

УДК 621.396.677.3

СПОСОБ НАСТРОЙКИ АДАПТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЯ ГЛОНАСС

В. Н. Тяпкин^{1,2}, Д. Д. Дмитриев¹, А. В. Соколовский³, А. С. Першин³¹Сибирский федеральный университет

Россия, 660074, Красноярск, ул. Киренского, 26. E-mail: tyapkin58@mail.ru

²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева

Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

³ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева

Россия, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина, 52. E-mail: pershin802@mail.ru

Рассмотрена адаптивная фазированная антенная решетка с исходным равномерным амплитудным распределением и определена эффективность алгоритма ее адаптации с применением базиса в виде частичного экспоненциального ряда Фурье по сравнению с оптимальным алгоритмом.

Ключевые слова: адаптивная фазированная антенная решетка, парциальная диаграмма направленности, равномерное амплитудное распределение.

TECHNIQUE FOR TUNING OF ADAPTIVE PHASED ANTENNA ARRAY OF NAVIGATION EQUIPMENT OF GLONASS CUSTOMER

V. N. Tyapkin^{1,2}, D. D. Dmitriev¹, A. V. Sokolovskiy³, A. S. Pershin³¹Siberian Federal University

26 Kirenskiy street, Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: tyapkin58@mail.ru

²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev

31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia

³JSC "Academician F. M. Reshetnev "Information Satellite Systems"

52, Lenin street, Zhelenogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia. E-mail: pershin802@mail.ru

The authors consider an adaptive phased antenna array with original equal amplitude distribution and appreciate the efficiency of the algorithm of its adaptation with the use of the basis in the form of partial basis of exponential Fourier series in comparison with the optimal algorithm.

Keywords: adaptive phased antenna array, partial directional pattern, equal amplitude distribution.

В современных условиях все большее значение приобретают средства спутниковой радионавигации (СРНС) как высокоточное навигационное средство глобальной доступности. Широкое применение СРНС находят для решения задач временной синхронизации, определения географических координат и пространственной ориентации не только в стандартной точности, гарантированной СРНС, но в таких приложениях, как геодезия, обеспечение посадки воздушных судов, измерение деформаций протяженных объектов. Подобные приложения спутниковой радионавигации требуют определения навигационных параметров с погрешностью не более единиц сантиметров [1].

В целях увеличения точности СРНС ГЛОНАСС происходит развертывание сети беззапросных измерительных станций (БИС). При этом БИС должна обеспечивать непрерывное высокоточное измерение радионавигационных параметров в условиях существования естественных и искусственных радиопомех.

Для повышения помехоустойчивости используется комплекс мер: пространственная селекция на основе применения как адаптивных фазированных антенных решеток (АФАР), так и антенных компенсаторов с помех; фильтрация в частотной и/или во временной областях; поляризационная селекция. И наиболее

бурно развивающимся направлением борьбы с активными помехами является пространственная селекция с использованием АФАР. При этом как коэффициент подавления помехи, так и точность определения радионавигационных параметров в процессе адаптации во многом зависят от исходного амплитудного распределения АФАР и применяемого алгоритма адаптации [2].

Рассмотрим формирование диаграммы направленности (ДН) в N -элементной линейной эквидистантной АФАР при исходном равномерном амплитудном распределении при воздействии помехового сигнала.

Результирующий отклик АФАР f_p в стационарном режиме в направлении u -го мешающего сигнала имеет вид

$$Y_{\Sigma} = x_u \sum_i a_i e^{ji\varphi_u} = x_u \sum \left[1 - \sum_{r=1}^R a_r e^{-jri\varphi_o} \right] \cdot e^{ji\varphi_u} =$$

$$= x_u f_o(\varphi_u) - x_u \sum_{r=1}^R a_r f_r(\varphi_u),$$

или

$$f_p(\varphi_u) = \frac{Y_{\Sigma}(\varphi_u)}{x_u} = f_o(\varphi_u) - \sum_{r=1}^R a_r f_r(\varphi_u), \quad (1)$$

где $f_0(\varphi_u)$ – исходное амплитудное распределение; $f_r(\varphi_u)$ – амплитудное распределение парциальных ДН.

