

1	2	3	4
7	вращающаяся с угловой скоростью 3000 об/мин и гладкая с прилипанием потока	вращающаяся с угловой скоростью 3000 об/мин и грубая с высотой неровностей 1 мм	12359-20217=-7858 Па (антицентрирующий эффект)
8	вращающаяся с угловой скоростью 3000 об/мин и грубая с высотой неровностей 1 мм	вращающаяся с угловой скоростью 3000 об/мин и грубая с высотой неровностей 1 мм	14978-20621=-5643 Па (антицентрирующий эффект)

Выводы

Рис.6 и рис.7 показывают, что при скорости вращения ротора 3000 об/мин давление жидкости в балансировочной камере ротора варьируется в пределах от 0.08 до 1.16 атм относительно окружающей среды (относительные значения, на которые превосходит атмосферное давление 1 атм), а скорость жидкости – в пределах от 3 до 10 м/с. Течение протекает слоистым образом (однонаправлено и без перемешивания линий тока). Наконец, самое главное, гладкая внутренняя стенка обеспечивает свободное скольжение по ней жидкости со своей скоростью, которая переменна и отлична от скорости ротора, благодаря чему формируются центрирующие локальные давления. В то время как грубая внутренняя стенка вынуждает жидкость двигаться со скоростью ротора, практически выравнивает их скорости, вследствие чего образуются антицентрирующие локальные давления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 11-08-90434 и Государственного агентства по вопросам науки, инноваций и информатизации Украины, проект №Ф40.7/046.

Литература

1. Никитин Г.А. Щелевые и лабиринтные уплотнения гидроагрегатов / Никитин Г.А. М. : Машиностроение, 1982. – 109 с.
2. Марцинковский В.А. Бесконтактные уплотнения роторных машин / Марцинковский В.А. М. : Машиностроение, 1980. – 200 с.
3. Банах Л.Я., Никифоров А.Н., Ройзман В.П. Виброгашение колебаний и отсутствие критической скорости в многосекционных роторных системах / Л.Я. Банах, А.Н. Никифоров, В.П. Ройзман // Вибрации в технике и технологиях. – 2010. – № 1 (57). – С. 5–15.
4. Марцинковский В.А. Гидродинамика дросселирующих каналов : в 2-х книгах / Марцинковский В.А. Сумы : Изд-во Сумского госуниверситета, 2002. – 336 с.
5. Гусаров А.А. Автобалансирующие устройства прямого действия / Гусаров А.А. – М. : Наука, 2002. – 119 с.
6. Андрейченко К.П. Динамика поплавковых гироскопов и акселерометров / Андрейченко К.П. – М. : Машиностроение, 1987. – 128 с.
7. Blech, J. J., "On Isothermal Squeeze Films", Journal of Lubrication Technology, Vol.105, pp. 615–620 (1983).
8. ANSYS Release 11.0. Документация.

Надійшла 21.11.2011 р.

УДК 621.01: 620.179.1

Ю.Н. КОФАНОВ

Московский государственный институт электроники и математики

С.А. ПЕТРАЩУК, В.П. РОЙЗМАН

Хмельницкий национальный университет

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В ГЕРМОМОДУЛЕ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Предложен новый подход к физико-математическому моделированию распределения температурных полей в герметизированных узлах электронной аппаратуры на основе введения «эффективных параметров» системы. Эффективность и работоспособность разработанной математической модели, а также ее компьютерная реализация показаны на примере стандартного микромодуля, герметизированного компаундом.

Paper represents new approach to physical and mathematical modeling of thermal fields distribution in sealed electronic units on the base of introducing "effective parameters" of the system. Effectiveness of developed mathematical model and its computer implementing are demonstrated on the example of standard unit sealed by compound.

Ключевые слова: гермомодуль, температурное поле, электронный элемент, компаунд.

Современный процесс разработки новых компонентов и узлов инновационной электронной техники с применением новых композитных материалов с точки зрения повышения прочностной надежности и ресурса не возможен без применения математического моделирования тепломеханических процессов,

которые протекают в этих компонентах во время эксплуатации.

При разработке технологии монтажа и условий эксплуатации современных герметизированных электронных систем необходимо учитывать влияние на прочность как физико-механических, так и температурных факторов.

