

УДК 621.436

*Т.К. Пылева, к.т.н, В.Т. Турчин, асп.*

## РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ МОДЕЛЕЙ НАГРУЖЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ МАШИН РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

При создании перспективных конструкций энергонасыщенных агрегатов различного технологического назначения одной из центральных проблем, с которой сталкиваются разработчики, является обеспечение заданного ресурса совокупности элементов, деталей, узлов, систем – двигателя и машины в целом. При этом с целью прогнозирования ресурса в качестве необходимой теоретической исследовательской базы на основе массивов эксплуатационных данных получают модели эксплуатации [1-7]. В последующем их используют в практике выполнения проектно-конструкторских работ. В связи с этим получение достоверных моделей эксплуатации является актуальной задачей для всех типов машин.

Основными трудностями при построении моделей эксплуатации, как статистических характеристик энергоиспользования двигателя, адекватно отображающих реальные условия его функционирования, являются [6]:

- широкая номенклатура операций, выполняемых при проведении различного рода работ в соответствии с назначением машины;
- неоднозначный характер изменения параметров двигателя при выполнении неизменного вида работ;
- недостаточный уровень знаний динамики процессов в системе двигатель – машина – источник нагрузки.

Параметрами, характеризующими режимы работы двигателя, являются крутящий момент и частота вращения вала двигателя, вероятность их появления. При этом методы математической статистики дают возможность предоставить достаточно достоверную картину использования двигателя при прове-

дении всей совокупности технологических операций для машины данного функционального назначения.

Модель загрузки двигателя в эксплуатации характеризуют режимными параметрами: агрегатной мощностью  $\bar{N}_{e_i} = N_{e_i} / N_{e_{ном}}$ ; крутящим моментом на коленчатом валу (КВ)  $\bar{M}_{e_i} = M_{e_i} / M_{e_{ном}}$ ; частотой вращения КВ  $\bar{n}_{e_i} = n_{e_i} / n_{e_{ном}}$ . Здесь параметры с индексом „ном” отмечают номинальный режим работы, а без индекса – режим в узловой точке  $i$ -того эксплуатационного полигона.

Ответственным аспектом построения модели является назначение эксплуатационных полигонов. Последняя процедура выполняется на основе учета всех представительных видов работ и (или) отдельных операций, выполняемых машиной, в идеале – на основе ее годовой занятости. Тогда узловая точка  $i$ -того полигона представляет собой усредненную квазистатичную элементарную характеристику совокупности всех видов работ.

Эксплуатация двигателя данного технологического назначения в поле совокупности установленных  $q$  полигонов распределяется по времени с вероятностями

$$\sum_{i=1}^q \bar{P}_i = 1, \quad (1)$$

которые с учетом заданного ресурса двигателя  $P$  и наработкой на  $i$ -том полигоне  $P_i$  можно представить в виде  $\bar{P}_i = P_i / P$  [1-7]. Таким образом, имеем стационарную модель эксплуатации.

В тоже время для подавляющего большинства машин с двигателями внутреннего сгорания существенную долю в балансе времени их функционирова-

ния занимают переходные процессы. Именно они характеризуют качество двигателя по совокупности критериев экономичности, экологичности, надежности. В случае прогнозирования среднеэксплуатационных показателей рабочего процесса здесь вводят коэффициент, учитывающий интегрированное влияние совокупности переходных процессов [8]. При этом конструктор освобождается от учета информации о количестве и качестве таких процессов, не предоставляемой разработчиками моделей эксплуатации.

В то же время именно особенности переходных процессов определяют уровни и сложную аperiodическую нестационарность нагружения деталей двигателя и машины в целом. Это означает, что при решении задач обеспечения заданного ресурса в качестве необходимой исследовательской базы необходима нестационарная модель.

