

doi : 10.32620/oikit.2019.85.07

УДК 629.7.01

В. Ф. Шмырев, А. Д. Донец

Метод оптимизации при проектировании воздушных распределительных сетей энергетических систем самолета

Государственное предприятие «АНТОНОВ»

С увеличением дальности, скорости и высоты полета, с увеличением числа задач, решаемых авиационной техникой, расширились и усложнились задачи решаемые бортовыми воздушными распределительными сетями. Так, например, в воздушную распределительную сеть современного транспортного самолета входят:

- система кондиционирования кабин;
- система обогрева подпольного пространства;
- противообледенительная защита крыла и дренажа топливных баков;
- противообледенительная защита воздухозаборника двигателя;
- воздушный запуск двигателя;
- система организованного отсоса воздуха из отсека оборудования;
- наддув гидробаков;
- привод турбо-насосной установки;
- наддув радиоаппаратуры и локатора;
- обогрев отсека вспомогательной силовой установки;
- кондиционирование кабин от наземных источников;
- вентиляция кабин забортным воздухом;
- подача воздуха для производства нейтрального газа

По конструктивной форме бортовые воздушные сети представляют совокупность теплообменных аппаратов, холодильных турбин, компрессоров, фильтров, ограничителей и регуляторов, смесителей, трубопроводов и других элементов, которые взаимодействуют между собой и с окружающей средой путем обмена потоками рабочих тел, тепла и механической энергии. Целевое назначение системы реализуется в процессе ее функционирования, которое заключается в производстве на борту и подаче к потребителям рабочего тела, количество и качество которого определяется внешними характеристиками. Внешняя характеристика является количественным выражением цели функционирования системы. Как технический объект воздушные распределительные сети характеризуются рядом функциональных показателей. Это – надежность и масса системы, затраты энергии и рабочих тел, габариты, внешние энерговыделения, запас прочности, стоимость и т.п. В практике создания воздушных распределительных систем при выполнении требований по холодопроизводительности в дальнейшем используют, как правило, такой показатель, как "установочная" масса, реже, комплексный – "приведенная" масса, с введением ограничений на другие показатели. При проектировании воздушных распределительных систем поиск компромисса между многими противоречивыми требованиями: минимизация установочной массы и потерь энергии, высокая надежность систем отказобезопасность, жесткие пространственные ограничения, высокая технологичность и сравнительно низкая стоимость производства. Привлечение методов математической статистики позволяет оптимизировать параметры воздушных систем.

Ключевые слова: воздушные распределительные сети, приращение взлетной массы самолета, метод крутого восхождения, случайный поток, матрица пробных точек.

Предложен метод минимизации массы бортовых распределительных сетей энергетических систем самолета с поэтапным анализом эквивалентной массы системы с последующей оптимизацией с использованием метода случайного поиска и показателей качества по Парето.

Основными конструктивными параметрами воздушной распределительной сети самолета являются: протяженность, диаметр и толщина стенок трубопроводов, конструкционный материал на различных участках сети и конструктивные решения вызванные спецификой авиационного проектирования в ограниченном пространстве.

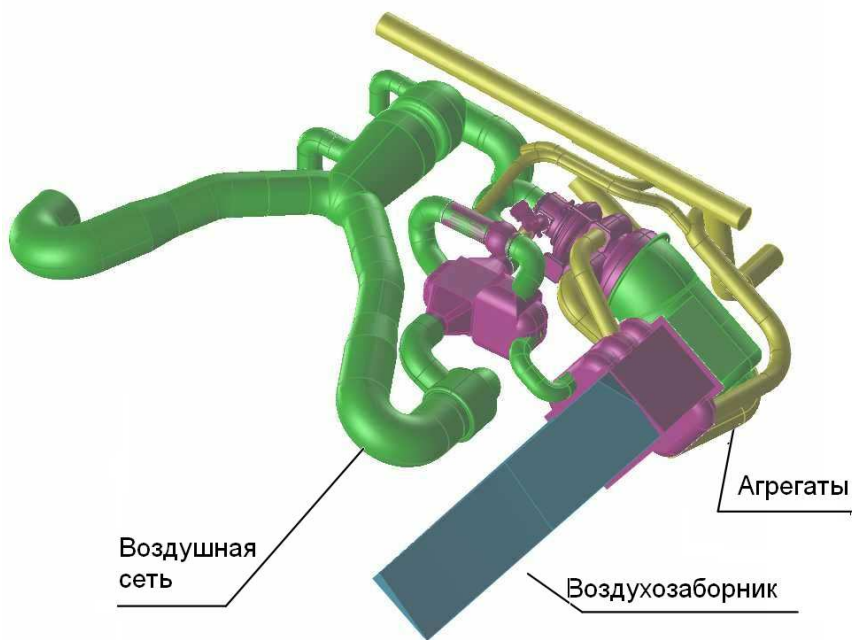
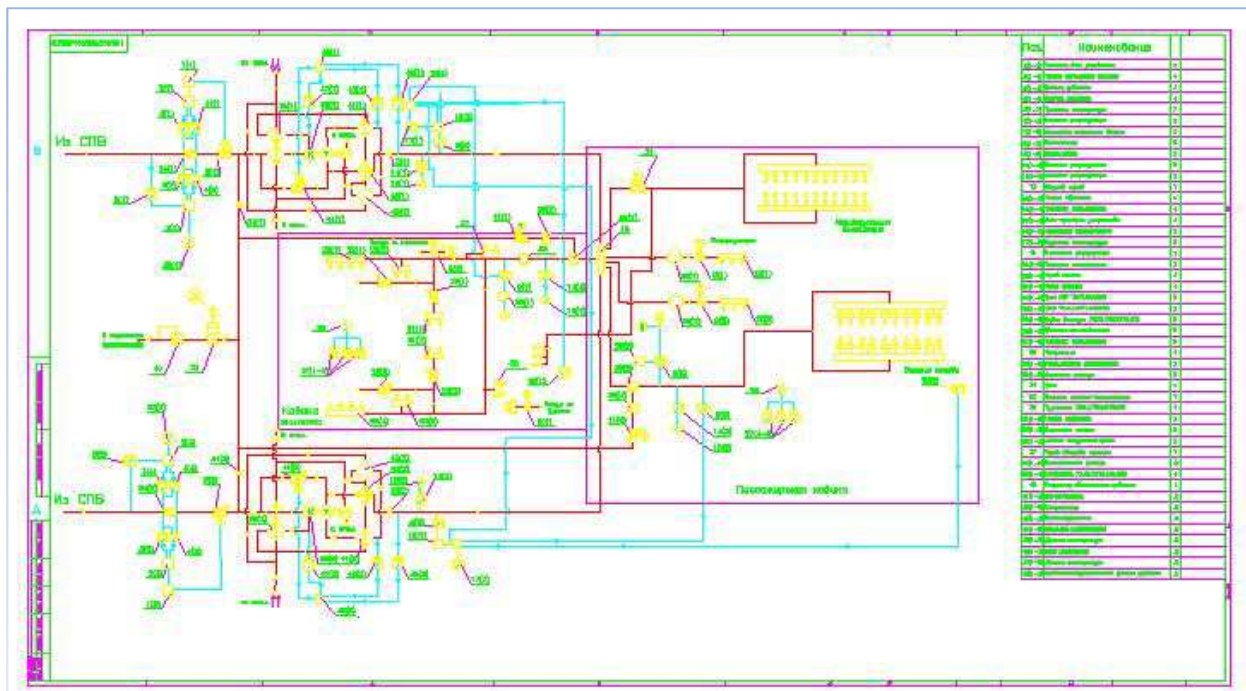


