

## НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АГРЕГАТОВ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2007 М. И. Соколов

Филиал Красноярского государственного технического университета, г. Железногорск

Исследуются взаимосвязи показателей эффективности малорасходных вентиляторов и электронасосных агрегатов космических аппаратов, их зависимость от конструктивных параметров элементов и технологических условий эксплуатации. Особенности исследуемых систем предполагают использование непараметрических методов обработки информации. Анализируются результаты вычислительных элементов с целью определения эффективных режимов эксплуатации агрегатов.

### Введение

С развитием науки и техники человечество шагнуло в эру космических технологий. За рубежом развитие космической техники пошло по пути создания дорогостоящей бортовой аппаратуры, работающей в открытом космосе и не требующей искусственного конвективного теплообмена. Однако для долговременных орбитальных станций и продолжительных пилотируемых полетов необходимо иметь на борту малорасходные вентиляторы на длительный ресурс непрерывной работы в экстремальных условиях микрогравитаций, температурных и механических воздействий, а также космических излучений.

В данной работе разрабатываются и исследуются непараметрические модели оценки показателей эффективности малорасходных вентиляторов и электронасосных агрегатов спутников связи, включая их зависимость от конструктивных параметров рабочих элементов и технологических условий эксплуатации. Полученные результаты вычислительного эксперимента и программные средства могут быть использованы в качестве рекомендаций для принятия решений при выборе технических узлов спутников связи.

### Постановка задачи

Объектом исследования являются конструктивные особенности малорасходных вентиляторов спутников связи. Изучаются взаимосвязи между параметрами: коэффициентом  $\Pi_6$ , темпераментом  $S$ , отношением ди-

намического давления к статическому

$\frac{P_{дин}}{P_{ст}}$ , коэффициентом полезного действия (КПД)  $h$ , расходом рабочего тепла  $Vp$ , скоростью вращения электродвигателя  $s$ , потребляемым током  $I$ , весом аппарата  $p$ . В качестве выходной переменной  $y$  может выступать любой из переменных признаков.

Безразмерный коэффициент  $\Pi_6$  представляет собой удельную полезную мощность на ометаемую площадь и массу подаваемого рабочего тела при конкретной частоте вращения вала. Темперамент вентилятора  $S$  – безразмерный параметр, определяющий соотношение кинетической энергии потока рабочего газа к его потенциальной энергии.

В результате экспериментальных работ получена статистическая выборка независимых наблюдений параметров вентилятора. В общем случае статистическая модель изучаемой системы представляется нелинейной стохастической зависимостью

$$y = j(x) \forall x \in R^k, \quad (1)$$

где вид однозначного преобразования  $j(x)$  и плотностей вероятности  $p(x)$ ,  $p(x, y)$  неизвестен.

Вторая часть исследований направлена на изучение влияния модификаций профиля лопаток рабочего колеса на коэффициент полезного действия электронасосных агрегатов спутника связи. Рассматриваются следующие профили лопаток рабочего колеса: кри-

волинейные с углом наклона на выходе 90° (штатные), углом наклона 30° и прямые.

Априорная неопределенность изучаемой стохастической зависимости и малый объем экспериментальных данных требуют применения адекватных математических средств оценивания показателей эффективности объекта исследования. Предлагается использовать непараметрические модели коллективного типа для описания взаимосвязи показателя эффективности электронасосного агрегата от конструктивных параметров рабочих колес и технологических условий его эксплуатации. Преимущество предлагаемых моделей заключается в максимальном учете информации исходных обучающих выборок.

При этом входными параметрами ( $x_n, n = \overline{1,5}$ ) являются: напряжение питания ( $U_{num}$ ), температура рабочей жидкости ( $T_{pжс}$ ), перепады давления от минимального до максимально возможных ( $\Delta P$ ), частота фазного сигнала ( $f$ ) и скорость вращения ( $s$ ). Выходной переменной  $y$  изучаемой системы является КПД:

$$h = \frac{\Delta P \cdot Q}{U_{num} \cdot I},$$

где  $I$  – ток потребления;  $Q$  – объемный расход теплоносителя.

Пусть в результате экспериментальных работ получена выборка

$$V = (x_n^i, y^i, i = \overline{1, n}, n = \overline{1, k})$$

независимых наблюдений параметров электронасосного агрегата. В общем случае статистическая модель изучаемой системы представляется нелинейной стохастической зависимостью (1).

В связи с малым объемом выборки и большим количеством признаков адекватным методом восстановления зависимостей (1) являются использование метода группового учета аргументов (МГУА) [1] и непараметрических моделей коллективного типа [2].