В [9] предложена методика получения нестационарной теоретической модели эксплуатации двигателя на основе известной стационарной. Разработка такой модели предполагает наличие переходных процессов  $\tilde{P}_j$  и установившихся режимов  $\bar{P}_{ycm_m}$ ,

$$\sum_j \tilde{P}_j = \sum_i \bar{P}_i - \sum_m \bar{P}_{ycm_m}. \quad (2)$$

С учетом обеспечения гарантированного прочностного ресурса детали наработки  $\tilde{P}_j$  для каждого из переходных процессов устанавливается в соответствии с алгоритмом:

$$\tilde{P}_j = 2\bar{P}_l|_{\tilde{P}_j}, \bar{P}_l|_{\tilde{P}_j} \leq \bar{P}_n|_{\tilde{P}_j}; \quad (3)$$

$$\bar{P}_n|_{\tilde{P}_{j+1}} = \bar{P}_n|_{\tilde{P}_j} - \bar{P}_l|_{\tilde{P}_j}, \quad (4)$$

где  $\bar{P}_l$  и  $\bar{P}_n$  обозначают доли работы двигателя на режимах  $l$  и  $n$ , которые составляют процесс  $j$ , но не учтены в предыдущих процессах.

На практике количество полигонов стационарной модели эксплуатации двигателя лежит в широ-

ких пределах,  $q=2..30$ . При этом даже для двигателя одного назначения эта характеристика может изменяться вдвое [4,5]. Последнее означает, что использование различных моделей эксплуатации в конструкторской практике приводит к различной экономичности решаемой задачи и может приводить к различным проектным результатам. При этом от степени достоверности последних зависит продолжительность доводки конструкции на стендах и в объектах и, следовательно, общее время устранения расхождений между требованиями технического задания и реальными результатами. Другими словами, высокая экономичность используемой модели эксплуатации может являться причиной низкой экономичности совокупности этапов выполнения проекта.

В связи с указанным, проблема прогнозирования ресурсной прочности неизменно должна сопровождаться решением следующего круга задач:

- 1) разработкой нестационарных теоретических моделей эксплуатации двигателей заданного технологического назначения;
- 2) сравнительным анализом нестационарных моделей различной степени экономичности;
- 3) анализом путей повышения экономичности достоверных моделей эксплуатации.

В [9] на основе данных [4] разработана нестационарная модель эксплуатации тракторного двигателя сельскохозяйственного назначения категории 3 по ISO [2]. Указанная модель имеет вид, представленный в табл.1. Разработанная нами по методике (1)-(4) и данным [5] аналогичная модель представлена в табл.2.

Сравнение полученных нестационарных моделей на основе стационарных различной степени детализации свидетельствует, что количество переходных процессов во втором случае возросло практически вдвое. Это обстоятельство приводит к необходимости выполнения качественного анализа представленных в моделях переходных процессов.

Таблица 1 – Теоретическая экономичная модель нестационарного эксплуатационного нагружения двигателя трактора 3-й категории по данным [4]

Номер процесса, $j$	Чередование режимов $i$	$\bar{N}_{ei}$	$\bar{n}_i$	$\tilde{P}_j$
1	1↔9	0↔0,93	0,65↔0,957	0,062
2	1↔8	0↔0,9	0,65↔0,956	0,008
3	2↔8	0,23↔0,9	0,692↔0,956	0,036
4	2↔7	0,23↔0,85	0,692↔0,912	0,008
5	3↔7	0,35↔0,85	0,736↔0,912	0,132
6	3↔6	0,35↔0,7	0,736↔0,863	0,150
7	3↔5	0,35↔0,65	0,736↔0,824	0,068
8	4↔5	0,5↔0,65	0,78↔0,824	0,316

В соответствие с [9] основным фактором, влияющим на процесс накопления повреждений в

теплонапряженных деталях двигателя, является уровень мощности на данном режиме  $i$  и величина амплитуды ее изменения в переходном процессе  $j$ . Частота вращения здесь играет меньшую роль. В связи с этим следует обратить внимание, что для модели табл.1 максимальную амплитуду величин  $\bar{N}_{ei}$

имеем в переходных процессах 1 и 2 с наработкой

$$\sum_{j=1}^2 \tilde{P}_j = 0,07. \text{ По данным же модели табл.2 близкими}$$

к указанным являются процессы 1-7, с наработкой

$$\sum_{j=1}^7 \tilde{P}_j = 0,340, \text{ являющейся. существенно большей}$$

величиной.

