

**Воробьев Ю. М.**

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ГТД МОРСКОГО ИСПОЛНЕНИЯ**

*Рассмотрен подход к построению цифровых фильтров частотных помех при проведении вибродиагностики ГТД морского исполнения, основанный на прямом и обратном дискретном преобразовании Фурье. Отличительной особенностью предложенного алгоритма является применение дополнительной процедуры “контрастирования” спектра гармонической помехи. Приведены результаты тестирования разработанного алгоритма на реальных и модельных примерах.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, вибродиагностика, помехи, дискретное преобразование Фурье, информативные частоты.

**Постановка проблемы.** Переход к эксплуатации судовых ГТД по фактическому техническому состоянию требует высокой эффективности технического обслуживания. Своевременная оценка технического состояния ГТД, прогнозирование их ресурса методами функциональной диагностики является сравнительно трудной технической задачей. В настоящее время наиболее широкое применение в газотурбостроении находят различные методы вибродиагностирования. Одной из основных проблем вибродиагностирования ГТД в судовых условиях является сложность выделения полезного сигнала вибрации на фоне помех от рядом работающих машин и механизмов.

**Анализ последних исследований и литературы.** Анализ [1-13] показывает, что предварительная обработка данных является одной из актуальных задач не только в вибродиагностике, но и при построении информационных технологий обработки сигналов различной физической природы [1]. В первую очередь эта задача связана с выделением полезного сигнала на фоне помех: требуется по сигналу  $y[n] = f(x[n], \epsilon[n])$ , наблюдаемому в дискретные моменты времени  $n = 1, \dots, N$ , отделить полезный сигнал  $x[n]$  от искажающей его помехи  $\epsilon[n]$ .

Такая задача имеет решение только в том случае, когда априори известна функция  $f(\cdot)$  или сделаны обоснованные допущения ней. Довольно часто предполагается, что помеха аддитивна, т.е.  $y[n] = x[n] + \epsilon[n]$  [2]. Но даже при таких предположениях возможно отделить полезный сигнал от помехи, если имеются различия в их характеристиках (частотных, вероятностных и т.п.).

В тех случаях, когда модель полезного сигнала  $x[n]$  может быть описана с точностью до небольшого числа параметров, решение задачи сводится к оценке этих параметров по наблюдаемой реализации. Такой подход возможен при обработке зашумленных сигналов, порождаемых в процессе функционирования достаточно простых технических систем.

В то же время часто модель полезного сигнала либо неизвестна, либо достаточно сложна, чтобы можно было свести задачу отделения полезного сигнала от помехи к оценке небольшого числа параметров. Такая ситуация характерна при обработке вибрационного сигнала, электрокардиограмм [3], магнитокардиограмм [4], термограмм кристаллизации металла [5] и других сигналов сложной структуры. В таких ситуациях вводятся адекватные предположения о модели помехи и строятся различные фильтры, обеспечивающие максимально возможное удаление помехи при минимальных искажениях полезного сигнала.

**Нерешенные ранее вопросы общей проблемы.** Одной из основных проблем вибродиагностирования ГТД в судовых условиях является сложность выделения полезного сигнала вибрации на фоне помех от рядом работающих машин и механизмов.

---

**Цель исследований** (постановка задачи). Исследовать один из возможных подходов к решению задачи фильтрации частотных помех, основанный на прямом и обратном дискретном преобразовании Фурье (ДПФ).

**Основная часть.** Пусть на вход системы предварительной обработки данных поступает сигнал  $y[n]$ , который измерен в дискретные моменты времени  $n = 1, 2, \dots, N$  и содержит информацию о полезном сигнале  $x[n]$ , зашумленном аддитивной помехой  $\varepsilon[n]$

$$y[n] = x[n] + \varepsilon[n]. \quad (1)$$

Предположим, что помеха  $\varepsilon$  имеет частотную природу и может быть представлена суммой стационарных гармонических колебаний

$$\varepsilon[n] = \sum_{i=1}^M a_i \sin(2\pi f_i n + \varphi_i) \quad (2)$$

с априори известными частотами  $f_i$ , неизвестными амплитудами  $a_i$  и фазами  $\varphi_i$ .