### Непараметрические методы обработки информации

Метод группового учета аргументов. Рассматриваемый метод предназначен для

восстановления стохастических зависимостей в условиях малых выборок, когда отношение  $n/k$  соизмеримо с единицей. Его идея состоит в формировании процедуры последовательной аппроксимации путем управляемого расширения пространства аргументов.

Рассмотрим этапы формирования моделей.

1. На основе обучающей выборки  $V = (x_n^i, y^i, n = \overline{1, k}, i = \overline{1, n})$  построить модель  $y_1 = j_1(x_0, x_d)$  искомой зависимости  $y = j(x_1, \dots, x_k)$  как функцию двух компонент  $x_0, x_d$ , дающих наилучшее приближение.

Для построения модели  $\bar{y}_1 = \bar{j}_1(x_0, x_d)$  используем непараметрическую регрессию [2]

$$\bar{j}_1(x_0, x_d) = \frac{\sum_{i=1}^n y^i \Phi\left(\frac{x_0 - x_0^i}{s_0 c}\right) \Phi\left(\frac{x_d - x_d^i}{s_d c}\right)}{\sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{x_0 - x_0^i}{s_0 c}\right) \Phi\left(\frac{x_d - x_d^i}{s_d c}\right)}, \quad (2)$$

где  $s_0, s_d$  – оценки среднеквадратических отклонений признаков  $x_0, x_d$ :

$$s_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x}_n^i - x_n)^2}, \quad n = 0, d;$$

$\bar{x}_n^i$  – среднее значение  $x_n$ . В качестве ядерной функции выбираем ядро Епанечникова, оптимальное в смысле среднеквадратического критерия.

2. На  $i$ -й интеграции синтеза модели по выборке  $V_i = (\bar{y}_{t-1}^i, x_n^i, i = \overline{1, n})$  построить модель  $\bar{y}_t = \bar{j}_t(\bar{y}_{t-1}, x_n)$ , где  $x_n$  – ранее не используемый компонент вектора  $x$ , обеспечивающий в паре с  $\bar{y}_{t-1}$  наилучшее приближение восстанавливаемой зависимости. На этом этапе непараметрическая модель  $\bar{j}_t(\bar{y}_{t-1}, x_n)$  принимает вид

$$\bar{j}(y_{t-1}, x_n) = \frac{\sum_{i=1}^n y^i \Phi\left(\frac{x_n - x_n^i}{s_n c}\right) \Phi\left(\frac{\bar{y}_{t-1} - \bar{y}_{t-1}^i}{s_{t-1} c}\right)}{\sum_{i=1}^n \Phi\left(\frac{x_n - x_n^i}{s_n c}\right) \Phi\left(\frac{\bar{y}_{t-1} - \bar{y}_{t-1}^i}{s_{t-1} c}\right)}. \quad (3)$$

Процесс формирования модели (реализация этапа 2) продолжается до тех пор, пока не будет достигнута приемлемая для исследователя точность аппроксимации.

Оптимизация непараметрических моделей (2), (3) ( $\bar{y}_t, t = \overline{1, T}$ ) по параметру размытости осуществляется из условия минимума, например, средней относительной ошибки аппроксимации

$$W(c) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left| \frac{y^j - \bar{j}_t(x^j, \bar{y}_{t-1}, c)}{y^j} \right|. \quad (4)$$

*Непараметрические модели коллективного типа.* Идея рассматриваемого подхода состоит в построении системы упрощенных параметрических моделей зависимости (1) относительно некоторого набора точек из обучающей выборки с последующей их организацией в коллективе на основе методов непараметрической статистики.

Поставим в соответствие некоторой точке  $(x^i, y^i)$  обучающей выборки  $V$  аппроксимацию  $j_i(x, \bar{a}^i)$  зависимости (1), параметры  $\bar{a}$  которой удовлетворяют условиям:

$$y^i = j_i(x^i, \bar{a}^i),$$

$$\bar{a}^i = \arg \min_{\bar{a}^i} \frac{1}{n-1} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (y^j - j_i(x^j, \bar{a}^i))^2, \quad i = \overline{1, N}. \quad (5)$$

Упрощенные аппроксимации  $j_i(x, \bar{a}^i)$  проходят через опорные точки  $(x^i, y^i, i = \overline{1, N})$  и близки в среднеквадрати-

ческом к остальным элементам обучающей выборки  $V$ .