Таблица 2 – Теоретическая детализированная модель нестационарного эксплуатационного нагружения двигателя трактора 3-й категории по данным [5]

Номер процесса, $j$	Чередование режимов $i$	$\bar{N}_{ei}$	$\bar{n}_i$	$\tilde{P}_j$
1	1-17	0,0825-1,045	0,825-0,95	0,040
2	2-17	<b>0,0975-1,045</b>	<b>0,975-0,95</b>	<b>0,026</b>
3	2-18	0,0975-0,9487	0,975-0,825	0,012
4	2-16	0,0975-0,9075	0,975-0,825	0,024
5	2-15	<b>0,0975-0,9</b>	<b>0,975-1,0</b>	<b>0,046</b>
6	3-15	<b>0,1075-0,9</b>	<b>1,075-1,0</b>	<b>0,152</b>
7	3-14	<b>0,1045-0,855</b>	<b>1,075-0,95</b>	<b>0,040</b>
8	4-14	0,2475-0,855	0,825-0,95	0,032
9	4-13	0,2475-0,7425	0,825-0,825	0,022
10	5-13	0,2925-0,7425	0,975-0,825	0,026
11	5-12	<b>0,2925-0,7175</b>	<b>0,975-1,025</b>	<b>0,066</b>
12	6-12	<b>0,315-0,7175</b>	<b>1,05-1,025</b>	<b>0,114</b>
13	7-11	0,4125-0,665	0,825-0,95	0,062
14	8-10	0,475-0,5775	0,95-0,825	0,050
15	8-9	0,475-0,5125	0,95-1,025	0,020

Сравнение рассматриваемых совокупностей переходных процессов по частоте вращения (выделены затенением) свидетельствует, что детализированная модель по табл. 2 включает процессы 2, 5-7, которые характеризуют цикличность работы двигателя в области максимальных частот вращения. Эту группу переходных процессов экономичная модель по табл.

1 не учитывает. При этом наработка для модели по табл. 2 в оставшихся переходных процессах 1,3,4 с максимальной амплитудой величин  $\bar{N}_{ei}$  составляет  $\sum_{j=1,3,4} \tilde{P}_j = 0,076$ , т.е. является достаточно близкой к модели по табл. 1.

Аналогично, дополнительными в детализированной модели табл. 2 являются процессы 11,12, которые также имеют высокую амплитуду изменения величин  $\bar{N}_{ei}$  и отсутствуют в табл. 1.

Указанное означает, что применение экономической модели табл. 1 нестационарного нагружения двигателя будет давать завышенный результат по ресурсной прочности деталей.

В связи с этим ясно, что для решаемой задачи обеспечения заданного ресурса деталей на начальных стадиях их проектирования предпочтение сле-

дует отдавать детализированным моделям.

Разработанные нами детализированные нестационарные модели эксплуатации тракторов 2-й и 4-й категорий представлены в табл. 3-4. Сравнение моделей эксплуатации тракторов 2-й, 3-й и 4-й категорий позволяет сделать следующие выводы.

1. Количество переходных процессов теоретической модели эксплуатации двигателя для различных категорий трактора может быть различным (15 процессов для тракторов 2-й и 3-й категорий, 17 – для 4-й категории).

Таблица 3 – Теоретическая модель нестационарного эксплуатационного нагружения двигателя трактора 2-й категории по данным [5]

Номер процесса, $j$	Чередование режимов $i$	$\bar{N}_{ei}$	$\bar{n}_i$	$\tilde{P}_j$
1	1-17	0,0825-1,045	0,825-0,95	0,030
2	1-18	0,0825-0,9487	0,825-0,825	0,012
3	2-16	0,0975-0,9075	0,975-0,825	0,010
4	2-15	0,0975-0,9	0,975-1,0	0,076
5	3-15	0,1075-0,9	1,075-1,0	0,128
6	4-14	0,2475-0,855	0,825-0,95	0,038
7	5-14	0,2925-0,855	0,975-0,95	0,018
8	5-13	0,2925-0,7425	0,975-0,825	0,024
9	5-12	0,2925-0,7175	0,975-1,025	0,014
10	6-12	0,315-0,7175	1,05-1,025	0,138
11	7-12	0,4125-0,7175	0,825-1,025	0,036
12	8-12	0,475-0,7175	0,95-1,025	0,018
13	8-11	0,475-0,665	0,95-0,95	0,036
14	9-11	0,5125-0,665	1,025-0,95	0,030
15	9-10	0,5125-0,5775	1,025-0,825	0,042

2. Часть переходных процессов в рассмотренных моделях представлены чередованием различных режимов (например, высоконагруженные процессы 2-17 и 2-18 отсутствует в модели 2-й категории, а процесс 3-18 присутствует только в модели 4-й категории).

