Оптимальний варіант був знайдений після двох порівняно простих ітерацій замість розрахунку 12 варіантів при повному переборі. При рішенні більш складних задач економія значно більша, але при цьому потрібно застосування ЕОМ.

Список літератури

1. *Кесаев Х.В., Трофимов Р.С.* Надежность двигателей летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1982. – 136 с.

2. *Байхельт Ф., Франкен П.* Надежность и техническое обслуживание. Математический подход: Пер. с нем. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.

3. *Каннингхем К., Кокс В.* Методы обеспечения ремонтопригодности: Пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1978. – 312 с.

4. *Калин К.К., Гаганов Г.Г.* Об оценке устойчивости ЦВМ к сбоям. – М.: Сов. радио, 1968.–132 с.

5. *Тамаргазін О.А.* Безумовна оптимізація параметрів системи технічного обслуговування транспортних засобів //Вестн. ХГАДТУ.–Вып. 14. – Харьків:ХГАДТУ, 2001. – С. 76–78.

6. *Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А.* Некоторые математические вопросы теории массового обслуживания сложных систем. – М.: Сов. радио, 1971. – 272 с.

Стаття надійшла до редакції 03.09.01.

УДК 629.735.083(045)

Аль-Навафах Али

ОЦЕНКА ВОЗРАСТАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ПО ЭКПСЛУАТАЦИОННЫМ ДАННЫМ

Рассмотрена методика построения аппроксимации изменения интенсивности отказов изделий авиационной техники по эксплуатационным данным с целью определения ресурса конкретного типа изделия и стратегии его технического обслуживания.

Для назначения агрегату правильного режима обслуживания необходимо оценить интенсивность $\lambda(t)$ и параметр потока $\omega(t)$ отказов, характеризующих влияние наработки на надежность авиационной техники.

При решении практических задач формирования программы технического обслуживания важно знать, возрастает ли интенсивность отказов с увеличением наработки агрегата, начиная с какой наработки эффект возрастания интенсивности отказов становится значимым, какова скорость возрастания интенсивности. Поскольку не обязательно точно знать вид функции $\lambda(t)$, задачу можно решить аппроксимацией реального изменения $\lambda(t)$ упрощенной моделью [1]. Так как все агрегаты проходят начальную приработку на заводе-изготовителе, то учет уменьшения интенсивности отказов на начальном участке эксплуатации в модели $\lambda(t)$ не требуется. Предлагаемая модель $\lambda(t)$ описывается тремя параметрами: начальным уровнем интенсивности отказов λ_0, значением наработки, после которой начинается рост интенсивности отказов b, и темпом нарастания интенсивности отказов λ_1, определяющим, насколько интенсивность отказов в конце ресурса больше начальной:

$$K = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_0} = 1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_0}\left(T_p - b\right),$$

где K – уровень возрастания потока отказов; $T_{\text{р}}$ – межремонтный ресурс.

Полагая, что эти параметры известны, получем:

$$\lambda(t) = \begin{cases} \lambda_0 & \text{при } t \le b; \\ \lambda_0 + \lambda_1 b & \text{при } t > b; \end{cases} \tag{1}$$

$$f(t) = e^{-\int\limits_0^t \lambda(x)dx} = \begin{cases} \lambda_0 e^{-\lambda_0 t} & \text{при } t \le b; \\ \left[\lambda_0 + \lambda_1 (t-b)\right] e^{-(\lambda_0 - \lambda_1 b)t - \frac{\lambda_1}{2\left(t^2+b^2\right)}} & \text{при } t > b; \end{cases} \tag{2}$$

$$\omega_0 = f_0 = \lambda_0;$$

$$\omega_i = \frac{f_i\left(1+\frac{\omega_0\delta t}{2}\right)+\sum_{\nu=1}^{i-1} f_{i-\nu}\omega_\nu\delta t}{1-\frac{f_0\delta t}{2}}, \tag{3}$$

где $f(t)$ – плотность распределения наработки между отказами; ω_i – табулированное значение параметра потока отказов; f_i – табулированное значение плотности распределения наработки; i – количество интервалов табулирования $f(t)$.