Рис. 1. Принципиальная схема и фрагмент воздушной распределительной сети среднемагистрального пассажирского самолета.

Длина трубопроводов определяется конкретной привязкой сети к геометрии самолета [1].

Диаметры трубопроводов определяются допустимыми энергетическими потерями по трассе, а так же допустимыми скоростями течения газа в различных зонах трассы.

Толщина стенки находится из условия прочности и долговечности в зависимости от давления, температуры, внешних инерционных и кинематических воздействий, применяемых технологических процессов.

Причем выбор этих геометрических размеров, а так же конструкционных материалов по длине трассы должен осуществляться (как и принято в самолетостроении) из условия минимальной массы сети:

$$m_{\Sigma} = \sum m_i = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \pi \sum_{i=1}^n d_i s_i \ell_i \gamma_i, \quad (1)$$

- где k_1 - коэффициент, учитывающий массу законцовок труб;
 k_2 - коэффициент, учитывающий массу крепления труб;
 k_3 - коэффициент, учитывающий массу теплоизоляции;
 ℓ_i - длина i -го трубопровода;
 d_i - диаметр i -го трубопровода;
 s_i - толщина стенки i -го трубопровода;
 n - число участков трубопроводов;
 γ_i - удельная плотность материала на i -м участке трубопровода.

В приведенной функции цели отсутствует вес агрегатов систем, таких как теплообменники, холодильные машины, заслонки, регуляторы, клапана, масса которых в ряде случаев также зависит от геометрических размеров подводящих трубопроводов и их теплофизических характеристик. Суммарный вес агрегатов составляет 35-40% от веса системы.

Ниже приведены некоторые зависимости по весовому анализу применяемых агрегатов:

1. Заслонка перекрывающая

$$m_i = 10,7d_i + 0,975, \quad (2)$$

где d_i – диаметр подводящего трубопровода в м; m_i – в кг.
 Зависимость характерна для диапазона диаметров

$$\begin{aligned} 0,004 \leq d \leq 0,14 \text{ м} \\ 0,8 \leq p \leq 15 \text{ кг/см}^2 \\ -60 \leq t \leq 440^\circ\text{C} \end{aligned}$$

2. Заслонка регулирующая

$$m_i = 51,5d_i + 0,8 \quad (\text{для } t > 150^\circ) \quad (3)$$

$$m_i = 22,4d_i + 1,6 \quad (\text{для } t \leq 150^\circ) \quad (4)$$

3. Регулятор расхода воздуха

Масса равна массе регулирующей заслонки увеличенной на массу командного прибора (2 кг).

4. Обратный клапан

$$m_i = 6,7 d_i - 0,1 \quad (\text{для } t > 300^\circ\text{C}) \quad (5)$$

$$m_i = 3,3 d_i + 0,1 \quad (\text{для } t \leq 300^\circ\text{C}) \quad (6)$$

5. Регулятор избыточного давления

$$m_i = 40d_i + 1 \quad \text{для} \quad \begin{aligned} 3 \leq p_{\text{вх}} \leq 25 \text{ кг/см}^2 \\ 60 \leq t \leq 65^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (7)$$

6. Влагодделитель

$$m_i = 103,5d_i - 3 \quad (8)$$

Поэтому функцию цели можно записать как

$$m_{\Sigma} = k_1 k_2 k_3 \prod \sum_{i=1} d_i s_i \lambda_i \gamma_i + k_4 \sum d_i \quad (9)$$

где k_4 – тип агрегата

При проектировании воздушных систем всегда возникает вопрос о том, какую из двух и более возможных вариантов систем следует принять для разработки на новом самолете или как сравнить имеющиеся системы.

Прежде всего оценка системы проводится по их способности к выполнению функциональных требований, таких как обеспечение заданных параметров по давлению, температуре и влагосодержанию воздуха на всех режимах полета, свойственных рассматриваемому самолету. Очевидно, что любая из конкурирующих систем должна отвечать этим требованиям.

Примем при дальнейших построениях оптимизационных циклов оценку воздушных систем по их влиянию на приращение взлетной массы самолета.

Приращение взлетной массы самолета, обусловленное воздушной системой, определяется как сумма всех затрат массы на систему

$$m_{\text{экв}} = m_{\Sigma} + (\Delta f_D + \Delta f_S + \Delta f_W) t \quad (10)$$

где Δf_D – расход топлива, обусловленный дополнительным сопротивлением;

Δf_S – расход топлива, обусловленный работой системы;

Δf_W – расход топлива, необходимый для провоза массы системы;

m_{Σ} – установочная масса;

$m_{\text{экв}}$ – эквивалентная масса

t – время полета.