3. Нарботка двигателя на режимах максимальной мощности с ростом форсирования двигателя возрастает (например, наработка на режиме 17 для 2-

й категории трактора составляет 0,015, для 3-й категории – 0,033, а для 4-й – 0,052).

4. Для идентичных переходных процессов в связи с перераспределением загрузки двигателя имеет место различная наработка (например, процесс 2-18 для двигателей тракторов 3-й и 4-й категорий имеет наработки, соответственно равные 0,012 и 0,022).

Таблица 4 – Теоретическая модель нестационарного эксплуатационного нагружения двигателя трактора 4-й категории по данным [5]

Номер процесса, $j$	Чередование режимов $i$	$\bar{N}_{ei}$	$\bar{n}_i$	$\bar{P}_j$
1	1-17	0,0825-1,045	0,825-0,95	0,034
2	2-17	0,0975-1,045	0,975-0,95	0,070
3	2-18	0,0975-0,9487	0,975-0,825	0,022
4	3-18	0,1075-0,9487	0,1075-0,825	0,014
5	3-16	0,1075-0,9075	1,075-0,825	0,014
6	3-15	0,1075-0,9	1,075-1,0	0,146
7	4-15	0,2475-0,9	0,825-1,0	0,044
8	5-15	0,2925-0,9	0,975-1,0	0,056
9	5-14	0,2925-0,855	0,975-0,95	0,028
10	6-14	0,315-0,855	1,05-0,95	0,016
11	6-13	0,315-0,7425	1,05-0,825	0,036
12	6-12	0,315-0,7175	1,05-1,025	0,062
13	7-12	0,4125-0,7175	0,825-1,025	0,056
14	8-12	0,475-0,7175	0,95-1,025	0,066
15	9-12	0,5125-0,7175	1,025-1,025	0,026
16	9-11	0,5125-0,665	1,025-0,95	0,072
17	9-10	0,5125-0,5775	1,025-0,825	0,046

Приведенное означает, что при изменении уровня форсирования двигателя в оценках ресурсной прочности деталей необходимо учитывать влияние изменений загрузки машины в эксплуатации.

В табл. 5-6 представлены полученные нами теоретические модели нестационарного нагружения двигателя грузового автомобиля и комбайна. За исходные данные были приняты стационарные модели [7]. Использование этих моделей, наряду с моделями табл. 2-4, позволяет учитывать назначение двигателя в процессе проектирования как внешнее нестационарное воздействие на него характерных условий эксплуатации.

Из данных табл. 2-6 следует, что расчетная методика оценки ресурсной прочности деталей вследствие высокой степени детализации предложенных моделей эксплуатации становится неэкономичной. По этой причине необходимыми являются сокращение сроков анализа и оптимизации конструкций путем повышения экономичности полученных моделей без потери точности результатов.

Выполненные нами по методике [3] расчеты ресурсной прочности поршня дизеля 4ЧН12/14 свидетельствуют, что до критической температуры, равной 280°C, накопление повреждений в поршне из сплава АЛ25 практически отсутствует. Следовательно, экономичность моделей нагружения, представленных в табл.2-6, может быть повышена за счет исключения из них переходных процессов, где температура поршня не превышает критическую.

Важно, что определение температурного состояния поршня является первым этапом реализации методики оценки его ресурсной прочности. Это означает, что после анализа температурного состояния конструкции появляется возможность принятия решения о дальнейшем ходе расчетов, исходя из одновременного удовлетворения условий точности и экономичности получаемого результата. Нами установлено, что при использовании двигателя 4ЧН12/14 в качестве силовой установки трактора 2-й категории ресурсная прочность поршня на базе  $P=10000$  часов является гарантированной и отсутствует необходимость в расчетах с использованием переходных про-

цессов табл.3. Для двигателя трактора 3-й категории максимальное количество учитываемых переходных процессов достигает шести (выделены в табл. 2 утолщенной линией) из 15 имеющихся. Для трактора четвертой категории минимальное количество учитываемых переходных процессов равно 10 из 17 составляющих модель (см. табл. 4). Таким образом, исключение незначимых переходных процессов ре-

ально повышает экономичность использования нестационарных моделей и процесса проектирования поршня в целом. Одновременно следует учитывать, что с ростом уровня форсирования двигателя (повышением ранга категории трактора) экономичность нестационарных моделей эксплуатации двигателя снижается.