С изменением параметров λ_0, b, λ_1 в выражении (1) удается менять и вид функции $\omega(t)$ и, следовательно, подобрать ее так, чтобы она наилучшим образом соответствовала полученной по данным эксплуатации ступенчатой функции ω_i. Для решения этой задачи обозначим через $f(s)$, $\omega(s)$ преобразования Лапласа для функций $f(t)$, $\omega(t)$. Тогда в соответствии с уравнением, приведенным в работе [2], и теоремой о свертке $\int f(t-\tau)\omega(\tau)d\tau \to f(s)\omega(s)$ получим

$$\omega(s) = \frac{f(s)}{1-f(s)}; \tag{4}$$

$$f(s) = \frac{\lambda_0}{\lambda_0+s} + e^{-(\lambda_0+s)b}\left[\frac{s}{\lambda_0+s} - s\sqrt{\frac{2\pi}{\lambda_1}}L\left(\frac{\lambda_0+s}{\sqrt{\lambda_1}}\right)\right],$$

где

$$L(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{\frac{a^2}{2}}\int_0^a e^{-\frac{x^2}{2}}dx \approx 0{,}5\,e^{-0{,}45a}.$$

По формуле (4) получаем аналитическое выражение для преобразования Лапласа от $\omega(t)$:

$$\omega(s) = 1 - \frac{(\lambda_0+s)s^{-1}}{1-e^{-(\lambda_0+s)b}\left[1-(\lambda_0+s)\sqrt{\frac{2\pi}{\lambda_1}}L\left(\frac{\lambda_0+s}{\sqrt{\lambda_1}}\right)\right]}. \tag{5}$$

Найти оригинал $\omega(t)$ по выражению (5) невозможно. Однако для определения на основании параметра потока отказов величин λ_0, b, λ_1 в (1) можно ограничиться получением предельных точек функции $\omega(t)$. Для их вычисления воспользуемся тауберовыми теоремами:

$$\omega(t)_{t\to 0} \to \omega(s)_{s\to\infty}; \qquad \omega(t)_{t\to\infty} \to \omega(s)_{s\to 0}.$$

Из выражения (5) получим:

$$\omega_0 = \lambda_0; \tag{6}$$

$$\omega_\infty = \frac{\lambda_0}{1-e^{-\lambda_0 b}\left[1-\lambda_0\sqrt{\frac{2\pi}{\lambda_1}}L\left(\frac{\lambda_0}{\sqrt{\lambda_1}}\right)\right]}. \tag{7}$$

Формула (6) справедлива при всех $t \le b$, так как до момента начала роста интенсивности отказов при $t = b$ выполняются условия наблюдения потока отказов, порождаемого отказами с постоянной интенсивностью. Формула (7) следует из основной теоремы теории восстановления:

$$\lim_{t\to\infty}\omega(t) = \frac{1}{T_{c\infty}},$$

где $T_{c\infty}$ – налет на один отказ при условии, что время наблюдения намного больше T_c.

Налет на отказ T_c при заданном распределении времени безотказной работы (2) и при условии, что время наблюдения бесконечно, можно получить интегрированием:

$$T_c = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \frac{1}{\lambda_0}\left(1 - e^{-\lambda_0 b}\left[1 - \lambda_0\sqrt{\frac{2\pi}{\lambda_1}}L\left(\frac{\lambda_0}{\sqrt{\lambda_1}}\right)\right]\right).$$