С учетом (2) функция цели для оптимизации системы по критерию минимизации приращения взлетной массы самолета примет вид:

$$m_{\Sigma_{\text{экв}}} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \prod \sum d_i s_i \lambda_i \gamma_i + k_4 \sum d_i + (\Delta f_D + \Delta f_S + \Delta f_W) t \quad (11)$$

– ограничение по суммарной потере давления $\Delta p_{\Sigma} \rightarrow p_{\text{заданное}}$;

– ограничение по потере давления на участке $\Delta p_i \rightarrow p_{i \text{ min}}$;

– ограничение по скорости течения газа $W_i \leq W_{i \text{ заданное}}$;

– ограничения по допустимым напряжениям $\sigma_i \rightarrow \sigma_{\text{допустимое}}$;

– расход газа постоянен по участкам $Q_i = \text{const}$.

Δf_D – оценивается для каждого типа размера применяемого теплообменника;

Δf_S – постоянная для выбранной типа системы и потребляемой мощности;

Δf_W – функции от установочной массы и для каждого типа уточняется по значению;

t – время полета, для которого оптимизируется система.

На основе минимизации выражения (11) и построено оптимальное проектирование бортовых воздушных распределительных сетей, т.е. выбор их основных конструктивных параметров (см. рис. 2).

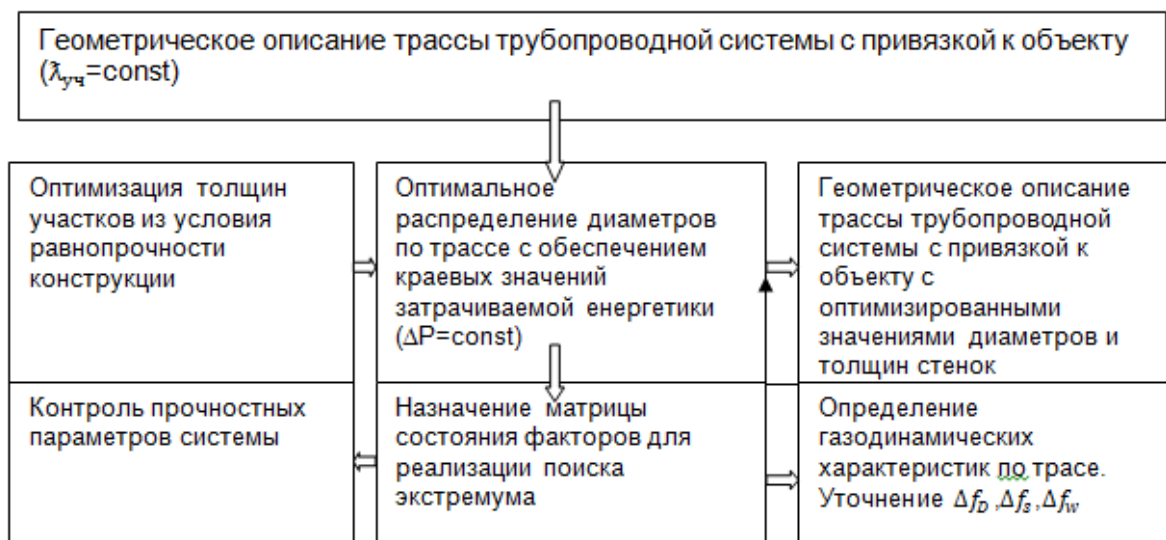


Рис. 2. Блок-схема проектирования комплекса основных параметров трубопроводных сетей.

Учитывая дискретный характер изменения d_i и s_i , а так же дискретное влияние технологических особенностей конструкции, поиск методов оптимизации будем вести в области методов математической статистики, где наибольшее распространение получили:

- метод крутого восхождения (МКВ), относящийся к группе градиентных методов;
- последовательный симплексный метод (ПСМ);
- случайный поиск с использованием $ММТ$ - последовательностей (СП) [2].

Сравнивая указанные методы по критерию поиска глобального экстремума в многомерном факторном пространстве ($K = 20 \dots 100$), необходимо отметить следующее:

1. МКВ базируется на вычислении градиента по экспериментальным исходным данным. В случае плохо обусловленных поверхностей ("овражные", "фиордовые" поверхности откликов) такой метод оптимизации малоэффективен.

2. МКВ и ПСМ обеспечивают поиск в случае многоэкстремальных поверхностей локальных экстремумов. Для поиска оптимального экстремума с использованием этих методов необходимо процесс поиска повторить многократно с различных исходных точек факторного пространства.

3. Для ПСМ в случае длительного проведения отдельного опыта общее время оптимизации может стать не допустимо большим.

4. Эффективность – в смысле достижения глобального экстремума – при использовании СП выше, чем у регулярных методов (МКВ и ПСМ) особенно для случаев с плохо обусловленным факторным пространством, всевозможными ограничениями по факторам, функциям и др. ограничивающим условиям.

5. Эффективность СП – в смысле необходимых затрат на реализацию его процедуры – по сравнению с МКВ и ПСМ выше: с возрастанием числа

факторов K оптимизируемой системы затраты на поиск для МКВ и ПСМ возрастают пропорционально $(K+1)$ (т.е. линейно), а для СП как \sqrt{K} .

6. Использование СП сравнительно просто. Необходимую матрицу знаний факторов для поиска глобального экстремума можно рассчитать на ЭВМ. Число факторов для $ЛПП_\tau$ – последовательностей составляет до 51. Для других равномерно распределенных последовательностей число факторов может быть более 100.

7. Эффективность поиска глобального экстремума СП не уменьшается, если для некоторых сочетаний значений факторов нельзя получить значения откликов.

