В.Г. Найденов, доктор технических наук
М.А. Котов, кандидат технических наук, доцент
Е.В. Першин

Методический подход к корректировке периодичности технического обслуживания сложных радиоэлектронных систем по результатам контроля процесса их эксплуатации

В статье разработан методический подход к корректировке периодов проведения операций технического обслуживания сложных радиоэлектронных систем (РЭС), учитывающий их показатели надежности, оцениваемые в процессе эксплуатации таких систем. Приведен обобщенный алгоритм решения задачи корректировки периодов проведения операций технического обслуживания РЭС. Разработанный подход позволяет определить оптимальные периоды проведения операций ТО в процессе начального периода эксплуатации РЭС и тем самым повысить их эксплуатационную надежность.

Введение

Техническое обслуживание сложных радиоэлектронных систем является неотъемлемой частью системы обеспечения эксплуатации и предназначено для поддержания требуемого качества функционирования РЭС.

Научно обоснованная система технического обслуживания позволяет не только поддерживать уровень надежности радиоэлектронной техники, который заложен в нее на стадии проектирования и производства, но и дает возможность повысить его за счет предотвращения некоторой части отказов путем своевременного выявления и устранения неисправностей [1].

Для установления сроков и объема мероприятий технического обслуживания необходимо учитывать влияние ряда противоречивых обстоятельств. Так, с одной стороны, работы по ТО на объектах РЭС следует проводить регулярно. С другой стороны, достаточно частое и продолжительное их выполнение требует больших трудозатрат и отрицательно сказывается на своевременной и качественной готовности изделия. Кроме того, практикой установлено [1, 3, 4], что при выполнении любой работы, связанной с демонтажем изделий, их разборкой, регулировкой и так далее, возможно внесение дополнительных дефектов в результате ошибок личного состава, механических повреждений, а также случайного нарушения регулировок различных подсистем.

Поэтому при эксплуатации современных РЭС по результатам диагностирования и контроля осуществляется оценка показателей технического состояния этих РЭС. Конечной целью оценки показателей технического состояния РЭС является выработка управляющих воздействий для оптимизации управления процессом эксплуатации сложных РЭС. Одним из видов такого управления является корректировка периодичности технического обслуживания сложных РЭС с учетом уровня их технического состояния.

Введение возможности проведения корректировки периодичности операций ТО в системе технического обслуживания РЭС, в основе которой лежит планово-предупредительное обслуживание, основанное на календарном принципе, позволяет реализовать метод технического обслуживания по фактическому уровню технического состояния таких радиоэлектронных систем.

Данная статья посвящена разработке нового подхода к оптимальной корректировке периодов проведения отдельных операций технического обслуживания сложных радиоэлектронных систем, проводимой в процессе начального этапа эксплуатации таких систем.

Суть подхода к корректировке периодов проведения операций технического обслуживания сложных радиоэлектронных систем

Известно [1, 2] что безотказность восстанавливаемых объектов удобно характеризовать параметром потока отказов $\lambda(t)$. Кроме того, известно [1, 3], что периодичность проведения операций технического обслуживания (ТО) влияет на качество функционирования РЭС. Поэтому такие операции ТО образуют совокупность факторов, воздействующих на значение функции $\lambda(t)$. Вследствие этого, параметр потока отказов технической системы можно представить как функцию *N* таких факторов:

$$\lambda(\mathbf{T},t)=\lambda(T_1,T_2,\ldots,T_n,\ldots,T_N,t), \tag{1}$$

где $\mathbf{T}$ – вектор размерностью *N*, состоящий из периодов проведения различных операции технического обслуживания сложной РЭС;

T_n – период проведения *n*-ой операции технического обслуживания, $n=\overline{1,N}$.