Таким образом, результирующая ДН $f_p(\varphi_u)$ представляет собой суперпозицию исходной ДН, соответствующей исходному равномерному амплитудному распределению:

$$f_o(\varphi_u) = \sum_i e^{ji\varphi_u}, \quad (2)$$

и R парциальных ДН $f_r(\varphi_u)$ с весами a_r :

$$f_r(\varphi_u) = \sum_i e^{ji(\varphi_u - r\varphi_0)} = f_0(\varphi_u - r\varphi_0). \quad (3)$$

В тех местах, где исходная ДН $f_0(\varphi_u)$ имеет нули, парциальные ДН $f_r(\varphi)$ имеют максимумы (рис. 1), а в точке $\varphi = 0$ все парциальные ДН равны нулю, т. е. парциальные ДН являются ортогональными по отношению к исходной. Поэтому полезный сигнал, приходящий с главного направления, при адаптации не подавляется. Из уравнения (1) следует, что значение результирующей ДН в главном направлении равно значению исходной ДН в этом направлении: $f_p(0) = f_0(0)$.

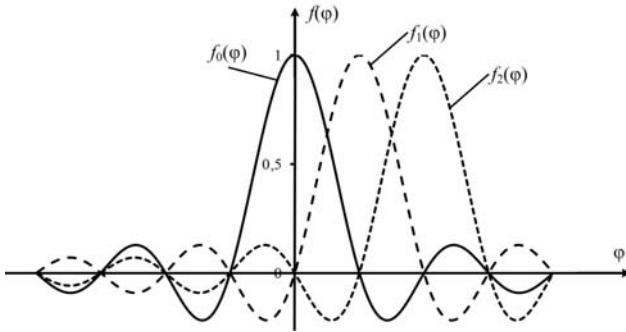


Рис. 1. Исходная и парциальные ДН

В подавлении помехи, приходящей по центру первого бокового лепестка $\varphi_u = 1,5 \cdot \varphi_0$ (см. рис. 1), будут, в основном, участвовать парциальные ДН с номерами $r = 1$ и $r = 2$. Остальные парциальные ДН в подавлении этой помехи могут участвовать только своими боковыми лепестками. Следовательно, их вклад в подавление малоэффективен, но именно эти парциальные ДН вызывают возмущения ДН в области остальных боковых лепестков. Если же, например, в подавлении помехи в центре первого бокового лепестка будут участвовать только две первых парциальных ДН, то главным образом искажен будет участок ДН от центра до третьего бокового лепестка, поскольку на этот участок воздействуют главные лепестки первой и второй парциальных ДН. В остальных боковых лепестках следует ожидать существенно меньших возмущений, поскольку боковые лепестки первой и второй парциальных ДН частично компенсируют друг друга в этих областях.

Исходя из вышеизложенного, важно оценить эффективность рассматриваемого алгоритма в случае представления амплитудного распределения частичным рядом Фурье, когда $R < N - 1$.

Пусть $R = 1$, и в целях адаптации используется r -й член разложения. Степень подавления помехи Q в этом случае рассчитываем по формуле

$$Q = \frac{1}{1 + \frac{Nx_u^2}{P_{\text{ш}}} f_{Hr}^2(\varphi_u)}, \quad (4)$$

где $P_{\text{ш}}$ – мощность собственного шума в канале решетки; $f_{Hr}(\varphi_u) = \frac{1}{N} \sum_i e^{ji(\varphi_u - r\varphi_0)}$.

Единственный коэффициент разложения в этом случае может быть выполнен по следующей формуле (без учета влияния собственных шумов):

$$a_r = \frac{f_{H0}(\varphi_u)}{f_{Hr}(\varphi_u)}. \quad (5)$$

Собственный выходной шум в решетке для этой ситуации определяется соотношением

$$P_{\Sigma\text{ш}} = NP_{\text{ш}} \left[1 + \frac{f_{H0}^2(\varphi_u)}{f_{Hr}^2(\varphi_u)} \right], \quad (6)$$

$$\frac{P_{\Sigma\text{ш}}}{NP_{\text{ш}}} = 1 + \frac{f_{H0}^2(\varphi_u)}{f_{Hr}^2(\varphi_u)}. \quad (7)$$