Многочисленные разновидности СП разработаны с участием и под руководством Растригина Л.А. В них использовались случайные точки для зондирования пространства из таблиц случайных чисел или алгоритмов их получения. Такие числа не проверялись на "равномерность" распределения в факторном пространстве, и эффективность поиска глобального экстремума оставалась не обоснованной.

В работе [3] предложены алгоритмы генерирования пробных точек равномерно расположенных в многомерном кубе. От многомерного куба можно всегда перейти к многомерному параллелепипеду, внутри которого можно расположить интересующую нас область факторного пространства.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ: Последовательность P_1, \dots, P_i, \dots называется равномерно распределенной (РР) в K^n , для любого Π

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{S_N(\Pi)}{N} = V_n, \quad (12)$$

где V_n - объем (n -мерный) параллелепипеда Π ;

$S_N(\Pi)$ - количество точек P_i с номерами принадлежащих Π ;

K^n - факторное пространство размерности n ;

$ЛПП_\tau$ - последовательности «являются наиболее равномерно распределенными среди всех известных в настоящее время последовательностей» [4].

При использовании $ЛПП_\tau$ - последовательностей в СП с алгоритмами набросового типа вероятность попадания хотя бы одной точки в зону экстремума выше, чем у других последовательностей случайных точек при равном количестве пробных точек для сравниваемых последовательностей. «Многочисленные эксперименты, проведенные с целью сравнения $ЛПП_\tau$ -поиска с простейшим случайным поиском, неизменно показывали преимущество $ЛПП_\tau$ -поиска».

В данном случае рассматривается техническая система, к которой всегда предъявляется ряд требований (критериев):

$$Y_1 \rightarrow \max; Y_2 \rightarrow \min; Y_{3 \min} \leq Y_3 \leq Y_{3 \max}; Y_4 \geq Y_{3 \max} \quad \text{и др.}$$

Рассмотрим определение наилучшего (в компромиссном смысле) сочетания критериев качества при многокритериальной оптимизации. Образует пространство критериев качества, оси которого будут выражать критерии качества технической системы. Сочетание любых экстремальных значений критериев качества представляет собой в идеальном случае одну из вершин многомерного параллелепипеда. Однако в общем случае выбор в реальной задаче наилучшего сочетания не возможен из-за противоречивого характера этих критериев друг относительно друга. Поэтому, необходимо выражать одно из реальных сочетаний этих критериев, которое будет наиболее близким идеальному. Такое сочетание и будет компромиссным по Парето. Предположим следующие требования к критериям: $Y_1 \rightarrow \max$, $Y_2 \rightarrow \min$. По матрице плана эксперимента должно быть проведено N опытов. Коэффициенты точек в многофакторном пространстве будут рассчитаны по $ПП_\tau$ - РР последовательностям для факторов рассматриваемой технической системы. Пространство критериев качества для Y_1 , Y_2 показано на рис. 3. Идеальное сочетание критериев качества представляется точкой 2, для которой $Y_1 = \max$, $Y_2 = \min$. Пробные точки в количестве 32, 64, 128 проверяются на предмет близости к идеальному сочетанию, т.е. к точке 2. Одна или несколько точек и будут искомыми.

Схема построения оптимизационного цикла

При организации вычислительного процесса с использованием $ПП_\tau$ - последовательности необходимо учитывать газодинамические особенности течения газа в сетях.

Для течения газа характерно изменение плотности с ростом скорости, что изменяет и саму связь между полными давлениями в рассчитываемых сечениях. С квадратичной зависимости между давлениями для несжимаемой жидкости с ростом скорости показатель падает и для звуковых течений преобразуется в линейную связь.

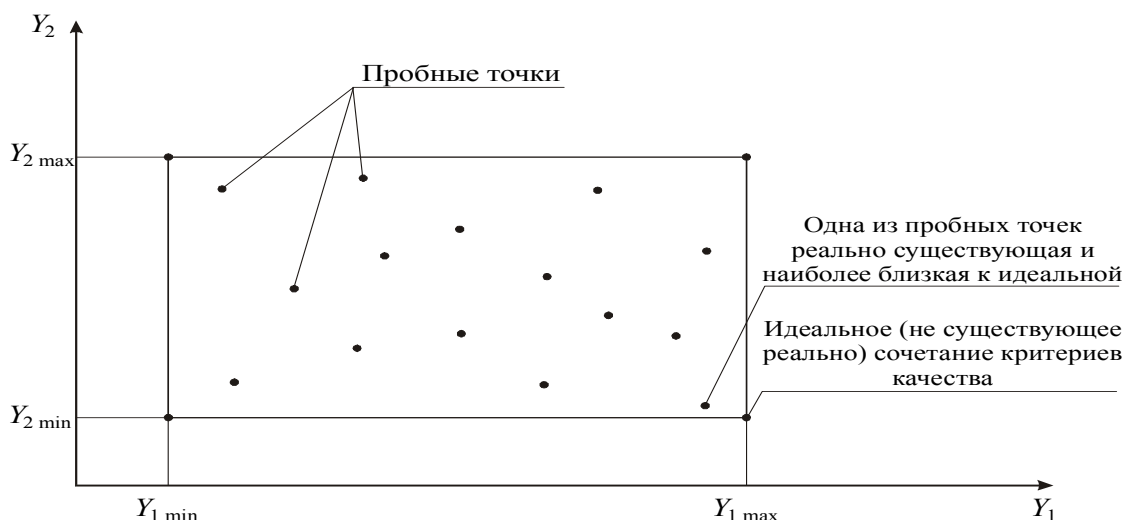


Рис. 3. Пространство критериев качества Y_1 , Y_2

Эта особенность течения газа, а также тот факт, что коэффициент гидравлического сопротивления, в ряде случаев также зависит от скорости течения, предопределяет то, что последовательность исследований для получения оптимальных значений распределений диаметров желательно начинать с малых скоростей течения газа (с больших значений d). Исходные значения диаметров целесообразно назначать из условия равной расчетной скорости течения газа в сечениях. В связи с тем, что до 30% потерь в сетях связаны с потерями на узлах слияния и разделения потока, а коэффициент гидравлического сопротивления тройников

$$\xi_{mp} = f\left(\frac{\sigma_{\delta,o}}{\sigma_{cp}}, \frac{F_{\delta,o}}{F_{cp}}\right), \quad (13)$$

соотношение площадей при анализе не должно сильно плавать, т.е. рассматриваться должна не вся область возможных диаметров, а ближайшие их значения из стандартизованного ряда.