Для линейных упрощенных аппроксимаций

$$j_i(x, \bar{a}^i) = \sum_{n=1}^k a_n^i x_n + b^i. \quad (6)$$

Параметр  $b^i = y^i - \sum_{n=1}^k a_n^i x_n^i$ , а коэффициенты  $a_n^i, n = \overline{1, k}$  находятся из условия минимума критерия

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left[ (y^j - y^i) - \sum_{n=1}^k a_n^i (x_n^j - x_n^i) \right]^2, \quad (7)$$

В качестве статистической модели зависимости (1) примем процедуру условного усреднения

$$\bar{y} = \bar{j}(x) = \sum_{i=1}^N j_i(x, \bar{a}^i) I^i(x), \quad (8)$$

где положительная, ограниченная значением единица функция  $I^i(x)$  определяет «вес» правила  $j_i(x, \bar{a}^i)$  при формировании решения в ситуации  $x$ :

$$I^i(x) = \frac{\prod_{n=1}^k \Phi\left(\frac{x_n - x_n^i}{c_n}\right)}{\sum_{i=1}^N \prod_{n=1}^k \Phi\left(\frac{x_n - x_n^i}{c_n}\right)}. \quad (9)$$

Непараметрическая модель коллективного типа (5) допускает представление

$$\bar{y} = \tilde{f}(x) + \bar{z}(x), \quad (10)$$

где первое слагаемое  $\tilde{f}(x)$  является непараметрической регрессией, построенной по опорным точкам, а второе  $\bar{z}(x)$  играет роль поправочного члена и отражает условную взаимосвязь между точками обучающей выборки, значения которого снижаются по мере

роста объема исходной информации. Наличие поправочного члена делает коллектив (5) схожим с гибридными моделями, а слабая зависимость его свойств от вида опорных функций – с непараметрической регрессией.

### Результаты вычислительного эксперимента

Применение непараметрических коллективов позволяет использовать не только информацию о локальном поведении восстанавливаемой зависимости, но и вскрывать ее относительные интегральные свойства, содержащиеся в обучающей выборке.

*Исследование взаимосвязи между параметрами малорасходных вентиляторов.*

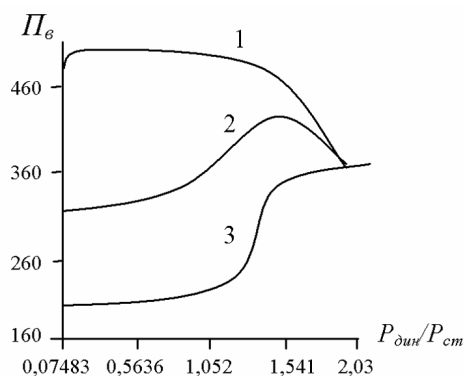


Рис. 1. Зависимость коэффициента  $\Pi_e$  от отношения  $P_{дин}/P_{см}$ : кривая 1 получена при показателе «температур»  $s = 142$  и скорости вращения электродвигателя  $s = 4000$  об/мин; кривая 2 при  $s = 100$  и  $s = 3000$  об/мин; кривая 3 при  $s = 65$  и  $s = 2500$  об/мин

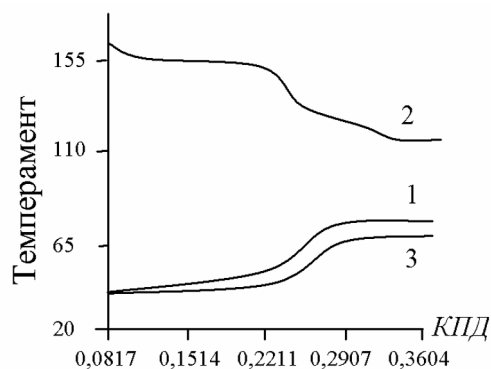


Рис. 3. Зависимость показателя «температур» от КПД: кривая 1 –  $\Pi_e = 300$ ,  $P_{дин}/P_{см} = 0,7$  и  $V_p = 0,1$ ; кривая 2 –  $\Pi_e = 300$ ,  $P_{дин}/P_{см} = 1,5$  и  $V_p = 0,08$ ; кривая 3 –  $\Pi_e = 150$ ,  $P_{дин}/P_{см} = 0,4$  и  $V_p = 0,05$

Объем экспериментальных данных составлял 10 наблюдений, причем каждое соответствовало конкретному вентилятору, характеризующемуся семью показателями эффективности. В ходе вычислительного эксперимента в качестве значений функции выбирался один из семи показателей, остальные составляли набор ее аргументов. При моделировании взаимосвязи между входными и выходными переменными изучаемого объекта было установлено, что некоторые признаки давали большую ошибку аппроксимации, и поэтому при повторном эксперименте такие признаки для данной выходной переменной не учитывались. Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 1–13.