Если в целях подавления помехи используются две парциальных ДН, соответствующих r_1 и r_2 членам разложения, показатели качества адаптации могут быть рассчитаны по выражениям:

$$Q_{r_1 r_2} = \frac{1}{1 + \frac{Nx_u^2}{P_{\text{ш}}} [f_{Hr_1}^2(\varphi_u) + f_{Hr_2}^2(\varphi_u)]}, \quad (8)$$

$$\frac{P_{\Sigma\text{ш}}}{NP_{\text{ш}}} = 1 + \frac{f_{H0}^2(\varphi_u)}{f_{Hr_1}^2(\varphi_u) + f_{Hr_2}^2(\varphi_u)}. \quad (9)$$

Сравнивая выражения для степени подавления помехи Q , определяемые соотношениями (4) и (8), с $Q_{\text{опт}}$ для оптимального алгоритма [3], найдем, что при $N \gg 1$ они отличаются отклонением от 1 множителем:

$$D_{rH}^2 = \begin{cases} f_{Hr}^2(\varphi_u), & R = 1, \\ f_{Hr_1}^2(\varphi_u) + f_{Hr_2}^2(\varphi_u), & R = 2. \end{cases} \quad (10)$$

Направления прихода помех φ_u на рис. 2, 3 соответствуют центрам трех первых боковых лепестков $1,5 \cdot \varphi_0, 2,5 \cdot \varphi_0, 3,5 \cdot \varphi_0$.

Проанализировав графики, сформулируем следующие выводы:

1. Приведенный алгоритм позволяет осуществлять адаптивное подавление помех в N -элементной линейной антенной решетке, используя только одну следящую систему (амплитудное распределение представляется рядом Фурье с одним ненулевым членом разложения). Степень подавления помехи в случае удачного выбора номера члена разложения относительно оптимального значения можно определить, исходя из данных соображений. В случае, когда $x_u^2 \gg P_{\text{ш}}$ и $N \gg 1$:

$$\frac{Q_{\text{опт}}}{Q} = D_{rH}^2(\varphi_u). \quad (11)$$

При $\varphi_u = 1,5 \cdot \varphi_0$ и $r = 1$ или $r = 2$, $D_{rH}^2 = 0,4$, т. е. степень подавления одиночной помехи в случае удачного выбора номера члена разложения амплитудного распределения ориентировочно на 60 % ниже максимально возможной при использовании оптимального алгоритма. Используя две соседние парциальные ДН для снижения бокового лепестка исходной ДН, можно существенно повысить степень подавления помехи. Если, например, помеха проходит по центру первого бокового лепестка $\varphi_u = 1,5 \cdot \varphi_0$, использование первых двух членов разложения с номерами 1 и 2 позволяет достичь степени подавления помехи ориентировочно на 20 % меньше, чем при использовании оптимального алгоритма или синтезированного алгоритма с $N - 1$ членами разложения.

2. Выходной шум минимален при использовании всех членов разложения, т. е. при $R = N - 1$. Если применять для подавления помехи только две парциальные ДН, которые накрывают прикрываемый боковой лепесток исходной ДН своими главными лепестками, то выходной шум увеличивается, по сравнению с NP_{III} , незначительно (не более чем на 5 %).

Результаты моделирования адаптивных алгоритмов приведены на рис. 4–9. Начальные условия: количество элементов в решетке $N = 8$, отношение помеха/шум равно 30 дБ, углы прихода помех $\varphi_{u1} = 1,5 \cdot \varphi_0$ (центр первого бокового лепестка) и $\varphi_{u2} = 2,5 \cdot \varphi_0$ (центр второго бокового лепестка). Штриховой линией изображена исходная ДН, сплошной – результирующая ДН после завершения процесса адаптации.

Для оценки флюктуаций ДН при нестационарной пространственной фильтрации активных помех в каждом периоде повторения по результатам моделирования были построены графики величины межпериодных флюктуаций ДН:

$$\gamma(\varphi) = 20 \lg \frac{|f(\varphi, t + T_{\text{адап}})|}{|f(\varphi, t)|}, \quad (12)$$

где $f(\varphi, t)$, $f(\varphi, t + T_{\text{адап}})$ – значения результирующей ДН в соседних периодах адаптации, которые опреде-

ляются динамикой помеховой обстановки. Алгоритму, в котором для подавления двух помех использовались два первых парциала ($R = 2, r_1 = 1, r_2 = 2$) соответствует рис. 4. Видно, что в направлении источников помех сформировались узкие провалы. Выигрыш в отношении сигнал / шум + помеха (ОСШП) составил 18,1 дБ. Коэффициент чувствительности к ошибкам АФАР незначительно увеличивается: от $S_0 = 0,125$ до $S = 0,149$. Изменение величины флюктуаций ДН (рис. 5) показывает, что в результате адаптации все боковые лепестки ДН подвергаются возмущениям.