Выражения (6) и (7) дают два уравнения, связывающие три неизвестных параметра λ_0, b, λ_1 с экспериментальными оценками интенсивности потока отказов $\omega(t)$. Левую часть этих уравнений можно получить, усреднив два-три первых для $\omega(0)$ и два-три последних для $\omega(\infty)$ значения оценок ω_i. Если задать значения одного из неизвестных b, то из полученных двух уравнений легко найти значения двух других параметров λ_0 и λ_1, определяющих течение интенсивности отказов $\lambda(t)$. Вычисленные таким образом оценки для λ_0 и λ_1 будут наилучшим образом соответствовать имеющимся исходным данным об отказах. При задании b нетрудно перебрать все возможные варианты его значений $i\Delta t$ при $i = \overline{0, i_{max}}$, так как i_{max} невелико. При этом несколько раз (при разных b) решается одно нелинейное уравнение (7) для поиска λ_1, так как значение λ_0 однозначно определено уравнением (6). В результате этих расчетов получим несколько троек λ_0, b, λ_1, обеспечивающих хорошее соответствие параметра потока отказов $\omega(t)$, подсчитанного по интенсивности (1), и экспериментальной ступенчатой функции ω_i. Из всех возможных вариантов решений λ_0, b, λ_1 теперь необходимо выбрать наилучший. Это осуществляется следующим образом:

– теоретическая функция параметра потока отказов $\omega'(t)$ для любого подходящего выбора λ_0, b, λ_1 определяется с помощью уравнений (2) и (3);

– найденная функция $\omega'(t)$ осреднением на интервалах Δt преобразуется в ступенчатую функцию ω'_i;

– невязка приближения экспериментальных значений λ_0, b, λ_1 определяется с помощью функции ω'_i: $\Delta_\omega = \sum_{i=1}^{i_{max}} (\omega_i - \omega'_i)^2$;

– модель выбирается с такими λ_0, b, λ_1, которые обеспечивают минимизацию невязки Δ_ω.

Существуют несколько методов расчета $\lambda(t)$ по эксплуатационным данным. Каждый из них целесообразно применять для определенных типов агрегатов. На основе анализа наработки на отказ исследуемого агрегата T_c и наработки, в течение которой велись наблюдения, выбирают метод расчета. Время наблюдения задается межремонтным ресурсом $T_р$ и составляет 1 – 20 000 ч. Характеристику надежности T_c определяют предварительно по карточкам регистрации отказов и неисправностей авиационной техники.

Если $T_c/T_р < 0{,}7$, то за время наблюдения удается получить достаточно много сообщений об отказах, так как выйдет из строя большая часть агрегатов исследуемого типа. Интенсивность $\lambda(t)$ таких агрегатов хорошо подсчитывается по первым их отказам с помощью методики, описанной в работе [2]. Потеря сообщений о повторных отказах не приводит к значительному снижению точности определения $\lambda(t)$.

Если $T_c/T_р > 4$, т.е. за время наблюдения $T_р$ приходит мало сообщений об отказах агрегатов исследуемого типа, то для таких высоконадежных образцов авиационной техники можно принять $\lambda(t) = \omega(t)$.

В область между $T_c/T_р = 0{,}7$ и $T_c/T_р = 4$ попадают агрегаты средней надежности, для которых необходимо при расчете $\lambda(t)$ учитывать сообщения о повторных отказах, так как это может отразиться на точности оценки интенсивности.

Предлагаемая методика вычисления $\lambda(t)$ применялась при обработке сведений об отказах широкого круга агрегатов в национальной авиакомпании Иордании. Результаты расчетов некоторых изделий самолетов В-737-300 приведены в табл.1.

Из всех исследуемых агрегатов около четверти попадают в группу объектов средней надежности, для которых целесообразно вычислять $\lambda(t)$ подбором параметров в модели (1). Хотя агрегаты средней и низкой надежности составляют менее трети всех агрегатов, на них приходится более 75 % всех отказов. Следовательно, именно они во многом определяют уровень надежности воздушного судна в целом и им следует уделить наибольшее внимание при анализе надежности самолета и назначении системы его технического обслуживания.