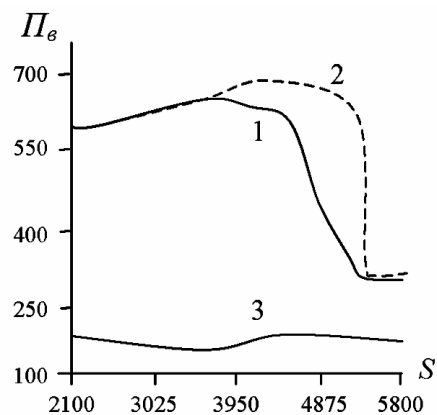


Рис. 2. Зависимость коэффициента  $\Pi_e$  от скорости вращения электродвигателя  $s$ : кривая 1 соответствует  $s = 100$  и  $V_p = 0,12$ ; кривая 2 –  $s = 100$  и  $V_p = 0,09$ ; кривая 3 –  $s = 60$  и  $V_p = 0,1$

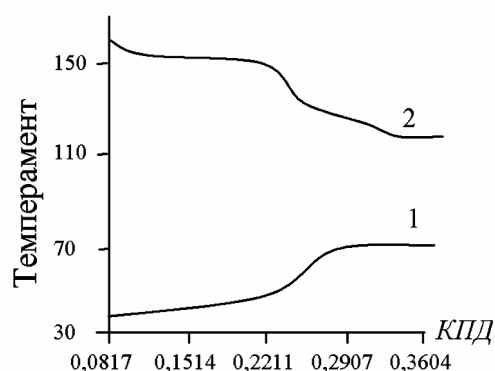


Рис. 4. Зависимость показателя «температур» от КПД: кривая 1 –  $\Pi_e = 500$ ,  $P_{дин}/P_{см} = 0,5$  и  $V_p = 0,05$ ; кривая 2 –  $\Pi_e = 500$ ,  $P_{дин}/P_{см} = 1$  и  $V_p = 0,05$

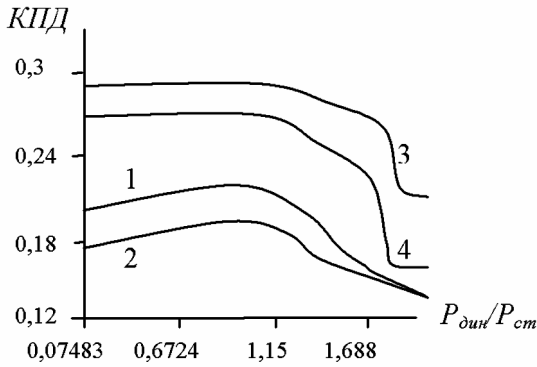


Рис. 5. Зависимость коэффициента полезного действия от отношения  $P_{\text{двн}}/P_{\text{ст}}$ :  
 кривая 1 соответствует значениям  $\Pi_6 = 300$ ,  $s = 140$  и  $V_p = 0,06$ ;  
 кривая 2 – значениям  $\Pi_6 = 500$ ,  $s = 140$  и  $V_p = 0,06$ ;  
 кривая 3 – значениям  $\Pi_6 = 300$ ,  $s = 75$  и  $V_p = 0,06$ ;  
 кривая 4 – значениям  $\Pi_6 = 300$ ,  $s = 140$  и  $V_p = 0,1$

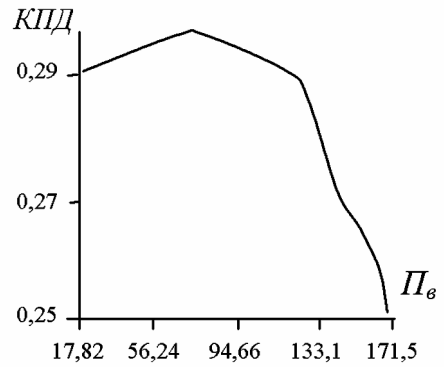


Рис. 6. Зависимость коэффициента  $\Pi_6$  при массе аппарата  $p = 3$  кг,  $V_p = 0,09$ ;  $P_{\text{двн}}/P_{\text{ст}} = 0,3$  и  $s = 100$

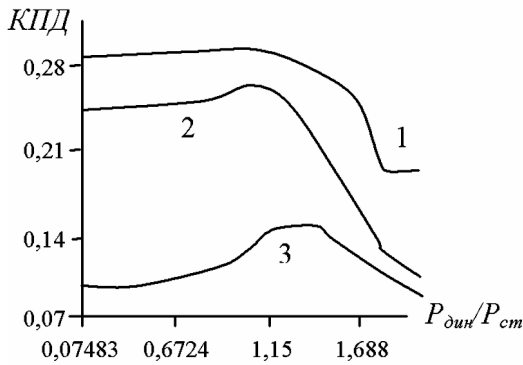


Рис. 7. Зависимость коэффициента полезного действия от отношения  $P_{\text{двн}}/P_{\text{ст}}$ :  
 кривая 1 соответствует значениям  $p = 2,5$  кг,  $V_p = 0,09$ ;  
 кривая 2 -  $p = 1,5$  кг,  $V_p = 0,06$ ;  
 кривая 3 -  $p = 2,5$  кг,  $V_p = 0,05$