В области $3 \dots N - 2$ боковых лепестков изменение величины межпериодных флюктуаций имеет монотонный характер, и эта величина увеличивается от –12 до 0 дБ. В области главного лепестка величина флюктуаций плавно изменяется от 0 до 36 дБ. Заметим, что при подавлении помех не использовалась третья парциальная ДН, которая бы подавляла помехи во втором боковом лепестке исходной ДН своим главным лепестком.

Результаты выполнения алгоритма при $R = 3$ ($r_1 = 1, r_2 = 2, r_3 = 3$) приведены на рис. 6. По сравнению с предыдущим алгоритмом картина существенно изменяется.

Первый боковой лепесток сильно сужается, его уровень снижается с –13,5 до –52 дБ. В направлениях помех сформировались узкие провалы. Выигрыш в ОСШП составил 18,4 дБ. Коэффициент чувствительности к ошибкам АФР незначительно увеличивается от $S_0 = 0,125$ до $S = 0,137$. Изменение величины межпериодных флюктуаций ДН (рис. 7) показывает, что сильным возмущениям подвергаются только три первых боковых лепестка.

В области $4 \dots N - 2$ боковых лепестков величина межпериодных флюктуаций практически равна нулю. Главный лепесток в пределах половинной мощности флюктуациям не подвергается. Если к трем первым парциальным ДН добавить четвертый $R = 4$ ($r_1 = 1, r_2 = 2, r_3 = 3, r_4 = 4$), результирующая ДН изменяется (рис. 8).

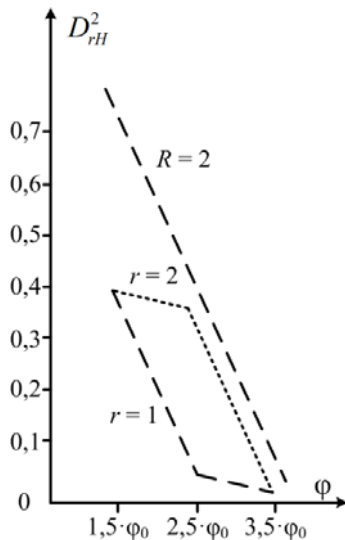


Рис. 2. Графики зависимости D_{rH}^2

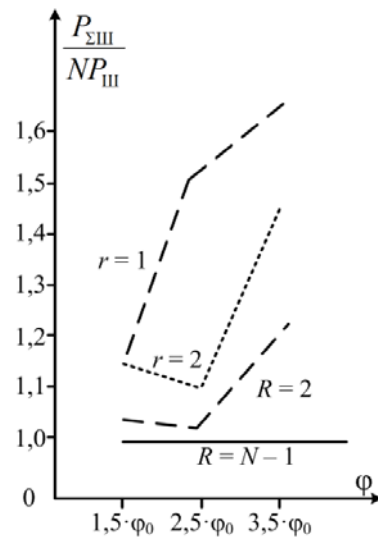


Рис. 3. Графики зависимости $\frac{P_{\Sigma III}}{NP_{III}}$

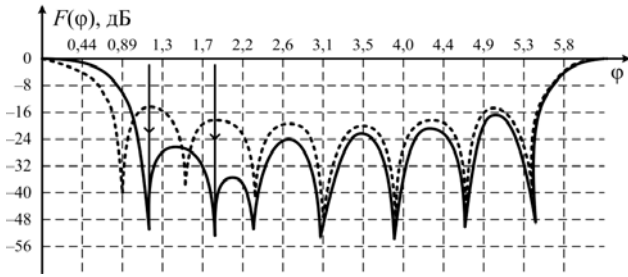


Рис. 4. ДН антенной решетки (частичный ряд Фурье, $R = 2$)