Любую трубопроводную сеть можно описать как сочетание участков с дискретно заданными диаметрами и произвести оптимизацию по сочетанию диаметров, приводящую к минимизации установочной массы.

С этой целью задается для каждого участка 4 значения диаметра первого приближения и с помощью алгоритма генерации последовательности пробных точек создается матрица состояния в $ЛПТ$ - последовательности.

Учитывая значительную степень влияния газодинамических потерь от сочетания расходов и площадей в узлах слияния и разделения потока, а также изменение физического описания процессов при достижении кризисных течений в элементах системы, целесообразно решение по оптимальному распределению диаметров по трассе начинать с геометрического описания системы с $\Delta P_{расч.} \leq \Delta P_{зад.}$ с последующим анализом вариантов по частным производным $\partial m / \partial P$ с использованием метода градиентного спуска в зону удовлетворительных решений.

Схема оптимизации выбора диаметров по разветвленной трассе трубопроводов представлена на рис. 4.

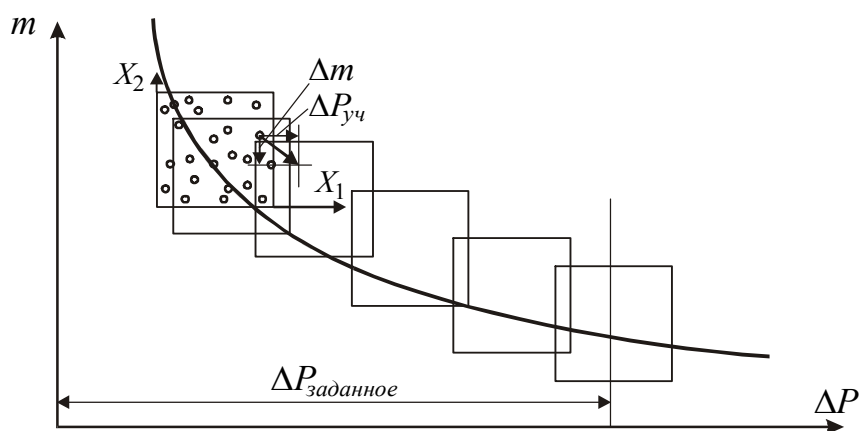


Рис.4. Схема оптимизации выбора диаметров по трассам разветвленных трубопроводов

Оптимальное решение достигается, как правило, за 3...4 смещения матрицы возможных значений диаметров. При этом целесообразно иметь 4 варьируемых диаметра на каждом участке, выстроенных в сторону уменьшения по заданному ряду со вторым значением, равным принятому диаметру предшествующего приближения. В случае достижения ограничения по применению – диаметр этого участка фиксируется. Такая схема расчета потребует от 32 до 96 вариантов газодинамического расчета сети.

С организацией автоматического задания варьируемых параметров и автоматическим анализом полученных вариантов по градиентному методу это не приводит к усложнению инженерного анализа и в вполне обозримое время обеспечивает оптимизацию системы, состоящую из 30...40 участков.

Алгоритм поиска оптимальных решений усложняется не значительно, если для каждого варианта сочетаний диаметров выполнить прочностной контроль системы и оптимизировать толщины входящих элементов. Это приводит только к увеличению машинного времени, но не нарушает общую схему оптимизации.

Построение матрицы состояния факторов для реализации поиска экстремума

Исходными данными для генерации матрицы пробных точек на каждом шаге поиска оптимальных условий являются:

1. N – максимальное число пробных опытов, которое может быть проведено на данном шаге оптимизации.
2. M – число оптимизируемых переменных.
3. $NF1(M)$ – число уровней варьирования по каждой переменной.
4. $FN(K,M)$ – таблица натуральных значений уровней переменных, имеющая вид:

$$\left\{ \begin{array}{cccc} X_{11} & X_{12} & \dots\dots\dots & X_{1m} \\ \vdots & & & \\ X_{k11} & X_{k21} & \dots\dots\dots & X_{km\ m} \end{array} \right\}, \quad (14)$$

где $X_{ki\ i}$ – натуральное значение K -го уровня j -переменной.

Выходом должна быть матрица пробных точек $XW(N,M)$, каждая строчка которой представляет собой условия одного пробного опыта.

Построение матрицы XW происходит по следующему алгоритму.

1. Определяется, каким способом должна быть получена матрица XW .
Для этого вычисляется

$$I = \prod_{j=1}^m NF1(j), \quad (15)$$

т.е. произведение числа уровней варьирования оптимизируемых переменных.

Если $L < N$, то матрица XW может быть получена как матрица полного факторного эксперимента путем полного перебора вариантов и осуществляется переход в п.2 в противном случае матрица строится на основе $ЛПП_\tau$ -чисел (переход в п.3).

2. Построение матрицы XW как полного перебора всех возможных вариантов сочетаний значений переменных. Завершение работы.

3. Построение матрицы пробных точек из N опытов для M переменных, изменяющихся каждая непрерывно в интервале $[0,1]$.

Расчет значений производится по формуле:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^m 2^{-k+1} \left\{ 0,5 \sum_{\ell=k}^m [2\{i \cdot 2^{-\ell}\}] \cdot [2\{r_j^{(\ell)} \cdot 2^{k-1-\ell}\}] \right\}, \quad (16)$$

где $m = 1 + [\ln 1 / \ln 2]$;

$[\cdot]$ - влияние целой части числа;

$\{\cdot\}$ - влияние дробной части числа;

$r_j^{(\ell)}$ - значение из таблицы опорных чисел;

i - номер опыта;

j - номер переменной.