Задача состоит в том, чтобы на начальном этапе эксплуатации РЭС определить вектор $\mathbf{T}_{opt}$ оптимальных значений периодов проведения операций ТО и скорректировать каждое значение T_n, $(n=\overline{1,N})$ таким образом, чтобы в замкнутой области $\mathbf{\Omega}$, где определена функции (1), ее значение имело бы минимальное значение, то есть определить

$$\mathbf{T}_{opt}=\underset{\mathbf{T}\in\mathbf{\Omega}}{\mathrm{Argmin}}\,\lambda(T_1,T_2,\ldots,T_n,\ldots,T_N,t),\ T_{n_{min}}\leqslant T_n\leqslant T_{n_{max}},n=\overline{1,N}, \tag{2}$$

где $\mathbf{T}=[T_1,T_2,\ldots,T_n,\ldots,T_N]$ – вектор значимых факторов (периодов проведения операций ТО), влияющих на значения оценок функции $\lambda(\mathbf{T},t)$;

$T_{n_{min}},T_{n_{max}}$ – соответственно минимальное и максимальное натуральное значение фактора T_n.

Задача (2) представляет собой нелинейную задачу математического программирования, решение которой может быть найдено путем итерационного процесса поиска оптимального значения вектора $\mathbf{T}_{opt}=[T_{1_{opt}},T_{2_{opt}},\ldots,T_{n_{opt}},\ldots,T_{N_{opt}}]$ рассматриваемых факторов, при котором наблюдается минимальное значение функции потока отказов аппаратуры.

Для решения этой задачи был применен метод Бокса-Уилсона или метода крутого спуска [5, 6], основанный на многофакторном планировании натурного эксперимента, линейном регрессионном анализе, а также последовательном движении от условий проведения одного натурного эксперимента к условиям проведения последующего натурного эксперимента по направлению, указанному вектором градиента функции $\lambda(\mathbf{T},t)$.

Для реализации метода крутого спуска первоначально фиксируются периоды операций ТО, которые не должны корректироваться в процессе эксплуатации РЭС (это, например, операции, связанные с безопасностью эксплуатации системы).

Далее формируются факторы, в качестве которых выступают периоды проведения операций ТО, подлежащих корректировке, или групп таких операций, сформированных из однотипных операций ТО с равными периодами проведения.

Важным этапом реализации стратегии нахождения скорректированных значений периодов проведения операций ТО является построение плана проведения многофакторного эксперимента для корректировки технического обслуживания РЭС [5, 7].

При этом, если при планировании многофакторного эксперимента предусматривается осуществлять все возможные и неповторяющиеся комбинации, то в этом случае имеет место планирование полного факторного эксперимента. На практике часто можно ограничиться реализацией матрицы планирования, содержащей лишь часть полного факторного эксперимента. При этом может быть сокращено количество натурных экспериментов в ущерб некоторому снижению точности оценки модели $\tilde{\lambda}(\mathbf{T},t)$ функции параметра потока отказов РЭС.

При построении ортогонального плана многофакторного эксперимента необходимо провести нормирование рассматриваемых факторов (операций технического обслуживания), то есть перевести натуральные их значения $(T_n, n=\overline{1,N})$ в безразмерные величины $(T_{n(норм)}, n=\overline{1,N})$. Преобразование натуральных значений факторов в безразмерные величины осуществляется с помощью следующей операции нормирования факторов:

$$T_{n(норм)}=\frac{T_n-T_{0n}}{\delta T_n}, \quad (n=\overline{1,N}), \tag{3}$$

где T_{n0} – основной уровень n-го рассматриваемого фактора в натуральных единицах;

δT_n – интервал варьирования рассматриваемого n-го фактора в натуральных единицах.

Если в конкретном натурном эксперименте по корректировке периодов проведения операций технического обслуживания фиксируется верхнее $T_n^{(B)}$ и нижнее $T_n^{(H)}$ значения n-го фактора, то значения T_{n0} и δT_n рассчитываются по следующим формулам:

$$T_{n0}=0{,}5\left(T_n^{(H)}+T_n^{(B)}\right); \ \delta T_n=0{,}5\left(T_n^{(B)}-T_n^{(H)}\right). \tag{4}$$

В этом случае, при изменении фактора T_n в пределах от $T_n^{(H)}$ до $T_n^{(B)}$ нормированное значение $T_{n(норм.)}$ изменяется от -1 до +1. При этом упорядоченная совокупность численных значений факторов, соответствующая условиям проведения эксперимента, рассматривается как точка факторного пространства, координатные оси которого соответствуют факторам.