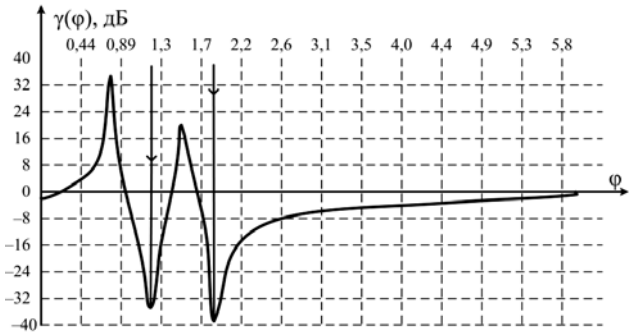


Рис. 5. График изменения коэффициента межпериодных флюктуаций ДН (частичный ряд Фурье, $R = 2$)

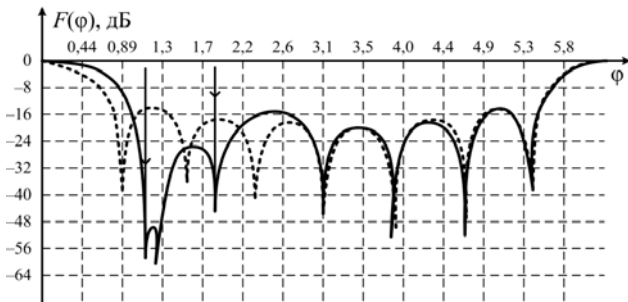


Рис. 6. ДН антенной решетки (частичный ряд Фурье, $R = 3$)

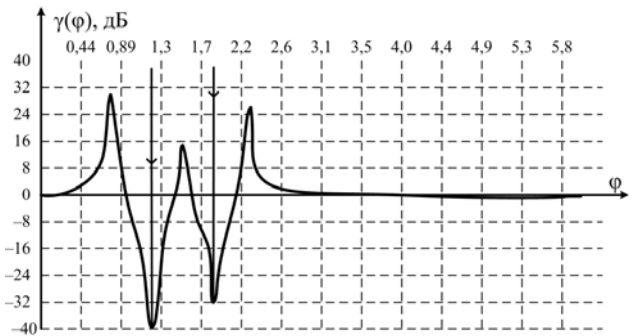


Рис. 7. График изменения коэффициента межпериодных флюктуаций ДН (частичный ряд Фурье, $R = 3$)

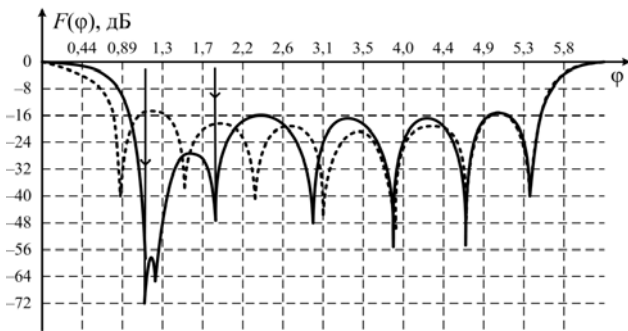


Рис. 8. ДН антенной решетки (частичный ряд Фурье, $R = 4$)

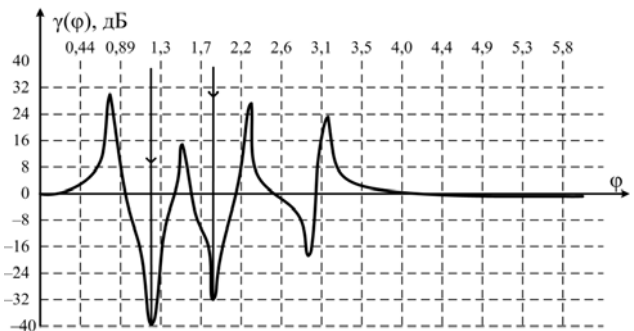


Рис. 9. График изменения коэффициента межпериодных флюктуаций ДН (частичный ряд Фурье, $R = 4$)

Первый боковой лепесток еще больше сужается и опускается до -59 дБ. Выигрыш в ОСШП составляет $18,4$ дБ. Коэффициент чувствительности к ошибкам АФАР незначительно увеличивается от $S_0 = 0,125$ до $S = 0,136$. Изменение величины межпериодных флюктуаций ДН (рис. 9) показывает наличие сильных возмущений ДН в области 3 и 4 боковых лепестков (от -20 до 28 дБ).