Традиционно для цифровой фильтрации таких сигналов используют различные фильтры с бесконечной или конечной импульсной характеристикой, в частности, широко известный фильтр Баттерворта [6,7]. Основным их преимуществом является возможность обработки сигнала в реальном масштабе времени по мере поступления очередного дискретного отсчета  $y[n]$ . В то же время всем таким фильтрам присущи следующие недостатки: они позволяют устойчиво фильтровать сигнал лишь после определенного промежутка времени, зависящего от параметров настройки фильтра, в частности, от его порядка; даже при оптимальной настройке таких фильтров не удается реализовать “идеальную” амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), обеспечивающую полное подавление частот в полосе заграждения без искажения сигнала в полосе пропускания. Реально эти фильтры позволяют лишь аппроксимировать “идеальную” АЧХ прямоугольной формы с некоторой степенью точности. Особые трудности синтеза таких фильтров вызывают практически важные случаи, когда требуется обеспечить узкополосную режекцию сигнала (меньше 0.1% частоты дискретизации).

Подход к решению задачи цифровой фильтрации, основанный на прямом и обратном дискретном преобразовании Фурье [8] позволяет не только заграждать частоты в области 0-0.6 Гц, как это делается в [4], а реализовать частотный фильтр с заданными полосами пропускания и заграждения во всем диапазоне частот от 0 до частоты Найквиста с практически “идеальной” АЧХ прямоугольной формы. Более того, при определенных модификациях обеспечивается возможность подавления отдельных фиксированных гармоник, что особенно важно при решении ряда практических задач, когда гармоническая помеха находится в области информативных частот полезного сигнала.

*Алгоритм частотно-избирательной фильтрации.* Рассматриваемый подход основан на использовании алгоритмов прямого  $FFT$  обратного  $IFFT$  дискретного преобразования Фурье (ДПФ), описанных в работах [9,10]. Известно [11], что эти алгоритмы взаимно обратимы (с точностью до малых погрешностей округления), т.е. для любого вектора  $Z$  справедливо равенство

$$IFFT(FFT(Z)) = Z. \quad (3)$$

Отсюда, казалось бы следует, что если в векторе, полученном после прямого ДПФ провести обнуление элементов, соответствующих требуемым полосам режекции, то после обратного ДПФ будет получен отфильтрованный сигнал. Вместе с тем оказывается, что такой достаточно простой прием эффективен лишь в том случае, когда частоты помехи кратны первой гармонике разложения Фурье. Дело в том, что только в этом частном случае спектр гармонической помехи, построенный на основании прямого ДПФ, будет адекватен реальному спектру помехи. Если же это условие не выполняется, то спектр гармонической помехи будет “распределяться” на целый ряд смежных гармоник. Для иллюстрации этого эффекта рассмотрим спектры двух гармонических сигналов

$$z_1[n] = \sin(2\pi f_1 n) \text{ и } z_2[n] = \sin(2\pi f_2 n), \quad (4)$$

с частотами  $f_1 = 16.5$  Гц и  $f_2 = 16.5165432768543$  Гц.

Заметим, что частоты сигналов практически совпадают. На рис. 1. показаны фрагменты спектров этих сигналов, построенные на основании прямого ДПФ по  $N=30000$  отсчетам при частоте дискретизации 1000 Гц. Как видно только в первом случае, когда частота сигнала совпала с одной из частот разложения Фурье, построенный спектр адекватен реальной ситуации (рис.1 а). Такой случай - редкое исключение, а не правило. Поэтому, если в общем случае для фильтрации гармонической помехи обнулять все гармоники, на которые распределена нагрузка помехи, то можно затронуть гармоники, несущие информацию о полезном сигнале, и в результате после обратного преобразования Фурье полезный сигнал может быть существенно искажен.

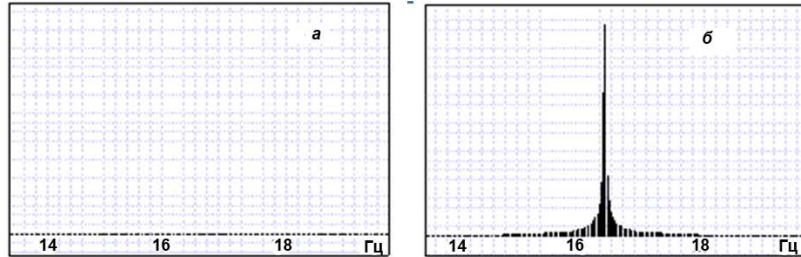


Рис.1. Спектры гармонических сигналов  $z_1$  и  $z_2$ :  
а)  $f_1$  - кратная частота; б)  $f_2$  - некратная частота

Для устранения отмеченного недостатка нами использован модифицированный алгоритм частотно-избирательной фильтрации [4], блок схема которого представлена на рис.2.