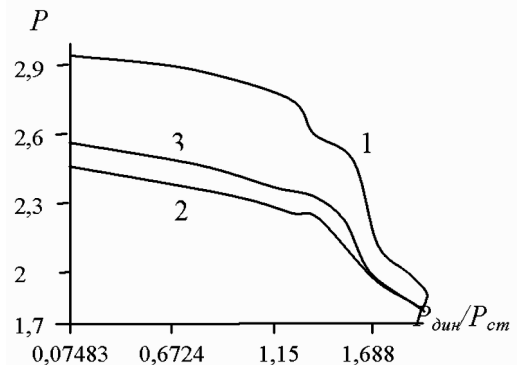


Рис. 8. Зависимость веса аппарата от отношения  $P_{\text{двн}}/P_{\text{ст}}$ :  
 кривая 1 соответствует значениям  $\Pi_6 = 300$ ,  $s = 140$  и скорости вращения электродвигателя  $s = 3000$  об/мин;  
 кривая 2 -  $\Pi_6 = 300$ ,  $s = 170$  и  $s = 4000$  об/мин;  
 кривая 3 -  $\Pi_6 = 200$ ,  $s = 60$  и  $s = 5000$  об/мин

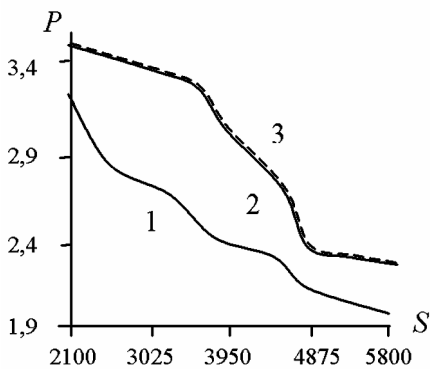


Рис. 9. Зависимость массы аппарата от скорости вращения электродвигателя  $s$ :  
 кривая 1 соответствует значениям  $\Pi_6 = 300$ ,  $s = 140$ ; кривая 2 -  $\Pi_6 = 500$ ,  $s = 140$ ;  
 кривая 3 -  $\Pi_6 = 300$ ,  $s = 60$

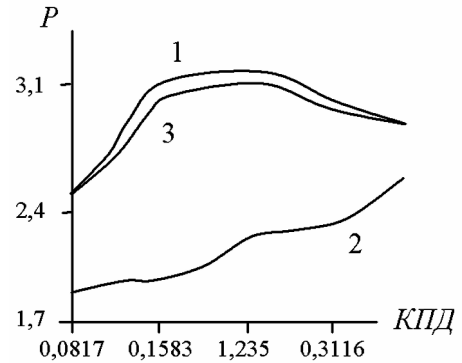


Рис. 10. Зависимость массы аппарата от КПД:  
 кривая 1 соответствует значениям  $\Pi_6 = 300$ ,  $s = 60$ ; кривая 2 -  $\Pi_6 = 300$ ,  $s = 140$ ;  
 кривая 3 -  $\Pi_6 = 500$ ,  $s = 140$

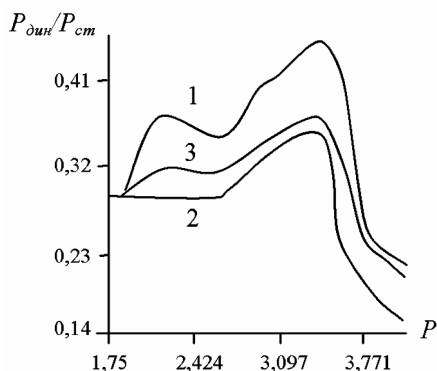


Рис. 11. Зависимость отношения  $P_{дин}/P_{ст}$  от массы аппарата: кривая 1 соответствует значениям  $\Pi_g = 300$ ,  $s = 100$ ; кривая 2 -  $\Pi_g = 400$ ,  $s = 100$ ; кривая 3 -  $\Pi_g = 300$ ,  $s = 60$

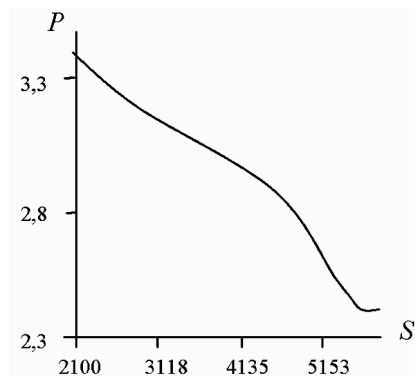


Рис. 12. Зависимость массы аппарата от скорости вращения электродвигателя  $s$  при  $s = 100$ ,  $P_{дин}/P_{ст} = 0,74$  и КПД = 0,3