Эффект старения наблюдался у 37 % агрегатов планера, 17 % в приборном оборудовании, 28 % в электрооборудовании и 42 % в радиоэлектронном оборудовании самолетов. К числу стареющих относились агрегаты, для которых $\lambda(t)$ хорошо аппроксимируется функцией, имеющей $b < T_р$ и $\lambda_{max}/\lambda_0 > 5$. Параметры, определяющие интенсивность отказов некоторых стареющих агрегатов, приведены в табл.1. Наибольшее число стареющих агрегатов выявлено в механических элементах и радиоэлектронном оборудовании. Это объясняется наличием в блоках радиоэлектронного оборудования электронных элементов с возрастающей интенсивностью отказов и изнашивающихся электромеханических узлов в антеннах и установках охлаждения.

С целью контроля работоспособности предлагаемого метода, позволяющего путем подбора λ_0, b, λ_1 идентифицировать стареющие агрегаты, для нескольких типов изделий были проведены расчеты приведенным методом и методом, описанным в работе [1]. Из табл. 2 видно, что критерий идентификации стареющих агрегатов в большинстве случаев подтверждает гипотезу о нарастании $\lambda(t)$, обнаруживаемую по параметрам λ_0, b, λ_1. Расхождение результатов расчетов отмечалось только для агрегатов с сильным цензурированием.

Контрольные расчеты $\lambda(t)$ по первым отказам проводились для агрегатов, относящихся к группе низкой надежности ($T_с/T_р < 0{,}7$). В целом оценка $\lambda(t)$ обоими методами дает одинаковые результаты, что подтверждает эффективность подбора параметров λ_0, b, λ_1 для характеристики тенденций изменения надежности авиационной техники. Это позволяет использовать предлагаемую методику оценки $\lambda(t)$, отличающуюся простотой реализации, вместо традиционной трудоемкой методики подбора закона распределения интенсивности отказов.

Таблица 1

Результаты расчета параметров модели изменения интенсивности отказов

Система	Агрегат	$\frac{T_с}{T_р}$	$\lambda_0 \cdot 10^{-4}$, ч$^{-1}$	$\lambda_1 \cdot 10^{-6}$, ч$^{-2}$	b, ч	$\frac{\lambda_{max}}{\lambda_0}$
Планер	Обшивка воздухозаборника гондолы двигателя	0,75	5,60	1,25	800	3,7
	Нажимное устройство концевика	0,65	1,60	0,77	600	8,5
	Створка основной стойки	2,60	0,40	0,90	400	28,0
	Крепление цилиндра подъемника основной стойки	5,40	0,15	0,30	1400	12,0
	Турбохолодильник	0,57	1,20	7,10	1800	5,1
Электрооборудование	Датчик торможения колес	2,80	0,30	0,80	1000	31,0
	Блок реле управления двигателями	2,70	0,30	0,60	600	30,0
Приборное оборудование	Лентопротяжный механизм регистратора	1,60	0,90	1,70	1000	22,0
	Гироагрегат	1,30	1,00	2,50	600	31,0
	Вычислитель высоты и скорости	1,40	0,40	0,90	400	32,0
	Указатель топливомера	1,20	1,50	6,00	1800	28,0
Радиоэлектронное оборудование	Радиосвязная станция	2,20	0,46	1,70	1600	31,0
	Блок приемопередатчика	1,70	3,00	8,00	2600	9,0
	Радиокомпас	0,34	16,00	90,00	2200	28,0
	Доплеровский измеритель скорости	0,90	4,00	7,00	600	31,0

Таблица 2

Результаты идентификации стареющих агрегатов

Агрегат	ν_n	$M\nu_n$	$\sqrt{D\nu_n}$	n	Подтверждение гипотезы	$\frac{\lambda_{max}}{\lambda_0}$
Втулка подшипника колеса основной стойки	0,77	0,71	0,21	32	Нет	1,0
Обшивка воздухозаборника гондолы двигателя	0,73	0,66	0,24	142	Да	3,7
Нажимное устройство концевика	0,75	0,58	0,24	43	Да	7,9
Створка основной стойки	0,80	0,74	0,23	71	Да	28,0
Крепление цилиндра подъемника основной стойки	0,73	0,69	0,26	20	Нет	12,0

Полученную по сведениям об отказах в эксплуатации оценку $\lambda(t)$ в рамках модели (1) можно использовать для обоснования ресурса стареющих агрегатов, который назначается так, чтобы максимизировать коэффициент оперативной готовности.