Рис. 2. Блок схема алгоритма

В отличие от тривиального, алгоритм предусматривает процедуру модификации данных, поступающих на вход прямого ДПФ, обеспечивая эффект “контрастирования” спектра гармонической помехи. В результате после применения такой процедуры обнуление (либо снижение амплитуды) гармоник в области режекции и последующее обратное преобразование Фурье приводит к эффективному удалению помехи без заметных искажений полезного сигнала.

Результаты экспериментальных исследований. Для оценки эффективности разработанных алгоритмов проводились эксперименты на модельных и реальных сигналах. Такая оценка выполнялась согласно схеме, показанной на рис. 3.

*Эксперимент 1: “Загрязнение низких частот”.* Модели эталонного сигнала и помехи представляли собой гармонические сигналы, сгенерированные в  $N = 30000$  точках при частоте дискретизации  $F = 1000$  Гц. Частота полезного сигнала составляла  $f_x = 16.012345$ , частота помехи составляла  $f_e = 16.512345$  Гц. Заметим, что в данном случае различие частот сигнала и помехи не превышает 0.1% частоты Найквиста.

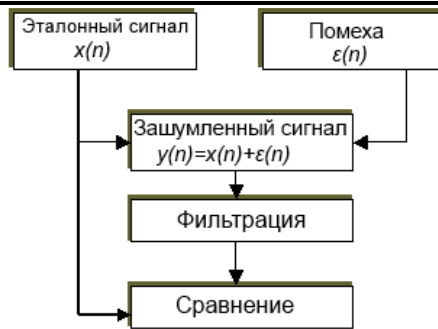


Рис. 3. Схема эксперимента

На рис. 4. приведен фрагмент спектра суммы данных гармоник до (рис.4 а) и после (рис. 4 б) применения процедуры контрастирования.

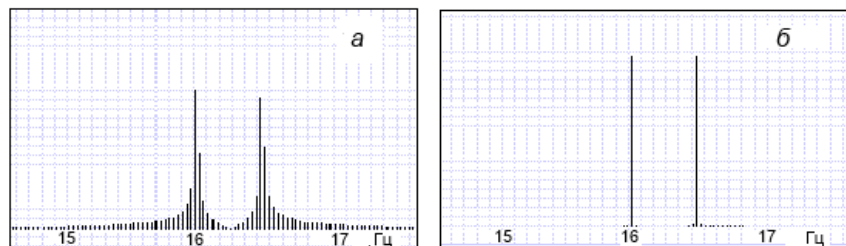


Рис.4. Спектр сигнала в эксперименте 1  
а) до контрастирования, б) после контрастирования

Результат фильтрации представлен на рис. 5. Для сравнения на этом же рисунке представлен фрагмент эталонного сигнала. Сравнение фильтрованного и эталонного сигнала показало, что практически на всей области определения различия их значений не превышали 2 % диапазона изменения сигналов.

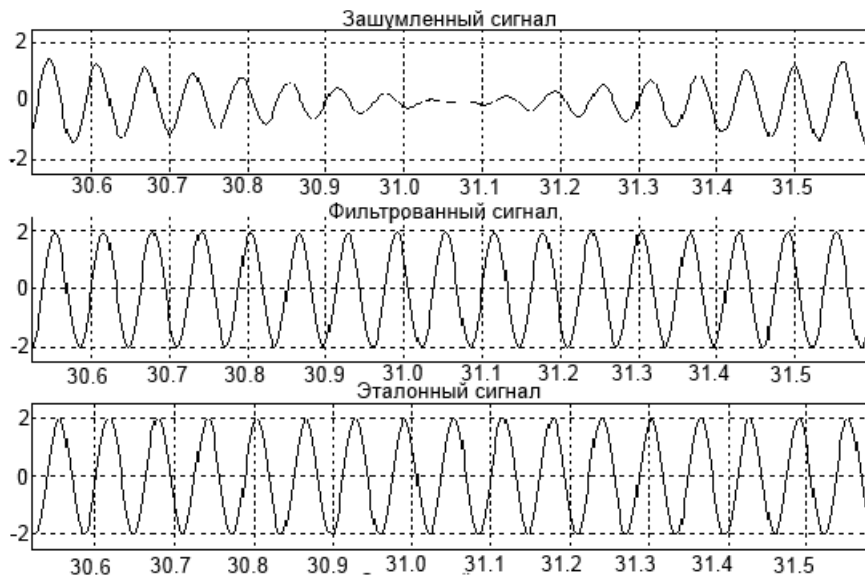


Рис.5. Результаты эксперимента 1

*Эксперимент 2: “Загрязнение высоких частот”.* В условиях данного эксперимента частота полезного сигнала составляла  $f_x = 250.1234$ , а частота помехи -  $f_e = 251.1234$  Гц. Сумма этих сигналов генерировалась в  $N = 30000$  точках при частоте дискретизации  $F = 1000$  Гц.