Для плана полного факторного эксперимента число опытов M всех неповторяющихся комбинаций из N рассматриваемых независимых факторов, имеющих по два уровня, будет равно $M=2^n$. Так, матрица планирования эксперимента $\mathbf{Z}$ для сочетаний различных уровней независимых факторов при $N=3$ и при отсутствии взаимодействия факторов будет иметь вид, представленный в таблице 1.

Таблица 1 – Матрица плана полного факторного эксперимента вида $M=2^3$

Номер опыта по проведению операций ТО	Значения нормированных факторов и функции отклика от результатов проведения натурных опытов				
	$T_{0(норм.)}$	$T_{1(норм.)}$	$T_{2(норм.)}$	$T_{3(норм.)}$	Вектор оценок значений функции отклика $(\hat{\mathbf{\Lambda}})$
1	+1	-1	-1	+1	$\hat{\lambda}_1$
2	+1	+1	-1	-1	$\hat{\lambda}_2$
3	+1	-1	+1	-1	$\hat{\lambda}_3$
4	+1	+1	+1	+1	
5	+1	-1	-1	-1	$\hat{\lambda}_5$
6	+1	+1	-1	+1	$\hat{\lambda}_6$
7	+1	-1	+1	+1	$\hat{\lambda}_7$
8	+1	+1	+1	-1	$\hat{\lambda}_8$

В случае, когда взаимодействия факторов малы или отсутствуют, целесообразно проводить дробный факторный эксперимент. Правильно выбранный дробный факторный эксперимент может существенно сократить число планируемых наблюдений, но при условии некоторого ухудшения точности получаемых оценок.

Согласно применяемому методу крутого спуска с использованием получаемых оценок в результате проведения серии опытов в конкретном многофакторном эксперименте необходимо осуществлять идентификацию параметров модели целевой функции, а именно функции параметра потока отказов $\lambda(\mathbf{T},t)$ для моментов времени проведения таких экспериментов.

Вид модели целевой функции необходимо выбирать, исходя из стратегии проводимого эксперимента, которая должна позволять предсказывать направление проведения дальнейших повторных натурных экспериментов с целью минимизации целевой функции. Поэтому, в нашем случае, в качестве такой модели можно выбрать линейную регрессионную модель (гиперплоскость) следующего вида:

$$\hat{\lambda}(\mathbf{T},t)=\hat{b}_0+\sum_{n=1}^{N}\hat{b}_n T_n\,, \tag{5}$$

где b_0 и b_n – коэффициенты линейной регрессионной модели.

Начальным этапом обработки результатов проведенного многофакторного эксперимента является оценивание коэффициентов регрессионной модели (5). Данную операцию можно осуществить с использованием метода наименьших квадратов [5, 7]. При этом должно выполняться следующее условие, заключающееся в том, что наблюдаемые значения функции отклика $\hat{\lambda}_1,\hat{\lambda}_2,\ldots,\hat{\lambda}_M$ по данным M опытов представляют собой независимые и нормально распределенные случайные величины.

В соответствии с методом наименьших квадратов находятся такие значения оценок $\hat{b}_0$ и $\hat{b}_n$ коэффициентов b_0 и b_n, которые минимизируют сумму квадратов отклонений (невязок) η_n значений функции параметра потока отказов, полученных в результате проведения эксперимента от величин, предсказанных регрессионным уравнением (5), то есть которые минимизируют функционал вида:

$$R=\sum_{m=1}^{N}(\eta_m)^2=\sum_{m=1}^{M}[\hat{\lambda}_m-(\hat{b}_0)+\sum_{n=1}^{N}\hat{b}_n T_{nm}]^2\,,$$

где T_{nm} – период проведения n-ой операции ТО в m-ой точке факторного пространства.

Выражение для оценки коэффициентов уравнения регрессии в матричной форме имеет следующий вид [5]:

$$\hat{\mathbf{B}}=(\mathbf{Z}^{T}\times\mathbf{Z})^{-1}\times\mathbf{Z}^{T}\times\hat{\mathbf{\Lambda}}\,, \tag{6}$$

где $\hat{\mathbf{B}}=[\hat{b}_0 i\hat{b}_1 L\hat{b}_N]^T$ – вектор коэффициентов линейной регрессионной модели;

$\mathbf{Z}$ – матрица многофакторного эксперимента размерностью $((N+1)\times M)$;

$\hat{\mathbf{\Lambda}}=[\hat{\lambda}_1\hat{\lambda}_2 L\hat{\lambda}_m]^T$ – вектор оценок функции параметра потока отказов аппаратуры, полученный в результате проведения многофакторного эксперимента.