Таблица 5 – Теоретическая модель нестационарного эксплуатационного нагружения двигателя грузового автомобиля по данным [7]

Номер процесса, $j$	Чередование режимов $i$	$\bar{N}_{ei}$	$\bar{n}_i$	$\bar{P}_j$
1	1-27	0,0623-0,942	0,415-0,915	0,082
2	1-26	0,0623-0,894	0,415-0,8125	0,020
3	2-26	0,083-0,894	0,550-0,8125	0,074
4	3-26	0,103-0,894	0,685-0,8125	0,034
5	4-26	0,150-0,894	0,8125-0,8125	0,016
6	5-26	0,173-0,894	0,9375-0,8125	0,074
7	6-25	0,187-0,859	0,415-0,9375	0,030
8	6-24	0,187-0,754	0,415-0,685	0,036
9	7-24	0,248-0,754	0,550-0,685	0,116
10	8-24	0,297-0,754	0,415-0,685	0,028
11	9-24	0,308-0,754	0,685-0,685	0,060
12	9-23	0,308-0,745	0,685-0,8125	0,008
13	10-23	0,366-0,745	0,8125-0,8125	0,038
14	10-21	0,366-0,672	0,8125-0,9375	0,018
15	11-21	0,380-0,628	0,415-0,685	0,050
16	11-20	0,380-0,605	0,415-0,550	0,124
17	11-19	0,394-0,605	0,550-0,550	0,048
18	12-19	0,422-0,605	0,9375-0,550	0,016
19	13-19	0,422-0,582	0,9375-0,8125	0,024
20	13-18	0,452-0,582	0,430-0,8125	0,010
21	14-18	0,452-0,504	0,430-0,550	0,046
22	14-16	0,452-0,490	0,430-0,685	0,026

Аналогичные оценки по возможному повышению экономичности моделей эксплуатации машин нами выполнены для поршня автомобильного и комбайнового дизеля 4ЧН12/14 при фиксированном значении литровой мощности – 20 кВт/л. При этом установлено, что достаточным количеством учитываемых переходных процессов автомобильного двигателя является 6 из 22, а комбайнового – 3 из 24 (см. табл. 5-6). Таким образом, для двигателей различно-

го технологического назначения количество учитываемых переходных процессов может быть существенно различным и значительно меньшим от общего количества процессов разработанной модели.

Следует отметить, что установлению уровня критической температуры материала детали, превышение которого вызывает накопление повреждений для данной конструкции, должны предшествовать исследования ресурсной прочности этой конструк-

ции в широком диапазоне уровней форсирования двигателя. В отсутствие таких исследований после реализации первого этапа методики оценки ресурс-

ной прочности как определения температурного состояния детали, переходят ко второму этапу – расчету ее напряженного состояния.

Таблица 6 – Теоретическая модель нестационарного эксплуатационного нагружения комбайнового двигателя по данным [7]

Номер процесса, $j$	Чередование режимов $i$	$\bar{N}_{ei}$	$\bar{n}_i$	$\bar{P}_j$
1	1-26	0,171-0,950	0,570-1,0	0,034
2	2-26	0,207-0,950	0,690-1,0	0,070
3	2-25	0,207-0,982	0,690-0,970	0,022
4	2-24	0,207-0,850	0,690-1,0	0,014
5	3-24	0,228-0,850	0,570-1,0	0,014
6	4-24	0,240-0,850	0,80-1,0	0,146
7	5-24	0,285-0,850	0,570-1,0	0,044
8	6-24	0,331-0,850	0,69-1,0	0,056
9	6-23	0,331-0,825	0,69-0,97	0,028
10	7-23	0,345-0,825	0,69-0,97	0,016
11	7-22	0,345-0,715	0,69-0,90	0,036
12	7-21	0,345-0,758	0,69-1,01	0,062
13	8-21	0,350-0,758	1,0-1,01	0,056
14	9-21	0,40-0,758	0,80-1,01	0,066
15	11-21	0,450-0,758	1,0-1,01	0,026
16	12-21	0,514-0,758	0,97-1,01	0,072
17	13-21	0,560-0,758	0,80-1,01	0,046
18	13-20	0,560-0,728	0,80-0,970	0,046
19	14-20	0,566-0,728	1,01-0,970	0,046
20	14-19	0,566-0,720	1,01-0,80	0,046
21	14-18	0,566-0,657	1,01-1,01	0,046
22	15-18	0,621-0,657	0,690-1,01	0,046
23	16-18	0,630-0,657	0,90-1,01	0,046
24	17-18	0,631-0,657	0,97-1,01	0,046