На рис. 6. приведен фрагмент спектра суммы данных гармоник до (рис.6 а) и после (рис. 6 б)

б) применения процедуры контрастирования.

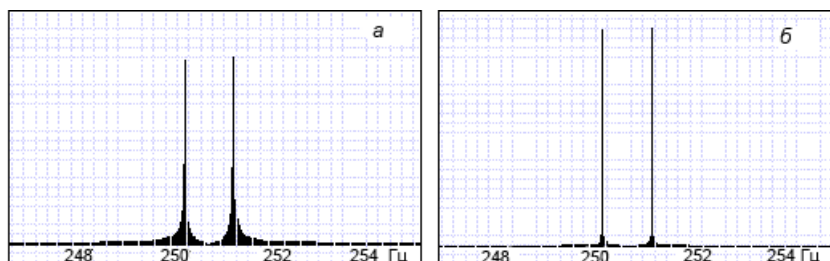


Рис.6. Спектр сигнала в эксперименте 2  
а) до контрастирования, б) после контрастирования

При фильтрации получен практически такой же результат (рис.7), как и в эксперименте 1.

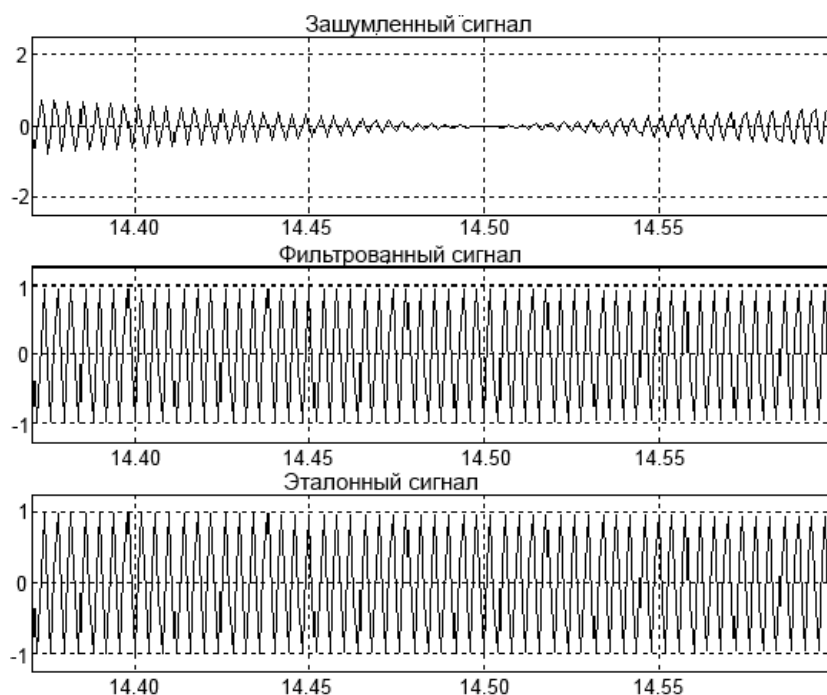


Рис.7. Результаты эксперимента 2

*Эксперимент 3. “Выделение полигармонического сигнала на фоне случайной помехи”.* Полезный сигнал - сумма трех гармонических колебаний с частотами  $f_1=15$  Гц,  $f_2=50$  Гц,  $f_3=75$  Гц, различными амплитудами и фазами.

$$x[n] = 12\sin(2\pi f_1 n) + 7\sin(2\pi f_2 n + 0.3) + 9\sin(2\pi f_3 n + 0.8)$$

Сигнал зашумлялся аддитивной случайной помехой, представляющей собой последовательность независимых величин, равномерно распределенных на интервале, равном 10% диапазона изменения сигнала  $x[n]$ . Сигнал генерировался в  $N=30000$  точках при частоте дискретизации  $F=1000$  Гц. Как видно из рис. 8, на котором представлены результаты фильтрации, и в данном случае удалось достаточно эффективно восстановить эталонный сигнал.