В работе [1] получены и исследованы физико-математические модели для расчета радиальных и тангенциальных напряжений в материале электронного элемента

$$\sigma_{r_1} = \frac{E_1}{1-\mu_1} \left[-\frac{1}{r^2} \int_{R_1}^r \alpha_1 \Delta t_1 r dr + \frac{r^2 - R_1^2}{r^2 (R_2^2 - R_1^2)} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_1 \Delta t_1 r dr \right] + \frac{P_1 R_1^2 - P R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{(P_1 - P) R_1^2 R_2^2}{r^2 (R_2^2 - R_1^2)}, \quad (1)$$

$$\sigma_{t_1} = \frac{E_1}{1-\mu_1} \left[\frac{1}{r^2} \int_{R_1}^r \alpha_1 \Delta t_1 r dr + \frac{r^2 - R_1^2}{r^2 (R_2^2 - R_1^2)} \int_{R_1}^{R_2} \alpha_1 \Delta t_1 r dr - \alpha_1 \Delta t_1 \right] + \frac{P_1 R_1^2 - P R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{(P_1 - P) R_1^2 R_2^2}{r^2 (R_2^2 - R_1^2)}, \quad (2)$$

и в материале выделенного компаундного цилиндра

$$\sigma_{r_2} = \frac{E_2}{1-\mu_2} \left[-\frac{1}{r^2} \int_{R_2}^r \alpha_2 \Delta t_2 r dr + \frac{R^2 - R_2^2}{r^2 (R_3^2 - R_2^2)} \int_{R_2}^{R_3} \alpha_2 \Delta t_2 r dr \right] + \frac{P R_2^2 - P_2 R_3^2}{R_3^2 - R_2^2} - \frac{(P - P_2) R_2^2 R_3^2}{r^2 (R_3^2 - R_2^2)}, \quad (3)$$

$$\sigma_{t_2} = \frac{E_2}{1-\mu_2} \left[\frac{1}{r^2} \int_{R_2}^r \alpha_2 \Delta t_2 r dr + \frac{R^2 - R_2^2}{r^2 (R_3^2 - R_2^2)} \int_{R_2}^{R_3} \alpha_2 \Delta t_2 r dr - \alpha_2 \Delta t_2 \right] + \frac{P R_2^2 - P_2 R_3^2}{R_3^2 - R_2^2} + \frac{(P - P_2) R_2^2 R_3^2}{r^2 (R_3^2 - R_2^2)}, \quad (4)$$

где μ_1, μ_2 ; E_1, E_2 ; α_1, α_2 – коэффициенты Пуассона, модули упругости первого рода, коэффициенты линейного теплового расширения материалов электронного элемента и компаунда соответственно; R_1, R_2 – внутренний и внешний радиусы электронного элемента; R_2, R_3 – внутренний и внешний радиусы выделенного компаундного цилиндра; r, R – сменные радиусы: $R_1 \leq r \leq R_2, R_2 \leq R \leq R_3$; $\int_{R_1}^r \alpha_1 \cdot \Delta t_1 \cdot r dr$,

$\int_{R_1}^{R_2} \alpha_1 \cdot \Delta t_1 \cdot r dr$, $\int_{R_2}^r \alpha_2 \cdot \Delta t_2 \cdot r dr$, $\int_{R_2}^{R_3} \alpha_2 \cdot \Delta t_2 \cdot r dr$ – температурные интегралы; P – контактное давление:

$$P = \frac{2E_1 E_2 \left[(1 + \mu_1) \int_{R_1}^{R_2} \alpha_1 \Delta t_1 r dr - (1 + \mu_2) \int_{R_2}^{R_3} \alpha_2 \Delta t_2 r dr \right]}{E_2 (R_3^2 - R_2^2) \left[(1 + \mu_1) R_1^2 + (1 - \mu_1) R_2^2 \right] + E_1 (R_2^2 - R_1^2) \left[(1 + \mu_2) R_3^2 + (1 - \mu_2) R_2^2 \right]}. \quad (5)$$

Перепады температур $\Delta t_1, \Delta t_2$, которые входят в формулы температурных интегралов (и напряжений σ_{t_1} и σ_{t_2}), определяются как $\Delta t_1 = t_{э\ell}(r, \tau) - t_0$, $\Delta t_2 = t_{ком}(r, \tau) - t_0$, где $t(r, \tau)$ – температура цилиндрической поверхности радиуса r в момент времени τ , который отсчитывается с момента переноса изделия из среды с постоянной температуры t_0 в среду с температурой t_1 . В расчетах t_0 принимается за начальную температуру тела.