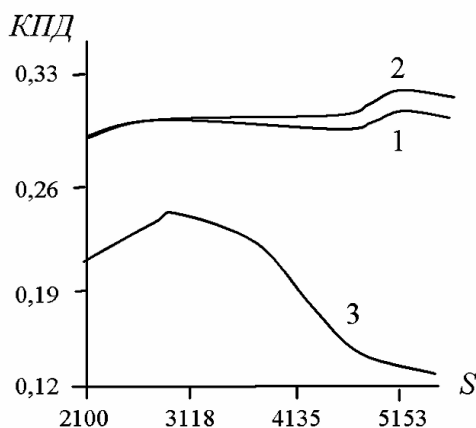


Рис. 13. Зависимость КПД от скорости вращения электродвигателя  $s$ : кривая 1 соответствует значениям  $\Pi_g = 300$ ,  $V_p = 0,09$ ; кривая 2 -  $\Pi_g = 300$ ,  $V_p = 0,11$ ; кривая 3 -  $\Pi_g = 300$ ,  $V_p = 0,05$

Исследование показателей эффективности рабочих колес электронасосных агрегатов. Объем экспериментальных данных для штатной крыльчатки составлял  $n = 67$ , ошибка восстановления искомой зависимости находилась в пределах 4,8 % от значения восстанавливаемой функции. Объем данных для криволинейной крыльчатки  $n = 71$  при ошибке восстановления 6,1 %. Для прямой крыльчатки объем экспериментальных дан-

ных составил 72 наблюдения, а ошибка восстановления – 13 %.

Эффективность восстановления зависимости (1) непараметрическими моделями коллективного типа (5) определялась средней относительной ошибкой аппроксимации.

Кривые на рисунках 14–22 соответствуют штатной крыльчатке (1), и крыльчаткам с криволинейными (2) и прямыми (3) лопатками, КПД приведен в %.

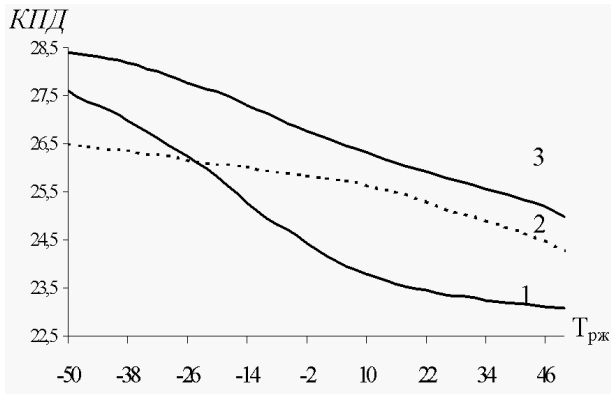


Рис. 14. Зависимость КПД от температуры рабочей жидкости при скорости вращения  $s = 5800$  об/мин,  $U_{пит} = 27$  В,  $\Delta P = 61$  кПа

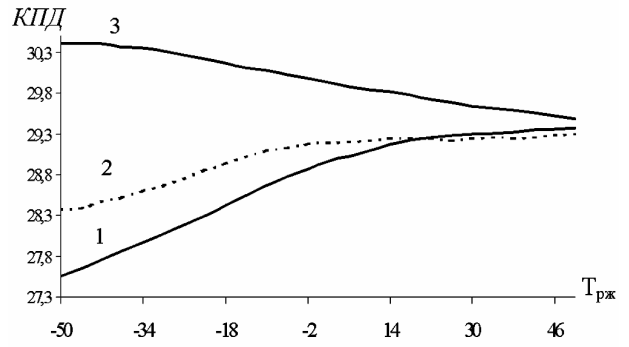


Рис. 15. Зависимость КПД от температуры рабочей жидкости при  $s = 5750$  об/мин,  $U_{пит} = 27$  В,  $\Delta P = 50$  кПа

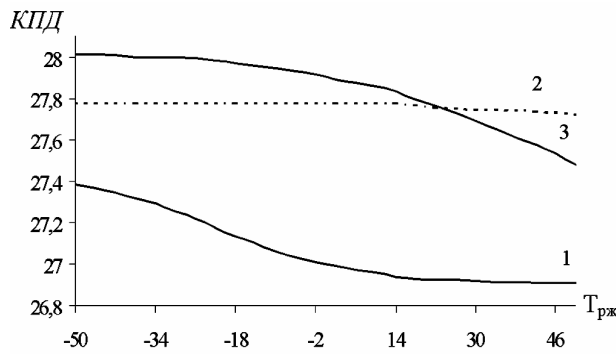


Рис. 16. Зависимость КПД от температуры рабочей жидкости при  $s = 5600$  об/мин,  $U_{пит} = 27$  В,  $\Delta P = 45$  кПа