После оценки вектора коэффициентов линейной регрессионной модели важным этапом обработки результатов многофакторного эксперимента является проверка регрессионной модели на адекватность.

Адекватность принятой регрессионной модели может быть проверена путем анализа разности между экспериментальными значениями функции параметра потока отказов аппаратуры и значениями, предсказанными по уравнению регрессии в рассматриваемых точках факторного пространства. Для этого можно использовать F-критерий Фишера, который определяется следующим выражением [5]:

$$F=\frac{\sigma^2_{адек.}}{\sigma^2(\lambda)}, \tag{7}$$

где $\sigma^2_{адек.}$ – дисперсия адекватности регрессионной модели;

$\sigma^2(\lambda)$ – дисперсия параметра оптимизации (дисперсия воспроизводимости).

Дисперсия адекватности регрессионной модели определяется по формуле [5]:

$$\sigma^2_{адек.}=\frac{\sum_{m=1}^{M}\left(\hat{\lambda}_m-\hat{\lambda}\right)^2}{f}, \tag{8}$$

где $\hat{\lambda}_m$ – значение регрессионной модели в m-м опыте, а $\hat{\lambda}$ – среднее значение регрессионной модели в M опытах;

f – число степеней свободы дисперсии адекватности определяется как $f=M-(N+1)$.

Дисперсия параметра оптимизации может быть оценена по формуле [5]:

$$\sigma^2(\lambda)=\frac{\sum_{m=1}^{M}\left(\hat{\lambda}_m-\hat{\lambda}\right)^2}{M-1}. \tag{9}$$

Если рассчитанное значение F-критерия не превышает табличное значение при заданном уровне значимости и имеющем место количестве степеней свободы, то с соответствующей доверительной вероятностью модель можно считать адекватной.

Кроме того, необходимо провести проверку коэффициентов уравнения регрессии на значимость, которая может быть осуществлена по $\hat{t}$ -критерию Стьюдента.

Для проверки значимости n- го коэффициента по - критерию используют следующую формулу [5, 6]:

$$\hat{t}=\frac{|\hat{b}_n|}{\sigma(\hat{b}_n)}, \tag{10}$$

где $\hat{b}_n$ – оценка n-го коэффициента уравнения регрессии;

$\sigma^2(\hat{b}_n)$ – дисперсия оценки n-го коэффициента уравнения регрессии, которая определяется по следующей формуле:

$$\sigma^2(\hat{b}_n)=\frac{\sigma^2(\lambda)}{M}. \tag{11}$$

Из формулы видно, что дисперсии всех коэффициентов равны друг другу, так как они зависят от дисперсии параметра оптимизации и числа опытов, проводимых в эксперименте.

При этом рассматриваемый коэффициент значим, если рассчитанное согласно формуле (10) значение $\hat{t}$ -критерия превосходит критическое табличное значение при заданном уровне значимости и числе степеней свободы, равном $M-1$.

Для определения правильной стратегии проведения повторных многофакторных экспериментов согласно методу крутого спуска используется направление движения, обратное вектору градиента, построенному по модели функции параметра потока отказов.

Скорость изменения модели функции параметра потока отказов аппаратуры для текущего натурного эксперимента по корректировке периодов проведения операций технического обслуживания будет наибольшей в направлении вектора градиента, а сам градиент определяется следующей формулой [6]:

$$\mathbf{grad}\,\tilde{\lambda}(\mathbf{T}) = \sum_{n=1}^{N} \left(\frac{\partial \tilde{\lambda}(\mathbf{T})}{\partial T_n} \right) \cdot \boldsymbol{j}_n = \sum_{n=1}^{N} \hat{b}_n \boldsymbol{j}_n\,, \tag{12}$$

где $\boldsymbol{j}_n (n=\overline{1,N})$ – орты.

