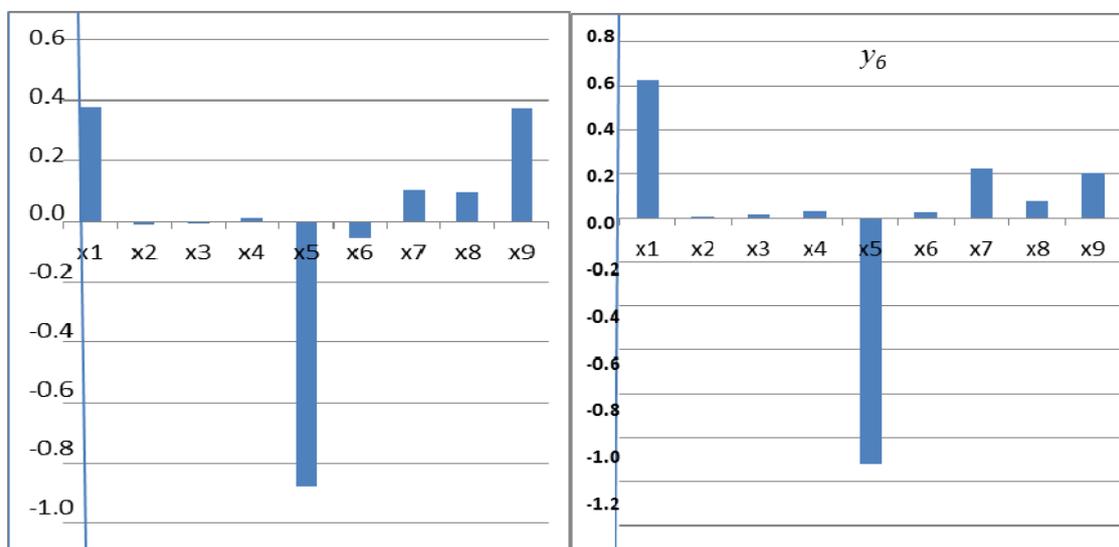


Рис. 3 – Коэффициенты эластичности факторов в y_1 и y_6

Отметим, что в качественном плане рис.3. подобен рис.2 и это не противоречит здравому смыслу. Имеющиеся некоторые различия в количественном плане сравнительно невелики.

Диаграммы, приведённые на рис. 2-4, могут использоваться для принятия решения по количеству сотрудников на операциях по обслуживанию автомобилей. По ним также можно определить и сте-

пень влияния объективных факторов на результативные показатели по прибыли – y_1 и по количеству обслуженных автомобилей – y_6 .

6. На шестом этапе производится вывод формул для вычисления оптимальных значений количества работников на операциях обслуживания автомобилей в автосервисе. Задача оптимизации решается методом касательных по стандартной процедуре пакета прикладных задач Excel 2010 [5].

Для всех вариантов стратегического плана находятся оптимальные значения количества работников на операциях автосервиса: x_1, x_2, x_3, x_4 , максимизирующие прибыль - y_1 при значениях объективных факторов x_5, x_6, x_7, x_8, x_9 , которые они принимают в вариантах стратегического плана. По полученным результатам оптимизации проведён регрессионный анализ по условиям, аналогичным пункту 5 и получены расчётные формулы для вычисления количества работников на четырёх выполняемых операциях автосервиса. Для примера работнём формулу для вычисления количества работников на наиболее часто выполняемой операции – по шиномонтажу:

$$x_{1opt} = 6,8642 - 10,5386 * x_5 + 2,6635 * x_6 + 0,4480 * x_7 - 7,4245 * x_8 + 0,0552 * x_9. \quad (8)$$

Рассмотрим три сценария работы автосервиса с минимальным, средним и максимальным потоком машин.

Автосервис с минимальным потоком клиентов промоделирован со следующими значениями факторов:

$$x_1 = 2; x_2 = 1; x_3 = 2; x_4 = 2; x_5 = 0,3; x_6 = 0,7; x_7 = 0,3; x_8 = 0,2; x_9 = 0,2.$$