*Эксперимент 4. “Фильтрация электрокардиограммы”.* В данном эксперименте в качестве эталонного сигнала была использована реальная ЭКГ, зашумленная гармонической помехой в области 16.7 Гц. Такая частота характерна для ряда условий эксплуатации кардиографических систем, но, в отличие от 50 Гц, непосредственно расположена в области информативных частот полезного сигнала.

При эксперименте амплитуда помехи составляла 100 % размаха эталонного сигнала. Сумма эталонной ЭКГ и помехи генерировалась в 30000 точек с частотой дискретизации  $F=$

1000 Гц. Сравнивались два способа фильтрации – без контрастирования спектра помехи и с контрастированием спектра помехи. Результаты тестирования (фрагменты сигналов) приведены на рис.9.

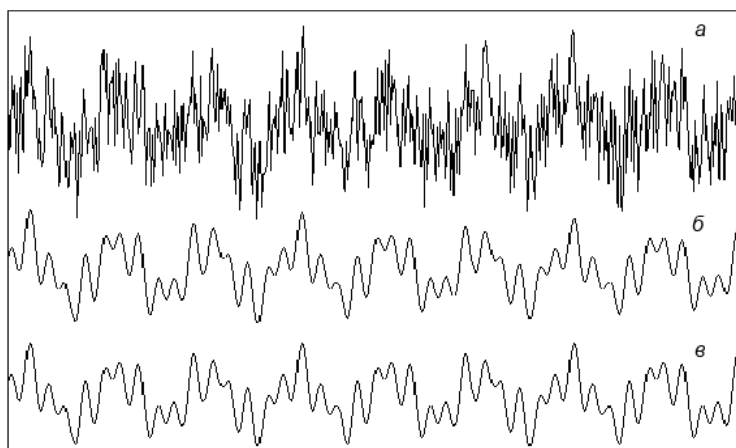


Рис.8. Иллюстрация результатов эксперимента 3: зашумленный сигнал (а); фильтрованный сигнал (б); эталонный сигнал (в)

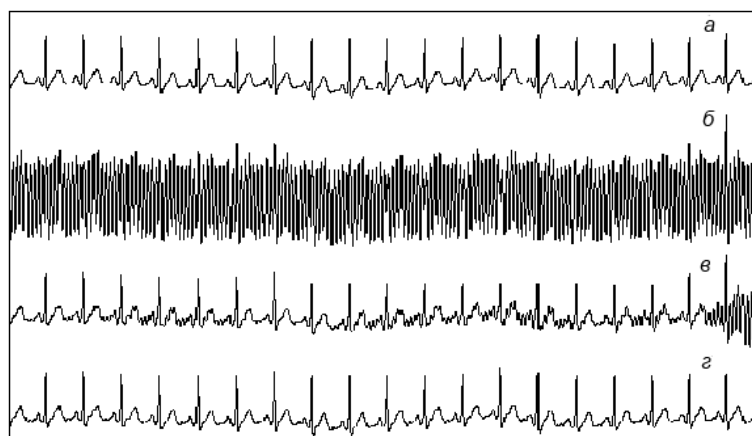


Рис.9. Иллюстрация результатов эксперимента 4: эталонная ЭКГ (а); зашумленная ЭКГ (б); результат фильтрации без контрастирования спектра (в) и с контрастированием спектра (г)

*Эксперимент 5. “Фильтрация вибросигнала подшипника ГТД”.* В данном эксперименте производилась фильтрация вибросигнала подшипника ГТД, которая была зарегистрирована в течение 30 сек, при частоте дискретизации  $F=1000$ . Измерение производилось в реальных условиях. Вследствие этого исходный сигнал был существенно искажен. Фильтрация вибросигнала подшипника ГТД проводилась совокупностью цифровых фильтров, построенных на основе ДПФ, в том числе:

- фильтра верхних частот с частотой среза 0.6 Гц;
- узкополостных режекторных фильтров на 16.7 Гц и 50 Гц;
- фильтра нижних частот с частотой среза 90 Гц.