Вероятность исправного состояния системы в произвольный момент t и ее способность безотказно проработать в течение полета $t_п$ обозначим $P(t_п,t)$ Полагаем, что восстановление свойств системы приводит к потерям C_3, если ее замена проводится в плановом порядке, и к потерям C_4, если заменяется отказавшая в процессе эксплуатации система.

До отказа в момент $T_р$ необходимо заменять такие элементы или системы, интенсивность отказов которых $\lambda(t)$ возрастает. Если система эксплуатируется достаточно долго, то критерием правильной организации ее обслуживания следует считать предельное значение коэффициента оперативной готовности $P(t_п) = \lim\limits_{t\to\infty} P(t_п, t)$, которое определяется надежностью $F(t)$ и ресурсом $T_р$. Такой критерий определяет и способ измерения потерь: $C_3 = T_3$, (T_3 – время, необходимое для замены исправного элемента, выработавшего расчетный ресурс $T_р$), $C_4 = T_4$, (T_4 – время, необходимое для замены элемента, отказавшего в процессе работы). На основании узловой теоремы восстановления:

$$P(t_п, t) = \frac{1}{\mu} \int\limits_0^{T_р} \left[1 - F(t + t_п)\right] dt. \tag{8}$$

Математическое ожидание интервала между заменами системы из-за отказа либо по ресурсу:

$$\mu^{-1} = \int\limits_0^{T_р} \left[1 - F(t)\right] dt + T_3\left[1 - F(T_р)\right] + T_4 F(T_р), \tag{9}$$

где первое слагаемое – математическое ожидание времени работы без отказов до момента замены, второе – среднее время, затраченное на замены по ресурсу, и третье – среднее время, затраченное на замены вследствие отказов.

Подставив выражение (9) в формулу (8) и приравняв нулю производную по $T_р$ от этого выражения, получим уравнение определения ресурса, который необходимо установить, чтобы агрегат имел максимально возможный коэффициент оперативной готовности [1]. Это уравнение при условии, что $1 - F(t + t_п) \approx 1 - F(t) - f(t)t_п$, так как $t_п \ll \int\limits_0^{T_р} \left[1 - F(t)\right] dt$, имеет вид:

$$F(T_р) - \lambda(T_р)\left[\int\limits_0^{T_р} \left[1 - \mathrm{F}(t)\right] dt - \frac{T_3 t_п}{T_4 - T_3 + t_п}\right] + \frac{T_3}{T_4 - T_3 + t_п} = 0. \tag{10}$$

Уравнение (10) нетрудно решить с помощью MathCad относительно $T_р$, если известна априорная характеристика надежности эксплуатируемой системы $\lambda(t)$. Проанализируем решение $\lambda(t)$ вида (1):

$$F\left(T_{\text{р}}\right)=\int_{0}^{T_{\text{р}}} f(t)dt = 1-e^{-(\lambda_0-\lambda_1 b)T_{\text{р}}-\frac{\lambda_1}{2\left(b^2+T_{\text{р}}^2\right)}},\ \text{если}\ T_{\text{р}} > b;$$

$$\int_{0}^{T_{\text{р}}}\left[1-F(t)\right]dt = \int_{0}^{\infty}\left[1-F(t)\right]dt - \int_{T_{\text{п}}}^{\infty} e^{\left[-\frac{\lambda_0-\lambda_1(b-t)}{\sqrt{2\lambda_1}}\right]^2} e^{\left[\frac{\lambda_0-\lambda_1(b-T_{\text{р}})}{\sqrt{2\lambda_1}}\right]^2} e^{-\lambda_0 T_{\text{р}}+\frac{\lambda_1 T_{\text{р}}}{2}\left(b-T_{\text{р}}\right)^2} dt.$$