Для расчета по формулам 1–5 решалась нестационарная задача теплопроводности в компаундированном гермомодуле, т.е. установление закона распределения температуры в объеме гермомодуля от момента переноса его из максимально положительной температуры t_0 в максимальную отрицательную t_1 (в нашем случае из $+70^\circ\text{C}$ в -60°C) и до момента, когда все изделие приобретет температуру окружающей среды (максимальную отрицательную).

Для решения этой задачи предложена математическая модель расчета температурных полей в объеме гермомодуля на основе введения “эффективных параметров” [2], учитывающих неоднородность материала гермомодуля, так как гермомодуль является сложной структурой и состоит из множества разнородных компонентов: различных электронных элементов и компаунда.

Эффективные параметры представляют собой усредненные физико-механические характеристики всех материалов, составляющих гермомодуль. Так, коэффициент температуропроводности всего гермомодуля, как эффективный параметр, определяется по формуле:

$$\chi = \sum_{i=1}^n V_i \chi_i,$$

где $V_i = \frac{V_i}{V}$, ($i = 1, 2, \dots, n$), V_i – объем, занятый i -м компонентом гермомодуля (м^3), V – объем всего гермомодуля, χ_i – коэффициент температуропроводности соответствующего компонента ($\text{м}^2/\text{ч}$).

Использование эффективного параметра χ позволяет рассматривать материал гермомодуля, как однородный, состоящий из смеси материала компаунда и материалов электронных элементов.

Для компаундированного гермомодуля в виде прямоугольного параллелепипеда с началом координат в точке пересечения диагоналей и координатных осей вдоль его главных осей инерции, и размерами $-a \leq x \leq a$, $-b \leq y \leq b$, $-c \leq z \leq c$ (рис. 1) решение задачи теплопроводности имеет вид:

$$t = (t_0 - t_1) \cdot \Phi_1 \left(\frac{a - |x|}{2\sqrt{\chi \cdot \tau}} \right) \cdot \Phi_2 \left(\frac{b - |y|}{2\sqrt{\chi \cdot \tau}} \right) \cdot \Phi_3 \left(\frac{c - |z|}{2\sqrt{\chi \cdot \tau}} \right) + t_1, (6)$$

где t_0 – начальная температура тела, t_1 – температура окружающей среды, Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 – функции Лапласа [3], τ – время.

Полученный закон распределения температуры позволяет определять температуры в различные моменты времени и в любой точке твердого тела. Более того, закон дает возможность оценить время полного остывания (нагрева) гермомодуля.

Для прикладных расчетов температурных полей в гермомодулях была создана компьютерная программа на основе математического пакета MATHCAD. Программа позволяет получать двух- и трехмерные графики изотерм, которые изображают температурное поле в выбранном сечении гермомодуля в любой момент времени, и оценивать время полного остывания гермомодуля.

Для гермомодуля ЖУ5.760.001 с размерами (мм) $21 \times 14 \times 8$ был проведен расчет температурного поля, возникающего при термоударе в диапазоне температур от $t_0 = +70$ °C до $t_1 = -60$ °C.

Расчет производился при парциальном объеме компаунда (марки ЭЗК-25) $V_1 = 1576$ мм³ и объеме электронных элементов, равном $V_2 = 776$ мм³. Физико-механические характеристики материалов компаунда и керамики резисторов приведены в табл. 1.

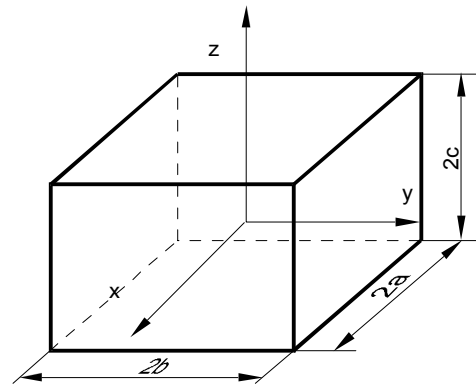


Рис. 1. Гермомодуль, представленный в виде однородного прямоугольного параллелепипеда

Таблица 1

Физико-механические характеристики материалов компаундированного гермомодуля

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Удельная теплоемкость C , Вт·час/кг·град	Коэффициент теплопроводности K , Вт/(м·град)	Коэффициент температуропроводности χ , мм ² /с
Компаунд ЭЗК-25	1600	0,395	0,33	0,414
Керамика резисторов	2000	0,253	0,837	0,18

На рис. 2 показано температурное распределение в горизонтальном сечении плоскостью $z = 0$ (рис. 1). Изотермы построены в различные моменты времени вплоть до полного остывания.