Как видно, в этом случае направление крутого спуска определяется полностью коэффициентами линейного уравнения модели функции параметра потока отказов аппаратуры $\tilde{\lambda}(\mathbf{T})$ для текущего натурного эксперимента по корректировке периодов проведения операций технического обслуживания.

Изменением значений основных уровней рассматриваемых факторов проведенного эксперимента пропорционально оценкам коэффициентов уравнения регрессии (5) обеспечивает движение вдоль линии крутого спуска, обеспечивая минимизацию функции параметра потока отказов обслуживаемой РЭС.

На рисунке 1 приведено пояснение работы метода крутого спуска на примере двухмерной функции параметра потока отказов.

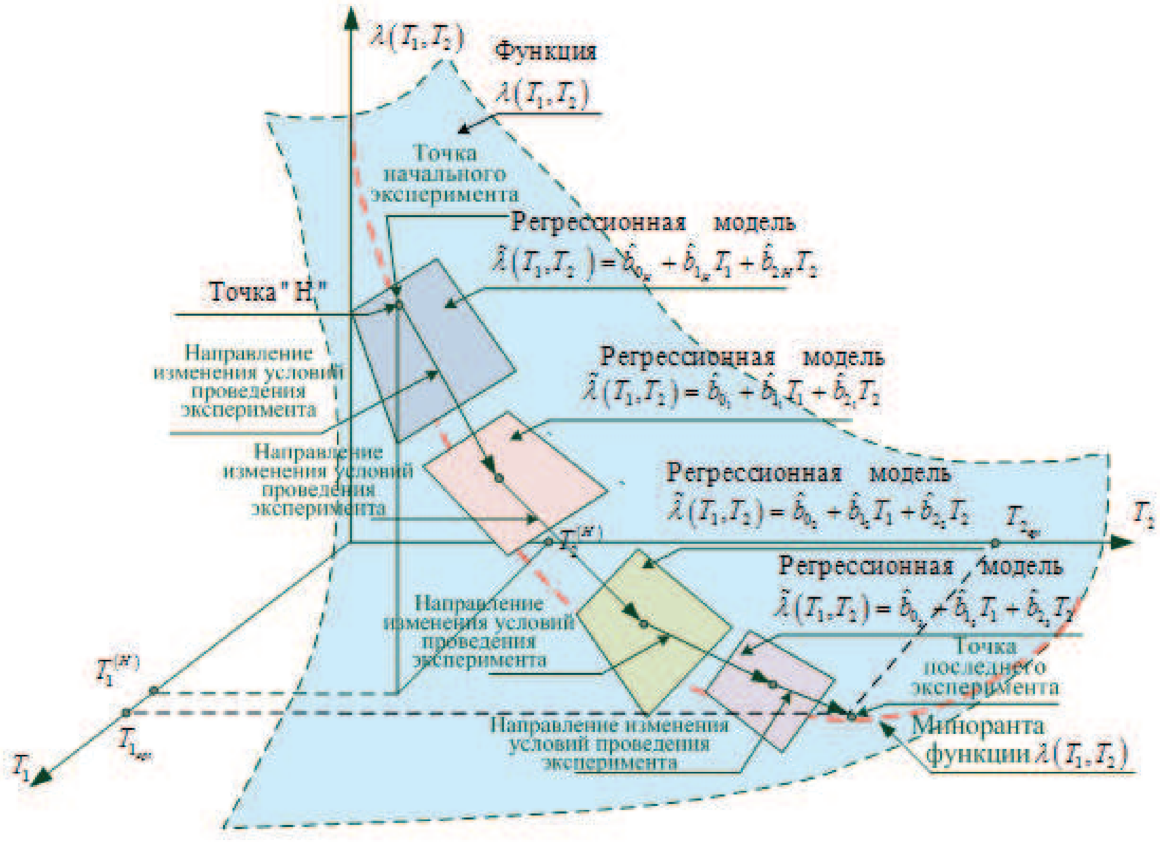

Рисунок 1 – Пояснение работы метода крутого спуска на примере двухмерной функции параметра потока отказов

Так, на этом рисунке показана точка «Н», обозначающая условия проведения начального многофакторного эксперимента.