С помощью замены переменной $x=\dfrac{\lambda_0-\lambda_1(b-t)}{\sqrt{\lambda_1}}$ интеграл в правой части приводится к виду, обозначенному ранее $L(a)$. Тогда

$$\int_{0}^{T_{\text{р}}}\left[1-F(t)\right]dt = T_{\text{c}}^{\text{T}_{\text{р}}} = T_{\text{c}}^{\infty} - e^{-\bar{\lambda}T_{\text{р}}\sqrt{\frac{2\pi}{\lambda_1}}L\left(\frac{\lambda_{\max}}{\sqrt{\lambda_1}}\right)},$$

где
$$\bar{\lambda}=\lambda_0+\frac{\lambda_1\left(T_{\text{р}}-b\right)}{2},\ \lambda_{\max}=\lambda_0+\lambda_1\left(T_{\text{р}}-b\right),$$

а уравнение (10) примет вид:

$$1-e^{-\lambda_0 b+\lambda_0\left(b-T_{\text{р}}\right)-\frac{\lambda_1}{2}\left(T_{\text{р}}-b\right)^2}-\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_0}\left\{1-\frac{T_3 t_{\text{п}}\lambda_0}{T_4-T_3+t_{\text{п}}}-e^{-\lambda_0 b}+\lambda_0\sqrt{\frac{2\pi}{\lambda_1}}\left[e^{-\lambda_0 b}L\left(\frac{\lambda_0}{\sqrt{\lambda_1}}\right)\right]\right\}+$$
$$+\frac{T_3}{T_4-T_3+t_{\text{п}}}=0. \qquad (11)$$

При анализе решений уравнения (11) следует учитывать, что вероятность отказа систем в полете $P_{\text{п}}\approx\lambda_0 t_{\text{п}}$ всегда много меньше единицы, поэтому вторым членом в фигурной скобке можно пренебречь. Поскольку, как правило, $T_4 \gg T_3$ последний член в формуле (11) приблизительно равен T_3/T_4.

Принятая модель изменения $\lambda(t)$ позволяет оценить ресурс $T_{\text{р}}$ по возрастанию интенсивности отказов в период разрешенной эксплуатации K. Сумма в показателе степени второго члена выражения (11) характеризует вероятность отказа системы до замены ее по ресурсу. Первое слагаемое в ней $P_1=\lambda_0 b$ примерно равно относительной доле систем, заменяемых до момента b начала возрастания интенсивности отказов. Второе и третье преобразованные слагаемые $P_2=0{,}5(T_{\text{р}}-b)(K+1)\lambda_0$ определяют долю систем, замененных после начала возрастания потока отказов. С учетом этого можно записать уравнение (10) в виде, более удобном для анализа:

$$1-e^{-P_1-P_2}-K\left\{1-e^{-P_1}-1{,}25\sqrt{\frac{2P_2}{K^2-1}}\left[e^{-P_1}e^{-0{,}45\sqrt{\frac{2P_2}{K^2-1}}}e^{-P_1-P_2}e^{-0{,}45K\sqrt{\frac{2P_2}{K^2-1}}}\right]\right\}+\frac{T_3}{T_4}=0,$$

где
$$\frac{\lambda_0}{\sqrt{\lambda_1}}=\sqrt{\frac{2P_2}{K^2-1}},\ \frac{\lambda_{\max}}{\sqrt{\lambda_1}}=K\sqrt{\frac{2P_2}{K^2-1}},\ \bar{\lambda}T_{\text{р}}=P_1+P_2.$$

Допустимый уровень возрастания потока отказов K определяется в основном безотказностью P_1 и P_2. Когда $(P_2+P_1)<0{,}2$, последнее слагаемое в фигурной скобке мало отличается от нуля, поэтому

$$K\approx\frac{1+\frac{T_3}{T_4}e^{-P_1-P_2}}{1-e^{-P_1}}.$$

Из анализа этой зависимости следует, что допустимое увеличение интенсивности отказов в конце ресурса тем меньше, чем меньше трудозатраты на замену изделий во время профилактических работ T_3 по сравнению с затратами из-за отказов в процессе применения T_4.