На рис. 3 представлен график изменения температуры с течением времени в центре гермомодуля. В результате расчета температуры на заданном отрезке времени получено, что практически полное остывание гермомодуля происходит через 1366 с (22,7 мин).

Для экспериментального оценивания времени полного остывания гермомодуль ЖУ5.760.001 препарировался микротермопарой ХК₆₈ до его герметизации компаундом марки ЭЗК-25. После полимеризации компаунда модуль подвергали серии термоударов (термоциклированию) в диапазоне температур от +70 °C до -60 °C. Показания микротермопары регистрировались на ленте светолучевого осциллографа Н071.4М. В результате проведенных 10 термоциклов было установлено среднее время остывания гермомодуля – 1160 с (19,33 мин), которое мало отличается от рассчитанного. Причем в производственном процессе при технологической тренировке гермомодулей термоударами, которая проводится в порядке повышения их надежности, время остывания (нагрева) гермомодуля составляет 1 час: сначала изделие помещают в камеру тепла, а затем переносят в камеру холода (время переноса из одной камеры в другую ограничивается секундами), выдержка изделий в камерах проводится до достижения теплового равновесия (1 час). Общее количество термоциклов, как правило, равно трем. Считается, что в результате такой тренировки выявляются скрытые конструктивные дефекты и отбраковываются потенциально ненадежные изделия.

Таким образом, моделируя и рассчитывая температурное поле гермомодуля, изменяющееся во времени, можно оптимизировать технологическое время проведения термоудара при производстве гермомодулей. Так, в приведенном выше случае вместо часовой выдержки гермомодулей при +70 °C и -60 °C модули можно выдерживать не более 23–24 мин.

После того, как решена задача теплопроводности при термоударе в объеме целого гермомодуля, материал которого рассматривался, как композитный, и не учитывалась форма его отдельных элементов, целесообразно детальнее рассмотреть распределение температуры вблизи рассчитываемого электронного

элемента гермомодуля и окружающего его слоя компаунда. Для этого поставлена и решена задача неустановившегося радиального распределения температуры в электронном элементе и компаунде, результаты которой будут приведены в последующих публикациях.