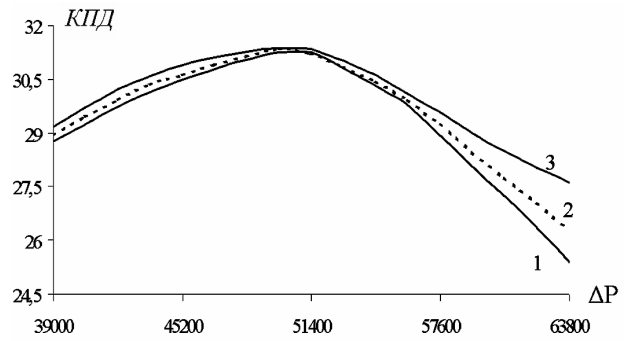


Рис. 17. Зависимость КПД от перепада давления при  $s = 5800$  об/мин,  $U_{пит} = 27$  В,  $T_{рж} = 20$  °С

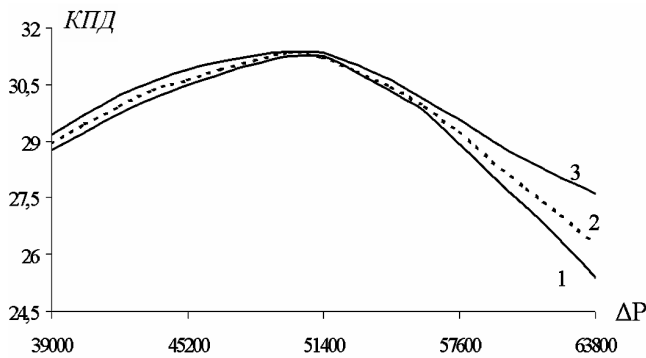


Рис. 18. Зависимость КПД от перепада давления при  $s = 5800$  об/мин,  $U_{пит} = 23$  В,  $T_{рж} = 20$  °С

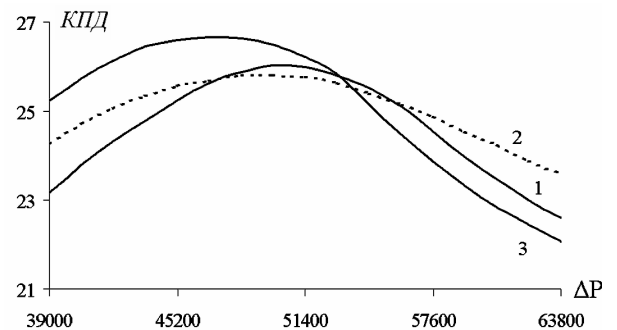


Рис. 19. Зависимость КПД от перепада давления при  $s = 5800$  об/мин,  $U_{пит} = 34$  В,  $T_{рж} = 20$  °С

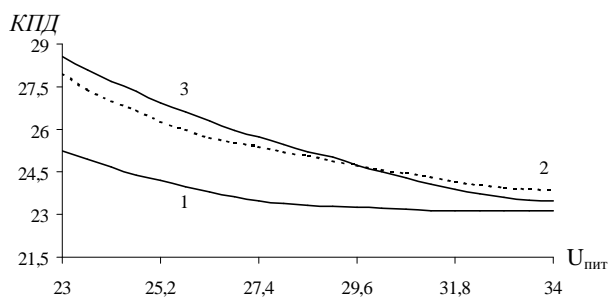


Рис. 20. Зависимость КПД от напряжения питания при  $s = 5800$  об/мин,  $T_{рж} = 20$  °С,  $\Delta P = 61$  кПа

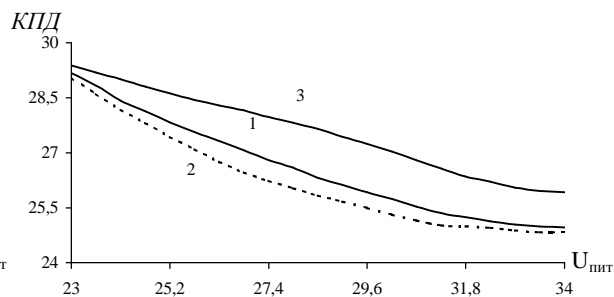


Рис. 21. Зависимость КПД от напряжения питания при  $s = 5800$  об/мин,  $T_{рж} = -50$  °С,  $\Delta P = 61$  кПа