При фиксированной доле объектов, снимаемых с эксплуатации в течение заданного ресурса, допустимое с точки зрения оптимизации коэффициента оперативной готовности увеличение интенсивности отказов $K = \lambda_{max}/\lambda_0$ тем больше, чем больше P_2.

Список литературы

1. *Барзилович Е.Ю.* Модели технического обслуживания сложных систем. – М.: Высш. шк., 1982. – 308 с.

2. *Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д.* Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 524 с.

Стаття надійшла до редакції 06.07.01.

УДК 621.515-226.2

Ю.М. Терещенко, В.М. Дихановський, Л.Г. Волянська

ТЕЧІЯ В'ЯЗКОГО СТИСНЕНОГО ГАЗУ НАВКОЛО ЩІЛИННИХ ЛОПАТОК ПЛОСКИХ КОМПРЕСОРНИХ РЕШІТОК

Викладено результати розрахунків течії в'язкого стисненого газу навколо суцільних та щілинних лопаток плоских компресорних решіток. Порівняння результатів розрахунків свідчить про досить добру збіжність результатів розрахунків з даними експериментальних досліджень, а також значне збільшення діапазону стійкого обтікання щілинної решітки.

Аеродинамічне удосконалення компресорів є одним із шляхів рішення загальної проблеми підвищення ефективності авіаційних газотурбінних двигунів, оскільки як на розрахунковому, так і на нерозрахункових режимах ефективність роботи компресорів визначається рівнем втрат в проточній частині. Особливе місце в рішенні проблеми удосконалення характеристик компресорів займають питання зриву потоку в лопаткових вінцях на нерозрахункових режимах. Зрив потоку є однією з головних причин, які знижують ефективність газотурбінних двигунів на нерозрахункових режимах роботи, оскільки призводить до зниження напорності і ККД компресора, виникнення зриву, який обертається, виникнення помпажу тощо. У зв'язку з цим однією з важливих задач аеродинамічного удосконалення лопаткових машин є попередження зривного обтікання лопаткових вінців і зниження рівня втрат, що обумовлені нерозрахунковістю течії та аеродинамічними слідами.

При аеродинамічному удосконаленні компресорів досить широко використовується дослідження течії навколо плоских компресорних решіток. Це дозволяє спростити розрахунок течії й виділити відрив потоку як окреме явище. Для переходу від течії у лопатковому вінці осьового компресора до течії навколо плоскої компресорної решітки поверхня току у вінці апроксимується циліндричною або конічною поверхнею. Ця поверхня розгортається на площину, і далі досліджується тільки течія навколо плоских компресорних решіток, які мають геометричні параметри, еквівалентні лопатковому вінцю.

В плоскій компресорній решітці на передзривних режимах обтікання тиск в пограничному шарі на спинці лопатки в напрямі потоку збільшується, течія загальмовується, і її кінетичної енергії не вистачає для подолання позитивного в напрямі потоку градієнта тиску на спинці лопатки. На рис.1,*а* показаний характер зміни профілю швидкості на спинці лопатки залежно від градієнта тиску в пограничному шарі. Внаслідок цього при великих кутах атаки відбувається відрив потоку.

Зрив можна не допустити або локалізувати, а інтенсивність аеродинамічних слідів за вихідною кромкою лопатки можна зменшити застосуванням енергетичних методів дії на течію в пристінних шарах, наприклад, вдуванням газу в пограничний шар або відсмоктуванням з пограничного шару. На рис. 1,*б* показаний характер зміни профілю швидкості на спинці лопатки при вдуванні та відсмоктуванні.