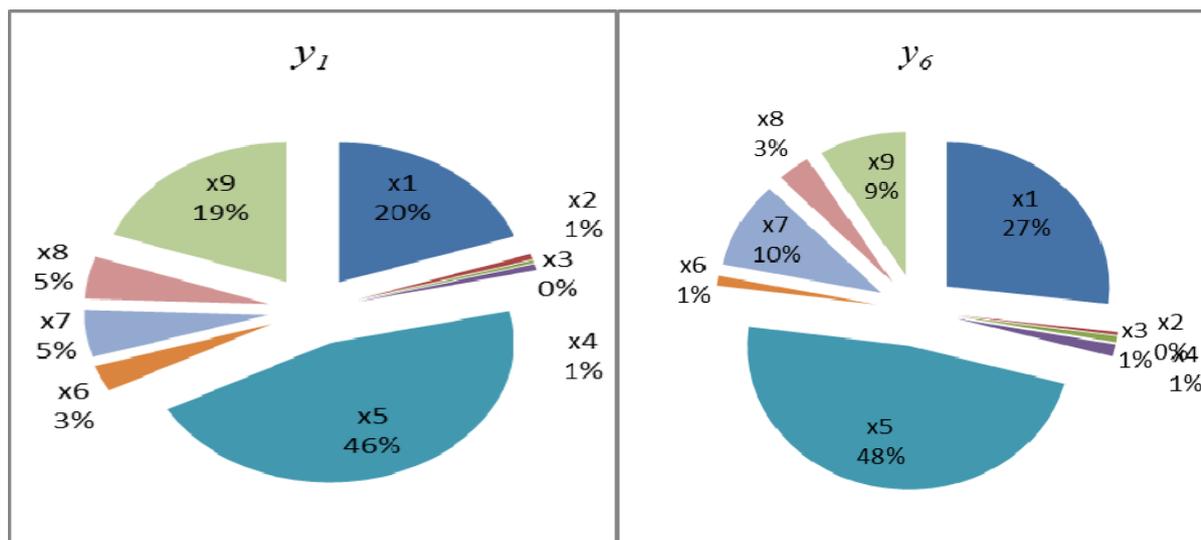


Рис. 4 – Удельные веса факторов в y_1 и y_6

Прибыль автосервиса для этого варианта за шесть месяцев составила: $y_1 = 9376633$ руб.

Теперь вычислим оптимальные значения количества работников по полученным формулам: $x_1 = 4; x_2 = 1; x_3 = 2; x_4 = 3$ и прибыль за шесть месяцев: $y_1 = 10186756$ руб.

Величина прибыли увеличилась на $(10186756 - 9376633) \cdot 100 / 9376633 = 8.64\%$.

Прибыль автосервиса для этого варианта за шесть месяцев составила: $y_1 = 14073262$ руб.

Теперь вычислим оптимальные значения количества работников по полученным формулам: $x_1 = 5; x_2 = 1; x_3 = 3; x_4 = 3$ и прибыль за шесть месяцев: $y_1 = 15226925$ = руб.

Величина прибыли увеличилась на $(15226925 - 14073262) \cdot 100 / 14073262 = 8.20\%$.

Автосервис с максимальным потоком клиентов промоделирован со следующими значениями факторов:

$$x_1 = 5; x_2 = 2; x_3 = 3; x_4 = 3; x_5 = 0,1; x_6 = 0,8; x_7 = 0,4; x_8 = 0,25; x_9 = 0,3.$$

Прибыль автосервиса для этого варианта за шесть месяцев составила: $y_1 = 26790411$ руб.

Теперь вычислим оптимальные значения количества работников по полученным формулам:

$x_1 = 6; x_2 = 1; x_3 = 3; x_4 = 4$ и прибыль за шесть месяцев: $y_1 = 31795410$ руб.

Величина прибыли увеличилась на $(31795410 - 26790411) \cdot 100 / 26790411 = 18.87\%$.

Заключение

Основными результатами работы являются: математическая модель работы автосервиса, которая позволяет вычислить 14 результативных показателей эффективности работы автосервиса по значениям объективных и оптимизируемых факторов и формулы для вычисления оптимальных значений оптимизируемых факторов. Три рассмотренных сценария показали, что при использовании полученных формул прибыль автосервиса повышается от 8.20% до 18.87%, что можно считать вполне приемлемым результатом.

Предложенная методика моделирования и оптимизации вполне пригодна для исследования дискретных производственных процессов и в других предметных областях.

Литература

1. И.М. Якимов, Р.З. Бетретдинов, *Моделирование и оптимизация процессов разработки систем программного обеспечения*, Вестник Казанского технологического университета. **15, 18**, 261 – 265 (2012).

2. И.М. Якимов, А.П. Кирпичников, *Имитационное моделирование производственных процессов изготовления и монтажа вентиляционного и сантехнического оборудования*, Вестник Казанского технологического университета. **16, 20**, 295 – 302 (2013).
3. И.М. Якимов, Г.В. Костюхина, В.В. Мокшин, Т.А. Шигаева, А.П. Кирпичников, *Обучение студентов*

структурному и имитационному моделированию в системе VRwin-Arena, Вестник Казанского технологического университета. **17, 6**, 287 – 292 (2014).

4. А.А. Халлафян, *Статистический анализ данных. STATISTICA 6.0*. Второе издание. М: Бином, 2009. 514 с.
5. Е.А. Курбатов, *Microsoft Office Excel 2010. Самоучитель*. Изд-во Вильямс, 2010. 416 с.

© **И. М. Якимов** – канд. техн. наук, проф. каф. АСОИУ. КНИТУ–КАИ им. А.Н. Туполева; **А. П. Кирпичников** – д-р физ.-мат. наук, проф., зав каф. ИСУИР КНИТУ, kirpichnikov@kstu.ru; **З. Т. Яхина** – канд. техн. наук, доцент каф. АСОИУ КНИТУ–КАИ им. А.Н. Туполева.

© **I. M. Yakimov** - PhD, KNRTU-KAI; **A. P Kirpichnikov** - Dr. Sci, Head of the Department of Intelligent Systems and Information Systems Control, KNRTU, kirpichnikov@kstu.ru; **Z. T. Yahina** - PhD, KNRTU-KAI.