4. Перевод полученной матрицы XW из кодирования переменных к натуральным, изменяющимся дискретно, каждая в заданном таблице FN интервале.

Для этого сначала полученные значения для каждой переменной переводятся из кодированной в натуральную непрерывную область определения. При этом

$$X_{ij} = BL_j + (BH_j - BL_j) \cdot X_{ij},$$

где X_{ij} кодированное значение переменной j в i -ой пробной точке;

BL_j , BH_j нижняя и верхняя границы изменения j -переменной (определяется по таблице FN).

Затем осуществляется переход от непрерывных значений к дискретным.

В качестве фактического значения XW_{ij} принимается такое значение FN_{kj} , для которого $|X_{ij} - FN_{kj}|$ являются минимальными по всем значениям K .

После перевода всех точек работа алгоритма завершается.

Типовые планы пробных точек представлены в табл.1 для матрицы 16×16 и иллюстрируются на рис. 5.

Таблица 1

Рабочая матрица образующей выборки

№	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
3	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2
4	0	2	3	3	2	0	1	1	3	2	2	3	3	0	1	1
5	2	0	1	1	0	2	3	3	1	0	0	1	1	2	3	3
6	1	1	2	0	3	3	0	2	0	3	1	2	0	1	2	0
7	3	3	0	2	1	1	2	0	2	1	3	0	2	3	0	2
8	0	3	2	1	1	0	1	2	2	2	0	1	1	2	1	2
9	2	1	1	2	2	2	3	0	1	1	2	2	3	0	2	1
10	1	1	3	2	1	2	1	1	0	3	2	1	2	2	2	2
11	2	2	1	0	3	1	2	2	2	1	1	3	1	1	0	0
12	1	1	1	2	2	1	0	3	1	0	2	2	2	2	1	2
13	2	2	2	1	0	2	2	1	2	2	1	1	0	1	2	1
14	1	2	0	1	2	3	1	1	3	1	1	2	1	3	3	3
15	3	0	2	3	1	1	2	2	1	2	3	0	2	1	1	1
16	0	2	1	1	1	1	3	1	0	3	1	3	2	2	2	1

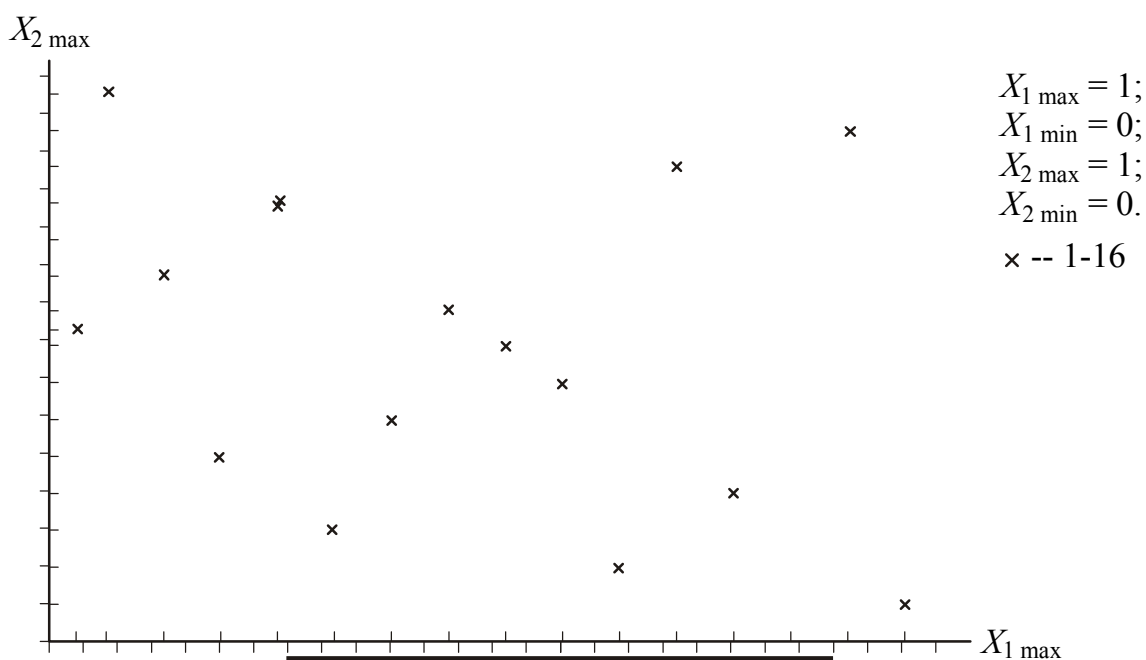


Рис. 5. Типовой план пробных точек

Алгоритм поиска оптимальных конструктивных характеристик

В качестве исходных данных принимаем:

1. Опорное решение X_{on}, Y_{on} .

Определяется конструктором по предварительным расчетам

2. Первоначальная область поиска оптимума $Q_{исх}$.

Также определяется конструктором.

3. Стандартный ряд диаметров труб d .

После принятия исходных данных последовательность действий выглядит в следующем виде:

1. Определение требуемого числа пробных точек N .

Число пробных точек выбирается в зависимости от числа независимых переменных m и номера итерации l .

l/m	1–3	4–8	9–15	16–31	31
1	8	16	32	64	126
2–4	8	8	16	32	64

2. Генерируем матрицу пробных точек.

Матрица пробных точек генерируется как матрица ПФЭ (полного факторного эксперимента), если величина N позволяет это сделать или как последовательность $ПП_t$ -точек в m -мерном пространстве в противном случае.

При этом:

2.1. Если генерация матрицы пробных точек производится не первый раз и область, в которой производится генерация, в точности совпадает с предыдущей, то генерация производится, начиная с $(N_{предш.} + 1)$ -ой точки вне зависимости от алгоритма генерации. Здесь $N_{предш.}$ – общее число сгенерированных пробных точек в данной области пространства на предшествующих шагах оптимизации.

2.2. Если области совпадают не полностью, то производится проверка вновь сгенерированных строчек матрицы с уже полученными на предыдущих этапах. Строки, совпадающие со сгенерированными на предшествующих этапах, в матрицу не включаются.