Результат фильтрации оценивался визуально по внешнему виду фильтрованной вибросигнала. При этом критерием оценки служило наличие на сигнале характерных фрагментов, отражающих работу подшипника ГТД. Результат фильтрации показан на рис. 10:

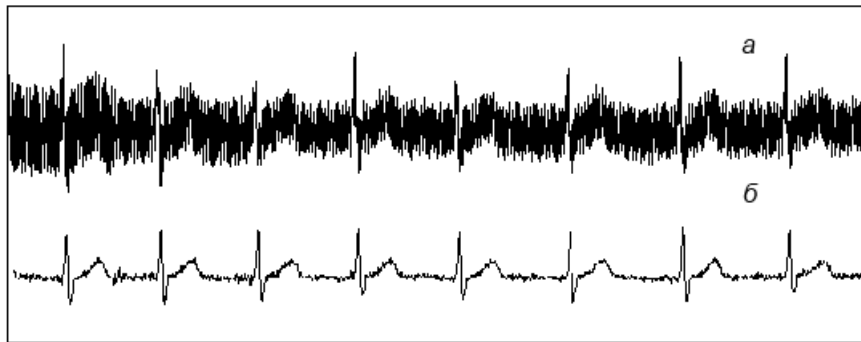


Рис.10. Результат фильтрации вибросигнала подшипника ГТД.

### Выводы

Проведенные эксперименты подтвердили эффективность фильтрации гармонических помех на основе прямого и обратного ДПФ на реальных и модельных данных. Метод позволяет реализовать узкополосный заградительный фильтр в диапазоне от частот 0 до частоты Найквиста. При этом полоса режекции может составлять величину меньшую 0.1% частоты Найквиста, что существенно при обработке вибросигналов, когда гармоническая помеха располагается в области информативных частот полезного сигнала. Данный подход целесообразно использовать при проведении вибродиагностирования судовых ГТД, что позволит существенно повысить точность проведения вибродиагностики судового ГТД.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Файнзильберг Л.С.* Синтез информационных технологий обработки сигналов//Управляющие системы и машины. –1998. - № 2. - С.40-47.
2. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. -М.: Наука, 1968. - 400 с.
3. *Файнзильберг Л.С.* Информационная технология для диагностики функционального состояния оператора//Управляющие системы и машины. –1998. - № 4. - С.40-45.
4. *Примин М.А., Недайвода И.В., Васильев В.Е.* Новые алгоритмы обработки магнитокардиосигнала //Управляющие системы и машины. –1998. - № 2. - С.48-62.
5. *Скурихин В.И., Файнзильберг Л.С., Потапова Т.П., Шелковый Э.А.* Система компьютерной обработки термограмм.-//Управляющие системы и машины. –1990. - № 4. - С.82-88.
6. *Мизин И.А., Матвеев А.А.* Цифровые фильтры. - М.: Радио и связь. - 1979, 386 с.
7. *Антонью А.* Цифровые фильтры: Анализ и проектирование. - М.: Радио и связь.- 1983, 320 с.
8. *Винер Н.* Интеграл Фурье и некоторые его приложения. М.: Физматгиз - 1963, 322 с.
9. *Oppenheim A. V., R.W. Schaffer.* Discrete-Time Signal Processing.- Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.-1989.-P. 311-312.
10. *Gustafsson F.* Determining the initial states in forward-backward filtering // IEEE Transactions on Signal Processing.- April 1996, Volume 44, Issue 4.- P. 988—992.
11. *Задирака В.К., Мельникова С.С.* Цифровая обработка сигналов. - К.: Наук. думка, 1993. – 294 с.
12. *Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л.* Газотурбинные двигатели. Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок. – М.: «Машиностроение». 2007 – 194 с.
13. *Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю.* Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. – СПб.: СПбГМТУ, 2000.

**Воробйов Ю. М.**

### **ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНО - ВИБІРКОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ГТД МОРСЬКОГО ВИКОНАННЯ**

*У статті розглянуто підхід до побудови цифрових фільтрів частотних перешкод при проведенні вибродіагностики судового ГТД, заснований на прямому і зворотному дискретному перетворенні Фур'є. Відмінною особливістю запропонованого алгоритму є*

---

---

застосування додаткової процедури "контрастування" спектру гармонійної перешкоди. Наведено результати тестування розробленого алгоритму на реальних і модельних прикладах.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, вібродіагностика, дискретне перетворення Фур'є, інформативні частоти

**Vorobjov U.**

#### **APPLICATION OF FREQUENCY-SELECTIVE FILTERING DURING VIBRODIAGNOSTICS MARINE USAGE GTE**

*This article describes an approach to the construction of digital filters frequency interference during the execution of marine turbine engine vibration monitoring, based on direct and inverse discrete Fourier transformation. A distinctive feature of the proposed algorithm is the use of additional procedures, "contrast" of the spectrum of the harmonic interference. The results of the testing of the developed algorithm on real and model examples are given.*

**Keywords:** gas turbine engine, vibrodiagnostic, interference, discrete Fourier transformation, informative frequency.