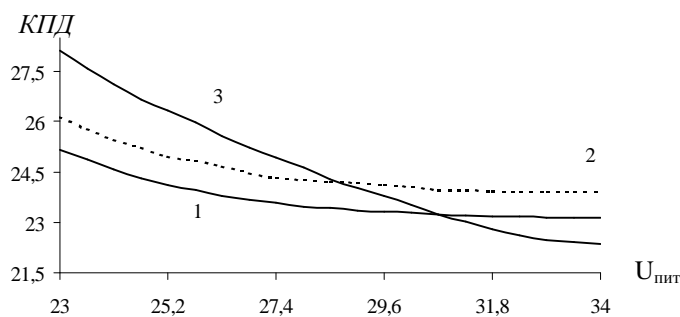


Рис. 22. Зависимость КПД от напряжения питания при  $s = 5800$  об/мин,  $T_{рж} = 50$  °С,  $\Delta P = 61$  кПа

### Заключение

Восстанавливаемые многомерные зависимости для малорасходных вентиляторов космических аппаратов позволяют спроектировать осевой вентилятор минимальной массы (рис. 11) с КПД близким к максимальному (рис. 10). Из условия максимума КПД найдены оптимальные параметры:  $\Pi_6 = 63$ ,  $P_{дин} / P_{ст} = 1,3$  (рис. 6, 7). Зависимость температура от КПД (рис. 4, 5) показывает, что необходимых высоких КПД можно достичь или за счет увеличения массы (при  $P_{дин} / P_{ст} = 0,5$ ) или за счет увеличения скорости вращения (при  $P_{дин} / P_{ст} = 1$ ). При  $P_{дин} / P_{ст} \geq 1,8$  коэффициент  $\Pi_6$  не зависит от скорости вращения и температура, причем происходит резкое снижение КПД, что необходимо учитывать в процессе проектирования вентиляторов.

Анализ результатов вычислительного эксперимента показывает, что наибольшая эффективность электронасосного агрегата достигается при использовании рабочего ко-

леса с прямыми лопатками. При этом максимальный КПД соответствует следующим техническим параметрам: скорость вращения  $s = 5750$  об/мин, напряжение питания  $U_{пит} = 27$  В, перепад давления  $DP = 50$  кПа. Наблюдение данного технологического режима обеспечивает слабую зависимость КПД от температуры рабочей жидкости. Криволинейный профиль крыльчатки с углом наклона лопатки на выходе  $30^\circ$  имеет преимущества в области пониженных скорости вращения рабочего колеса и перепадов давления при меньших значениях КПД электронасоса по сравнению с оптимальным технологическим режимом. В этих условиях также наблюдается слабая зависимость КПД от температуры рабочей жидкости.

Имеется экстремальная зависимость (рис. 17–19) коэффициента полезного действия электронасоса от перепадов давления. Существуют технологические режимы, когда эффективность электронасоса не зависит от профиля лопаток рабочего колеса (рис. 18–19).



При положительных температурах рабочей жидкости и значениях перепада давления в пределах 61 кПа с увеличением напряжения питания до 28 В КПД электронасоса с прямым профилем лопатки рабочего колеса превышает показатели других исследуемых модификаций. Дальнейшее увеличение напряжения питания благоприятствует использованию рабочих колес с криволинейным профилем крыльчатки (рис. 20, 22).

В условиях отрицательных температур независимо от напряжения питания преимущество имеет электронасос с прямым профилем лопатки рабочего колеса (рис. 21).

При этом штатная крыльчатка (угол наклона лопатки при выходе  $90^\circ$ ) более эффективна, чем ее модификация с углом наклона

лопатки при выходе  $30^\circ$ .

Таким образом, с помощью статистического анализа в условиях малого объема экспериментальных данных получены конкретные рекомендации для разработки и эксплуатации агрегатов системы терморегулирования космических аппаратов.

#### Список литературы

1. А. Г. Ивахненко, И. К. Тимченко, Д. А. Ивахненко Непараметрические модели МГУА Ч.4 // Автоматика. - 1990. № 1. –С. 20-31.
2. А. В. Лапко, В. А. Лапко, М. И. Соколов, С. В. Ченцов. Непараметрические модели коллективного типа. - Новосибирск: Наука, 2000.

### NON-PARAMETRIC MODELS OF MEASURING SPACE VEHICLE THERMOREGULATION SYSTEM UNIT EFFICIENCY INDICATORS

© 2007 M. I. Sokolov

Zhelesnogorsk Branch of Krasnoyarsk State Technical University

The paper investigates the interrelations between the efficiency indices of low-consumption fans and electric pump units of space vehicles, their dependence on design parameters of the elements and technological conditions of use. The peculiarities of the systems under investigation presuppose using non-parametric methods of information processing. The results of computational elements with a view to defining efficient modes of the use of units.