3. Определяем параметры конструкции и физические показатели качества.

Это производится с помощью математической модели по матрице пробных точек.

4. Цензурируем полученную выборку вычислительного эксперимента.

4.1. Из выборки удаляются точки, в которых вес системы превышает аналогичный показатель в опорном решении.

4.2. Из выборки удаляются точки, в которых расчетное значение ΔP больше заданного ограничения.

4.3. Из выборки удаляются точки, в которых происходит нарушение течения потока (срыв потока, превышение скорости и т.п.).

5. Определяем показатели качества по Парето для всех точек цензурированной выборки.

Обобщенный показатель качества рассчитывается по следующей зависимости:

$$Y_{об.р.} = \sqrt{\sum_{j=1}^m [1 - D_{jp}]^2 - W_j^2}, \quad (17)$$

где $Y_{об.р.}$ - обобщенное значение показателя качества для i -той точки эксперимента;

D_{jp} - приведенное к интервалу 0...1 значение i -го отклика в p -той точке факторного пространства;

W_j - вес i -го отклика (показателя качества);

j - количество показателей качества.

Приведение откликов к интервалу 0...1 проводится по следующим формулам.

Для максимизации

$$D_{jp} = 1 - \frac{Y_{j \max} - Y_{jp}}{Y_{j \max} - Y_{j \min}}, \quad (18)$$

где $Y_{j \max}$ и $Y_{j \min}$ - максимальное и минимальное соответственно значение j -ой функции среди p пробных точек.

Для минимизации

$$D_{jp} = 1 + \frac{Y_{j \min} - Y_{jp}}{Y_{j \max} - Y_{j \min}}, \quad (19)$$

При необходимости размещения отклика в заданном интервале

$$D_{jp} = \begin{cases} 1 - 2 \frac{Y_{ic} - Y_{ip}}{Y_{j \text{вг}} - Y_{j \text{нг}}} & Y_{jp} \in [Y_{j \text{нг}}, Y_{j \text{вг}}] \\ 0 & Y_{jp} > Y_{j \text{вг}}; Y_{jp} < Y_{j \text{нг}} \end{cases} \quad (20)$$

где Y_{jc} - середина заданного интервала для j -го отклика;

$Y_{j \text{нг}}, Y_{j \text{вг}}$ - верхняя и нижняя границы заданного интервала.

6. Определяем наихудшую точку по обобщенному показателю качества в цензурированной выборке.

Выбирается точка, имеющая наименьшее значение показателя качества.

7. Выбираем пять наилучших по обобщенному показателю качества точек в цензурированной выборке.

8. Если хоть одна из них устраивает как окончательное решение, то вычислительный процесс завершается.

9. Строим гистограмму распределения с нулевой точки по "наихудшей" координате в условной системе координат для каждой независимой переменной.

В условной системе координат изменения на 1 соответствует переходу к соседнему большему диаметру трубы по стандартному ряду.

10. Определяем медиану.

11. Если координаты медианы (-1, +1), то изменений не производим.

12. Если координаты медианы по абсолютной величине больше единицы, то определяем моду.

13. Изменяем границы на величину моды.

14. Осуществляем переход в п. 1.

Следует обратить внимание на следующие основные моменты, которые послужили основанием для принятия отдельных решений по описанному алгоритму.

1. В основу алгоритма положен метод случайного поиска. Связано это с тем, что при большом числе независимых переменных (больше 15) и сложном виде зависимости (что имеет место в нашем случае), наиболее эффективным является метод случайного поиска

2. Для генерации последовательностей пробных точек выбран метод $ПП_\tau$ -последовательностей, который обеспечивает наилучшую эффективность разброса пробных точек в многомерном пространстве (при 3-х и более измерениях).

3. Число пробных точек выбирается на основании формулы, приведенной в [3].

$$N = \frac{\ln(1-p)}{1-F}$$

где p - вероятность обнаружения оптимума;

F - доля пространства, в которой находится оптимум.

При этом выдвигается предположение (проверенное на решении реальных задач), что в общем случае с ростом размерности пространства F уменьшается.

4. Цензурирование выборки производится для удаления точек, не удовлетворяющих граничным условиям, или представляющим решение, которое хуже опорного.

5. В связи с наличием векторного критерия качества решения для определения относительной эффективности каждого решения используется принцип Парето и совокупность формул расчета обобщенного критерия качества.

6. При определении направления и величины изменения интервалов определения независимых переменных опирались на следующее предположение: взаимосвязь показателей качества (веса и падения давления) представляет собой гладкую кривую в области, определяемой цензурированной выборкой.

Число анализируемых точек равно 5 – является минимальным числом измерений для сверхмалых выборок. Параметр смещения медианы выбран в связи с тем, что для выборок такого размера среднее является неэффективным. Мода же определяет наиболее вероятное расположение лучшей точки (по данной координате).

Проведенная серия оптимизационных расчетов по воздушным системам показывает, что для системы среднего пассажирского самолета, приведенного на рис. 1, суммарное снижение установочного веса воздушной распределительной сети составляет от 3 до 10% для различных участков по сравнению с предварительной компоновкой.

Выводы:

1. Предложенный метод позволяет оптимизировать параметры воздушных систем с нелинейными характеристиками процессов, протекающих в их элементах.
2. Оптимизация по эквивалентной массе позволяет учесть аэродинамические особенности исполнения различного рода входных устройств для нужд воздушных систем.
3. Метод позволяет вести оптимизационную оценку также различных исполнений воздушных систем по термодинамическому циклу.

Список литературы:

1. Сборник научных трудов ИПМЭ. Вып. 4, 1998 г, г. Киев, 28-38 с. Шмырев В.Ф., Кондратенко В.Я., Радченко С.Г. «Метод оптимизации массовых характеристик воздушных распределительных сетей бортовых энергетических систем».
2. Радченко С.Г., г. Киев ПП «Саспарель», 2005г., 159-169 с. «Устойчивые методы оценивания статистических моделей».
3. Соболев И.М. Точки, равномерно занимающие равномерный куб М; Знание, 1985., 192 с.
4. Соболев И.М., Статников Р.Б. LP- поиск и задачи оптимального конструирования, Рига, Знание, 1972., 317 с.