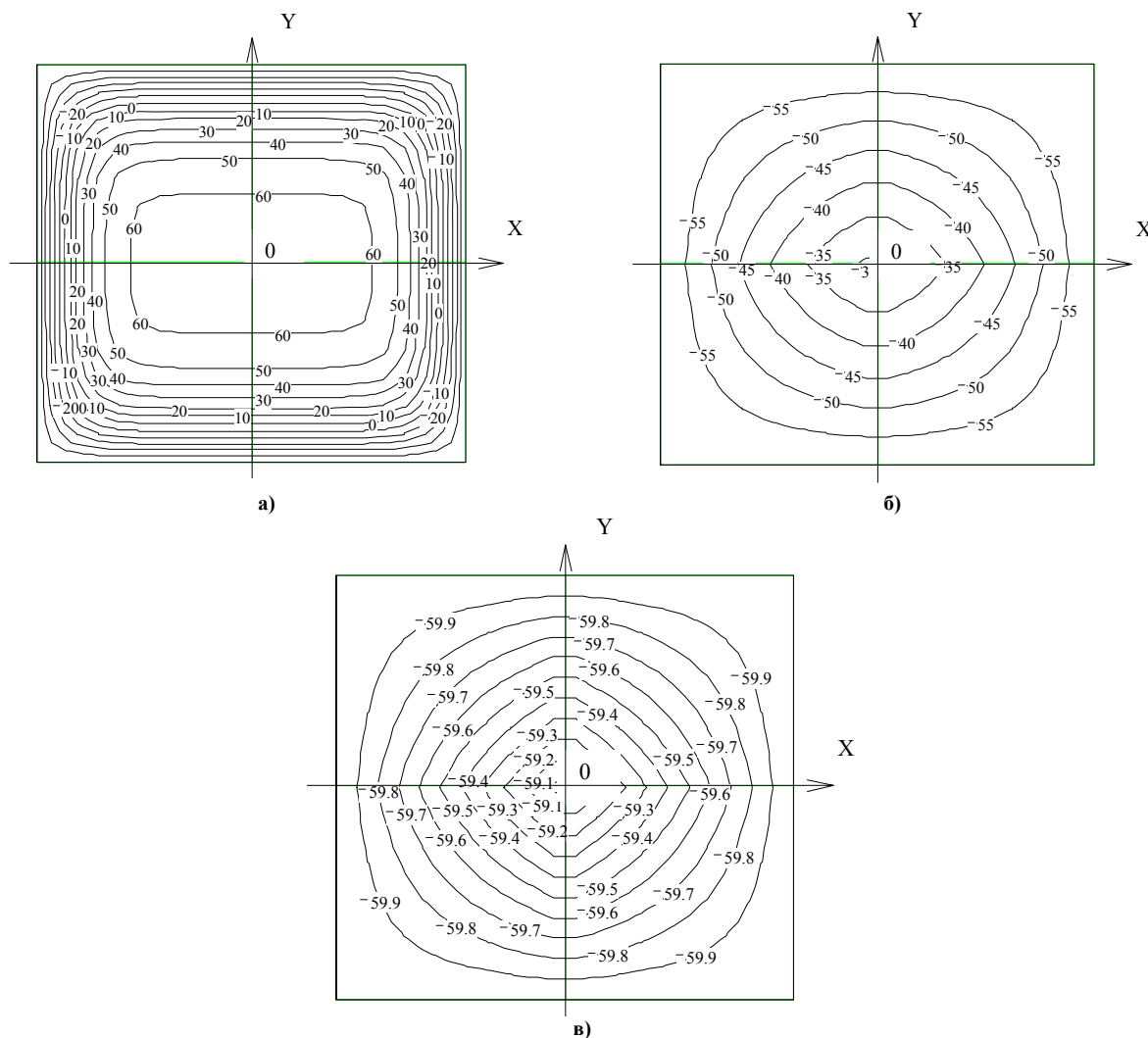


Рис. 2. Изотермы для горизонтального сечения гермомодуля в моменты времени $\tau=8$ с (а), $\tau=200$ с (б), $\tau=1300$ с (в)

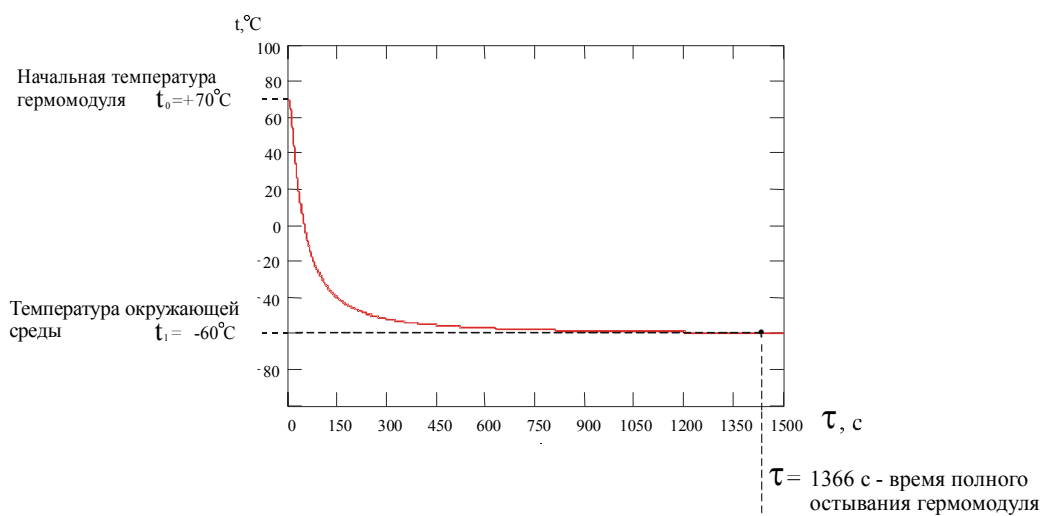


Рис. 3. Изменение температуры с течением времени в центре гермомодуля

Выводы. Предложена математическая модель расчета температурных полей в объеме гермомодуля на основе введения “эффективных параметров”, представляющих собой усредненные физико-механические характеристики всех материалов, составляющих гермомодуль. Модель дает возможность определять температуры в различные моменты времени и в любых точках твердого тела, а также определять время остывания (нагрева) гермомодуля, что позволяет оптимизировать технологическое время проведения

термоудара при производстве гермомодулей.