В области остальных боковых лепестков величина межпериодных флюктуаций практически равна нулю. Главный лепесток в пределах половинной мощности флюктуациям не подвергается.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1) использование в целях адаптации тех парциальных ДН, которые принимают участие в подавлении помех только своими боковыми лепестками, нецеле-

сообразно, поскольку реально ощутимого выигрыша в ОСШП они не дают (десятые доли дБ), но вызывают глубокие межпериодные флюктуации ДН, при этом величина флюктуаций может изменяться в пределах от минус 33 до 32 дБ в областях боковых лепестков исходной ДН, свободных от помех;

2) для достижения выигрыша в ОСШП, близкого к оптимальному значению, целесообразно использовать алгоритм, в котором амплитудное распределение представлено частичным экспоненциальным рядом Фурье. Члены этого ряда соответствуют парциальным ДН, принимающим участие в подавлении помех своими главными лепестками. При этом потери в ОСШП по сравнению с оптимальным значением составляют десятые доли дБ, а межпериодные флюктуации ДН минимальны. Сильным искажениям подвергаются подавляемые и соседние боковые лепестки.

В области остальных боковых лепестков величина флюктуаций практически равна нулю;

3) амплитудное распределение частичным экспоненциальным рядом не приводит к существенному увеличению коэффициента чувствительности к ошибкам АФАР по сравнению со случаем использования полного ряда. Потери составляют десятые доли дБ.

Библиографические ссылки

1. Тяпкин В. Н., Дмитриев Д. Д., Мошкина Т. Г. Потенциальная помехоустойчивость навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавига-

ционных систем // Вестник СибГАУ. 2012. № 3 (43). С. 113–119.

2. Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС : монография : Сиб. федер. ун-т. Красноярск, 2012.

3. Пистолькорс А. А., Литвинов О. С. Введение в теорию адаптивных антенн. М. : Наука, 1991.

© Тяпкин В. Н., Дмитриев Д. Д., Соколовский А. В., Першин А. С., 2013

УДК 629.7/621.01

МЕТОД РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ САМОЛЕТОВ

Е. А. Фурманова, О. Г. Бойко

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: bouko1962@yandex.ru

Рассмотрен метод расчета надежности систем с учетом восстановления. Показана структура формирования математической модели времени до совместного отказа в восстанавливаемой системе одновременно двух и трех агрегатов.

Ключевые слова: время до отказа, цикл восстановления, число циклов, вероятность отказа.

AIRPLANES FUNCTIONAL SYSTEMS RELIABILITY CALCULATION METHOD

E. A. Furmanova, O. G. Boyko

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: bouko1962@yandex.ru

The authors consider a method for systems reliability calculation, with allowance for recovery, and show the structure of formation of mathematical model of time, until simultaneous failure of two and three aggregates in a recoverable system.

Key words: time until failure, recovery, number of cycles, failure probability.

Расчету надежности систем самолетов без учета и с учетом восстановления посвящены работы [1–5]. Методы расчета систем в указанных работах основываются на методологическом подходе, в котором не используется теорема умножения вероятностей. Основу этого подхода составляет предположение о том, что вероятность отказа агрегата в системе определяется суммарным параметром потока отказов агрегатов ω_{Σ} , составляющих систему, и наработкой.

Поскольку системы самолетов являются восстанавливаемыми системами, то при стационарном процессе эксплуатации наработка на отказ агрегатов стабилизируется, и в качестве математической модели вероятности отказов агрегатов может быть принято распределение равномерной плотности [6]:

$$q(t) = \omega t, \quad (1)$$

где $0 \leq t \leq \frac{1}{\omega}$.

В соответствии с принятым методологическим подходом и уравнением (1), вероятность отказа первого агрегата $q_1(t)$ в невосстанавливаемой системе общего резервирования определится по выражению

$$q_1(t) = \omega_{\Sigma} t_1 = n \cdot m \cdot \omega \cdot t_1, \quad (2)$$

где n – количество последовательно соединенных агрегатов в подсистеме; m – количество параллельно соединенных подсистем.

Рассмотрим систему общего резервирования при $n = 20$ и $m = 3$. Такая система будет подобна структуре гидросистемы самолета Ту-154М, содержащей три одинаковых подсистемы общего резервирования.

Положив в формуле (2) $q_1(t) = 1$, определим время до отказа первого агрегата в системе:

$$t_1 = \frac{1}{n \cdot m \cdot \omega}. \quad (3)$$

Тогда, с учетом наработки t_1 и изменения количе-