References

1. Sbornik nauchnyh trudov IPMJe. Vyp. 4, 1998 g, g. Kiev, 28-38 s. Shmyrev V.F., Kondratenko V.Ja., Radchenko S.G. «Metod optimizacii massovyh harakteristik vozdušnyh raspredelitel'nyh setej bortovyh jenergetičeskijh sistem».
2. Radchenko S.G., g. Kiev PP «Sasparel'», 2005g., 159-169 s. «Ustojchivymetody ocenivanija statističeskijh modelej».
3. Sobol' I.M. Točki, ravnomerno zanimajushhie ravnomernyj kub M; Znanie, 1985., 192 s.
4. Sobol' I.M., Statnikov R.B. LP- poisk i zadachi optimal'nogo konstruirovanija, Riga, Znanie, 1972., 317 s.

Поступила в редакцию 05.04.2019, рассмотрена на редколлегии 08.04.2019

Метод оптимізації при проектуванні повітряних розподільних мереж енергетичних систем літака

Зі збільшенням дальності, швидкості і висоти польоту, зі збільшенням числа завдань, що вирішуються авіаційною технікою, розширилися і ускладнилися завдання вирішуються бортовими повітряними розподільними мережами. Так, наприклад, в повітряну розподільчу мережу сучасного транспортного літака входять:

- система кондиціонування кабін;

- система обігріву підпільного простору;
- противообледенительная захист крила і дренажу паливних баків;
- противообледенительная захист повітрязабірника двигуна;
- повітряний запуск двигуна;
- система організованого відсмоктування повітря з відсіку устаткування;
- наддув гідробаків;
- привід турбо-насосної установки;
- наддув радіоапаратури і локатора;
- обігрів відсіку допоміжної силової установки;
- кондиціювання кабін від наземних джерел;
- вентиляція кабін забортним повітрям;
- подача повітря для виробництва нейтрального газу

За конструктивній формі бортові повітряні мережі представляють сукупність теплообмінних апаратів, холодильних турбін, компресорів, фільтрів, обмежувачів і регуляторів, змішувачів, трубопроводів та інших елементів, які взаємодіють між собою і з навколишнім середовищем шляхом обміну потоками робочих тіл, тепла і механічної енергії. Целевое призначення системи реалізується в процесі її функціонування, яке полягає у виробництві на борту і подачі до споживачів робочого тіла, кількість і якість якого определяється зовнішніми характеристиками. Зовнішня характеристика є кількісним виразом мети функціонування системи. Як технічний об'єкт повітряні розподільні мережі характеризуються рядом функціональних показників. Це - надійність і маса системи, витрати енергії і робочих тіл, габарити, зовнішні енерговиділення, запас міцності, вартість і т.п. В практиці створення повітряних розподільних систем при виконанні вимог по холодопродуктивності в подальшому використовують, як правило, такий показник, як "установка "маса, рідше, комплексний -" наведена "маса, з введенням обмежень на інші показники. При проектуванні повітряних розподільних систем пошук компромісу між багатьма суперечливими вимогами: мінімізація настановної маси і втрат енергії, висока надійність систем отказобезопасность, жорсткі просторові обмеження, висока технологічність і порівняно низька вартість виробництва. Залучення методів математичної статистики дозволяє оптимізувати параметри повітряних систем.

Ключові слова: повітряні розподільні мережі, збільшення злітної маси літака, метод крутого сходження, випадковий потік, матриця пробних точок.

Optimization method in the design of air distribution networks of aircraft power systems

Augmentation of the flight range, speed and altitude along with the extension of the number of missions accomplished by aircraft has resulted in the expansion and complication of the functions performed by the aircraft air distribution systems. Thus, for instance, the air distribution system of a modern transport airplane includes:

- cabin air conditioning system;
- underfloor area heating system;
- wing ice protection and fuel tank venting system;
- engine air intake ice protection system;

- engine pneumatic starting system;
- the system of controlled air extraction from the equipment/avionics compartment;
- hydraulic tank pressurization system;
- turbine-driven hydraulic pump drive;
- radio equipment and radar pressurization system;
- auxiliary power unit compartment heating system;
- cabins air conditioning using ground sources;
- cabins ventilation using atmospheric air;
- air supply for inert gas generation

In terms of structure design the aircraft air systems are a complex of heat exchange mechanisms, cooling turbines, compressors, filters, limiters and regulators, mixers, pipelines and other components interacting with each other and with the environment through the exchange of the flows of working media, heat and mechanical energy. The system purpose is implemented in the process of its functioning which implies on-board generation of working medium and its supply to consumers with the quantity and quality of the medium conditioned by external characteristics. External characteristic is a quantification of the purpose of system functioning. As an engineering entity the air distribution systems are characterized by a number of functional indicators. These include the system reliability and weight, expenditure of energy and working medium, overall dimensions, external energy release, factor of safety, cost, etc. In the practical development of air distribution systems, when meeting the cooling performance requirements use is later made, as a general rule, of such indicator as "installation weight", less frequently – of the integrated "reduced" weight indicator with introduction of limitations on other indicators. Designing the air distribution systems involves lookup for a compromise between a number of conflicting requirements: minimization of the installation weight and energy losses, high system reliability, fail safety, rigorous geometric constraints, high manufacturability and comparatively low cost of production. Application of the mathematical statics techniques makes it possible to optimize parameters of the air system.

Key words: air distribution systems, aircraft takeoff weight augmentation, path-of-steepest-ascent method, stochastic flow, sampling point matrix.

Сведения об авторах:

Донец Александр Дмитриевич – Президент ГП «АНТОНОВ», г. Киев, Украина.

Шмырев Владимир Федорович – Первый вице - президент ГП «АНТОНОВ». г. Киев, Украина.