По результатам проведения начального эксперимента строится линейная регрессионная модель вида $\hat{\lambda}$, которая в данном случае представляет собой плоскость.

Далее находится вектор градиента (12), построенный по модели функции параметра потока отказов аппаратуры, а затем в направлении, обратном найденному вектору градиента, проводится определение условий проведения второго натурного эксперимента по техническому обслуживанию аппаратуры, то есть осуществляется изменение периодов проведения операций ТО, подвергающихся корректировке.

Процесс повторных экспериментов по изменению периодов проведения операций ТО, подвергающихся корректировке, продолжается вдоль уменьшения значения миноранты функции параметра потока отказов аппаратуры $\lambda(\mathbf{T},t)$.

Повтор натурных экспериментов по техническому обслуживанию аппаратуры продолжается до момента попадания в область функции $\lambda(\mathbf{T},t)$, где скорость ее уменьшения не превышает заранее заданного малого числа ε. В этом случае может быть принято решение о нахождении оптимальных значений периодов проведения операций по техническому обслуживанию РЭС.

При этом могут использоваться дополнительные методы рационального регулирования шага движения в направлении, обратном вектору градиента, в зависимости от изменения условий проведения эксперимента от текущего к последующему.

Для операций по техническому обслуживанию РЭС, связанных с демонтажем изделий, их разборкой, регулировкой и так далее, когда возможно внесение дополнительных дефектов в результате ошибок личного состава, механических повреждений или случайного нарушения регулировок различных подсистем, дальнейшее увеличение периодов проведения таких операций после завершения их корректировки приведет к увеличению значения функции параметра потока отказов аппаратуры из-за естественных процессов деградации элементной базы аппаратуры, а также из-за ухода от установленных норм контролируемых и неконтролируемых параметров.

Обобщенный алгоритм корректировки периодов проведения операций технического обслуживания сложных РЭС по информации об их техническом состоянии в процессе эксплуатации

С целью целостного понимания разработанного методического подхода к корректировке периодичности технического обслуживания сложных радиоэлектронных систем по результатам контроля процесса их эксплуатации на рисунке 2 приведен обобщенный алгоритм разработанного подхода.

Так, в блоке 1 алгоритма проводится ввод исходных данных. В частности, проводится ввод данных о тех операциях календарного технического обслуживания РЭС, периодичность проведения которых подлежит корректировке.

В блоке 2 осуществляется формирование вектора $\mathbf{T}$ корректируемых значений периодичности проведения операций технического обслуживания РЭС.

Далее в блоке 3 алгоритма проводится нормирование рассматриваемых факторов (периодов операций ТО) в соответствии с выражениями (3, 4), а также выбор интервалов варьирования этих факторов.

В блоке 4 проводится построение ортогонального плана полного или дробного факторного эксперимента в виде полуреплики или четверти реплики от полного факторного эксперимента и формирование матрицы плана $\mathbf{Z}$. При этом использование дробного факторного эксперимента позволяет уменьшить количество проводимых опытов и тем самым существенно сократить время корректировки периодов проведения отобранных операций ТО.

Затем в блоке 5 проводится выбор условий проведения начального натурного эксперимента по корректировке значения вектора $\mathbf{T}$.

Блоками 7...10 алгоритма обозначается проведение *M* опытов дробного факторного эксперимента с возможностью, в случае необходимости, реализации повторных опытов.

Рисунок 2 – Обобщенный алгоритм реализации методического подхода к корректировке периодичности технического обслуживания РЭС

Оценка коэффициентов $\hat{b}_0, \hat{b}_1, \ldots, \hat{b}_N$ регрессионной модели гиперплоскости, аппроксимирующей в точке проведения эксперимента функцию параметра потока отказов аппаратуры, проводится в блоке 11 алгоритма в соответствии с выражением (6).

Далее в блоке 12 алгоритма проводится проверка оцененной регрессионной модели на адекватность с использованием критерия Фишера в соответствии с выражения (7, 8, 9), а в блоке 14 реализуется проверка коэффициентов $\hat{b}_0, \hat{b}_1, \ldots, \hat{b}_N$ регрессионной модели на значимость с использованием критерия Стьюдента согласно выражениям (10, 11).