С учетом данных по температурному и напряженному состоянию рассматриваемой детали также может быть принято решение об исключении из рассмотрения незначимых переходных процессов. Применительно к поршню из сплава АЛ25 на основе данных исследования [10] процедура исключения незначимых процессов может быть реализована исходя из выполнения предлагаемого нами условия:

$$\sigma_j < 112,56 - 0,91t_j + 2,6 \cdot 10^{-3}t_j^2 - 2,59 \cdot 10^{-6}t_j^3 \quad (5)$$

где  $t_j, \sigma_j$  – максимальные действующие температура и напряжение в исследуемой зоне детали  $j$ -того исключаемого процесса.

**Выводы:**

1. Разработаны детализированные теоретические модели нестационарного нагружения тракторных, автомобильных и комбайновых двигателей. Установлено, что использование экономичных стационарных моделей эксплуатации в качестве базы построения нестационарной модели для исследования ресурсной прочности деталей в общем случае является неправомерным.

2. Установлено, что при изменении уровня форсирования двигателя в оценках ресурсной прочности деталей необходимым является учет измененной загрузки машины, отражаемый в модели ее эксплуатации.
3. С целью повышения экономичности использования нестационарных моделей эксплуатации предложены методики исключения незначимых переходных процессов модели. Установлено, что количество незначимых процессов может составлять половину и более от общего количества процессов.

По результатам выполненной работы можно сформулировать общий вывод. Применительно к данному рассматриваемому критерию качества конструкции в целях поддержания эффективной технологии ее проектирования необходимым является применение частной экономичной модели нагружения как подмодели общей теоретической нестационарной модели.

**Список литературы:**

1. Багиров Д.Д., Златопольский А.В. Двигатели внутреннего сгорания строительных и дорожных машин. – М.: машиностроение, 1974. – 220 с.
2. Тракторы. Проектирование, конструирование и расчет /Под общ. ред. Ксеновича. М.: Машиностроение, 1991. – 544 с.
3. Пылев В.А., Пылева Т.К., Прохоренко А.А. Использование функции желатель-

ности Харрингтона в САПР поршня быстроходного дизеля / *Механіка та машинобудування*. – 2000, №1. – С.80-84.

4. Луцицкий Ю.В., Косулин А.Г. Эксплуатационный расход топлива и метод его определения / *Двигатели внутреннего сгорания*. – Вып. 41. – Х.: ХПИ, 1985. –С.96-104.
5. Ажиппо Н.А., Балюк Б.К. Прогнозирование долговечности подшипников скольжения тракторных двигателей на стадии их проектирования / *Двигателестроение*. – 1985, №8. – С.17-20.
6. Жегалин О.И., Лепачев П.Д., Челознов Б.В., Софонов С.С. Вероятностная оценка режимов работы тракторного двигателя / *Тракторы и сельхозмашины*. – 1985, №9. –С.6-9.
7. Парсаданов И.В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия. – Х.: НТУ «ХПИ», 2003. – 244 с.
8. Симсон А.Э., Ероценков С.А. Выбор конструктивных параметров транспортных ДВС по среднеэксплуатационному расходу топлива / *Двигателестроение*. – 1989, №1. –С.55-58.
9. Пильов В.О. Автоматизоване проектування поршнів швидкохідних дизелів із заданим рівнем тривалої міцності. – Х.: НТУ „ХПИ”, 2001. – 332 с.
10. Пильов В.О. Развитие представлений о механизме разрушения деталей КС двигателей в условиях воздействия повторных низкочастотных нагружений / *Труды Второго конгресса двигателестроителей Украины*. – Киев-Харьков-Рыбачье: Гос. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 1997. –С.227-229.