Литература

1. Ройзман В.П. Розрахунок на міцність при термоударах пасивних електронних компонентів, герметизованих компаундом / В.П. Ройзман, С.А. Петрашук // Збірник праць V міжнародної наукової конференції “Сучасні досягнення в науці та освіті”. – Хмельницький національний університет. – 2011. – Т. 1. – С. 78–81.
2. Зельдович Я.Б. Журнал физ. химии / Зельдович Я.Б. – 1939. – Т. 13. – С. 163–167.
3. Карлсруоу Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карлсруоу, Д. Егер. – М. : Наука, 1964. – 488 с.

Надійшла 8.10.2011 р.

УДК621.01

Н.Э. ТЕРНЮК, В.В. ФЕДЧЕНКО, Н.Н. ГЛАДКАЯ, А.М. КРАСНОШТАН

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрено применение развивающего подхода к прогнозированию структурных характеристик и исследованию закономерностей развития транспортных систем. Установлены закономерности изменения сферы применения, предназначения, функций, эффектов, процессов, структур и параметров при развитии транспортных систем. Получено множество структурно различных вариантов систем, направленное изменение элементов которых позволяет прогнозировать структурные характеристики, соответствующие новым видам и типам техники.

Розглянуто застосування розвиваючого підходу до прогнозування структурних характеристик і дослідження закономірностей розвитку транспортних систем. Встановлені закономірності зміни сфери вживання, призначення, функцій, ефектів, процесів, структур і параметрів при розвитку транспортних систем. Отримана множина структурно різноманітних варіантів систем, направлена зміна елементів яких дозволяє прогнозувати структурні характеристики, відповідні новим видам і типам техніки.

Application of the developing approach to forecasting structural characteristics and research of laws of development of transport systems is considered. Laws of change of sphere of application, applicability, functions, effects, processes, structures and parameters are established at development of transport systems. The set structurally different variants of the systems is received, directed which change of elements allows to predict the structural characteristics corresponding new kinds and types of technics.

Вступление

Транспортные системы играют важную роль в жизни общества. Они содержат около 90% установленных энерго мощностей, существенно влияют на экономику каждой страны. В связи с этим, развитию транспортных систем уделяется большое внимание.

Для решения многих задач, связанных с созданием, применением и преобразованием транспортных систем, необходимо прогнозировать их основные структурные характеристики (по сфере применения, назначению, функциям, применяемым эффектам, процессам и др.).

Постановка задачи

Известны многие методы прогнозирования характеристик технических и антропо-технических систем [1, 2, 3 и др.]. К наиболее известным относятся метод экстраполяции линейными или нелинейными зависимостями [1, 2] и метод экспертных оценок [3]. Существенным недостатком экстраполяционных методов является невозможность их применения для структурного прогнозирования, а также для прогнозирования на участках развития, соответствующих точкам бифуркации. В то же время, инновационное развитие, особенно предельно скоростное, предусматривает структурные переходы и работу в диапазонах с этими точками.

Методы экспертных оценок в значительной мере зависят от состава экспертов, характера поставленных задач, организации процедуры прогноза и до сих пор не формализованы, а значит, неприемлемы для работы в составе автоматизированных систем интеллектуальной поддержки принимаемых решений, системах автоматизированного проектирования и т.д.

Целью настоящей статьи является изложение относительно нового – развивающего – подхода к прогнозированию структурных характеристик и исследованию общих закономерностей развития транспортных систем.

Результаты исследования

Основная идея развивающего подхода состоит в структурном изменении системы от поколения к поколению на основе закономерностей изменения систем при их эволюционном развитии.

С применением этого подхода общая задача прогнозирования характеристик транспортных систем в формализованном виде может быть представлена следующим образом.