В случае, если регрессионная модель не прошла проверку на адекватность, то в блоке 13 проводится корректировка интервалов варьирования периодов проведения операций ТО и повторение текущего эксперимента с целью пополнения статистического материала.

При выявлении незначимых коэффициентов в уравнении регрессии (блоке 19 алгоритма) проводится корректировка плана факторного эксперимента и повторение текущего эксперимента с целью пополнения статистического материала.

Далее блок 14 описывает процесс изменения условий проведения многофакторного эксперимента в направлении, обратном вектору градиента, построенному по модели функции параметра потока отказов аппаратуры, в сторону уменьшения значения функции $\lambda(\mathbf{T},t)$.

В блоке 17 алгоритма проводится проверка условия достижения минимума функции параметра потока отказов аппаратуры $\lambda(\mathbf{T},t)$. При достижении точки экстремума функции $\lambda(\mathbf{T},t)$ в блоке 20 алгоритма проводится вывод искомого значения вектора $\mathbf{T}_{opt}$. В противном случае в блоке 18 проводится определение условий проведения последующего натурного эксперимента по корректировке вектора периода проведения операций технического обслуживания РЭС, а затем реализуется последующий многофакторный эксперимент.

Рассмотренный алгоритм может быть успешно реализован в автоматизированных информационно-управляющих системах диагностирования, контроля технического состояния сложных РЭС и управления их техническим обслуживанием.

Апробация реализуемости предложенного методического подхода была произведена путем моделирования процесса корректировки значений периодичности проведения трех операций ТО в предположении, что функция параметра потока отказов аппаратуры имеет вид

$$\lambda(\mathbf{T})=0{,}02+5\cdot10^{-4}(T_1-59{,}2)^2+2\cdot10^{-5}(T_2-82{,}5)^2+5\cdot10^{-5}(T_3-111{,}5)^2. \qquad (13)$$

Внешний вид рассматриваемой функции $\lambda(\mathbf{T})$ в изометрической проекции для первых трех слагаемых с использованием пакета программ Maple показан на рисунке 3.

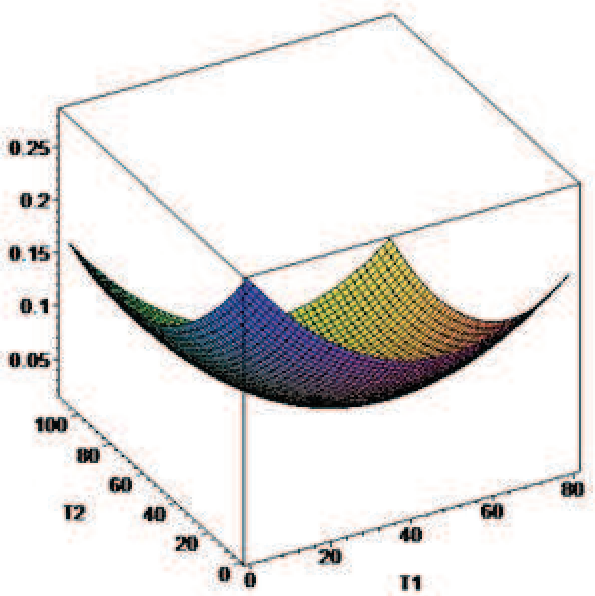

Рисунок 3 – Внешний вид функции $\lambda(\mathbf{T})$ для первых трех ее слагаемых

В горизонтальной плоскости показаны оси, на которых откладываются значения T_1 и T_2 периодов проведения двух операций ТО в сутках, а по вертикальной оси отсчитываются значения функции $\lambda(\mathbf{T})$.

Моделирование работы рассмотренного алгоритма по корректировке периодичности проведения операции ТО проводилось из начальной точки с координатами $T_1=30{,}0\,\text{сут.}$, ¿$30{,}0\,сут.$, $T_3=30{,}0\,\text{сут.}$, т. е. осуществлялась корректировка трех операций ТО, проводимых ранее в рамках ежемесячного технического обслуживания аппаратуры.

Значение функции $\lambda(\mathbf{T})$, описанной выражением (13), в точке проведения начального эксперимента с указанными координатами равно 0,8335575.

При этом использовалась полуреплика полного факторного эксперимента, позволяющего проводить только четыре модельных опыта. Матрица этого плана показана в таблице 1.

Таблица 1 – Матрица полуреплики плана полного факторного эксперимента вида $M=2^3$

Номер опыта по проведению операций ТО	Значения нормированных факторов и функции отклика то результатов проведения модельных опытов				
	$T_{0(норм.)}$	$T_{1(норм.)}$	$T_{2(норм.)}$	$T_{3(норм.)}$	Вектор оценок значений вектора отклика $(\hat{\mathbf{\Lambda}})$
1	+1	-1	-1	+1	$\hat{\lambda}_1$
2	+1	+1	+1	+1	$\hat{\lambda}_2$
3	+1	-1	+1	-1	$\hat{\lambda}_3$
4	+1	+1	-1	-1	$\hat{\lambda}_4$

При проведении первого многофакторного модельного эксперимента был выбран интервал варьирования трех факторов, равный 5 суткам.

В соответствии с планом эксперимента, представленного в таблице 1, были проведены четыре модельных опыта, в результате которого были получены следующие значения оценки компонентов вектора отклика $(\hat{\mathbf{\Lambda}})$: $\hat{\lambda}_1=0{,}9635575$, hat $\lambda_2=0{,}6505575$, $\hat{\lambda}_3=1{,}0240575$, $\hat{\lambda}_4=0{,}7530575$.

Далее при этих значениях компонент вектора $\hat{\mathbf{\Lambda}}$ было решено матричное уравнение (6) и получены оценки вектора коэффициентов линейного уравнения регрессии вида

$$\tilde{\lambda}(\mathbf{T})=0{,}8478075-0{,}146\cdot T_1-0{,}0105\cdot T_2-0{,}04075\cdot T_3\,. \tag{14}$$

Затем в соответствии с приведенным на рисунке 2 алгоритмом была проведена проверка коэффициентов линейной регрессионной модели (14) на значимость, а также проверка этой модели на адекватность.

Дальнейший поиск экстремума функции (13) проводился в направлении, обратном направлению градиента от линейного уравнения регрессии (14). При этом координаты точки четырехмерного пространства для проведения второго многофакторного эксперимента определялись в соответствии со значениями коэффициентов уравнения (14). Координаты этой точки имели следующие значения: $T_1=44{,}6\,\text{сут.}$, $T_2=31{,}05\,\text{сут.}$, $T_3=34{,}075\,\text{сут.}$ Значение функции $\lambda(\mathbf{T})$ в этой точке с указанными координатами равно 0,479253. Таким образом, за одну итерацию работы алгоритма значение функции $\lambda(\mathbf{T})$ уменьшилось почти в два раза.

При величине ε, равной 0,09, обозначающей изменение значений функции $\lambda(\mathbf{T})$, оцениваемой в пятом и шестом многофакторных экспериментах, итерационный процесс поиска экстремум функции $\lambda(\mathbf{T})$ был остановлен. Значения факторов в точке найденного экстремума функции $\lambda(\mathbf{T})$ имели следующие значения: $T_1=57{,}8\,\text{сут.}$, $T_2=80{,}7\,\text{сут.}$, $T_3=99{,}75\,\text{сут.}$

Результаты проведенного модельного эксперимента показали, что для приведенного вида функции (13) корректировка периодов проведения операций ежемесячного объема ТО может быть выполнена за первые 2 года эксплуатации РЭС.

Таким образом, в статье разработан новый методический подход к корректировке периодов проведения операций технического обслуживания сложных радиоэлектронных систем, который позволяет определить оптимальные периоды проведения операций ТО в процессе начального периода эксплуатации таких систем, и тем самым повысить их эксплуатационную надежность.

Список использованных источников

1. Шишонок Н.А., Репкин В.Ф., Барвинский Л.Л. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники. – М.: Советское радио, 1964.

2. Надежность технических систем. Справочник / Под ред. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985.

3. Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. – М.: Советское радио, 1971.

4. Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А. Организация обслуживания при ограниченной информации о надежности системы. – М.: Советское радио, 1975.

5. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976.

6. Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. – М.: Наука, 1976.

7. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. – М.: Наука, 1971.