

5. Сахаров В. В. Применение матрицы Крылова для апериодического управления динамическими объектами / В. В. Сахаров, В. И. Королев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — Вып. 1 (9).

6. Сахаров В. В. Экономичные режимы работы генераторов электроэнергии на различных сортах топлива / В. В. Сахаров, Е. Н. Андрианов, В. И. Королев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — Вып. 4 (12).

УДК 621.3.053.4

Е. Н. Андрианов,

канд. техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

В. В. Сахаров,

д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

А. Г. Таранин,

доцент,
ФГБОУ ВПО «Новороссийский государственный
морской университет им. адм. Ф. Ф. Ушакова»

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ ПО ЭТАЛОННЫМ МОДЕЛЯМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТОВ

SHIP DIESEL WORKING PROCESS DIAGNOSTING WITH STANDARD MODELS AND WAVELET TECHNIQUES APPLICATIONS

Рассматривается способ диагностирования рабочего процесса судового дизеля в рейсе по инвариантам, установленным по эталонным моделям с применением вейвлетов. Для квазистатических режимов способ применен на танкере дедвейтом 66881 р. т с целью функционального диагностирования главного двигателя судна MITSUI B&W 6L80GFCA. Эффективная мощность двигателя 11 900 кВт (16 180 л. с.). Завод-изготовитель: MITSUI Engineering and shipbuilding Co., LTD.

Ship diesel working process diagnostic mode is considered. Invariants in trip are defined by standard models with wavelet tools applications. The mode is applied to functional diagnostics of MITSUI B&W 6L80GFCA ship diesel in sea tanker of 66881 register tons. Diesel effective power is 11900 kW (16180 HP). Diesel-building plant is MITSUI Engineering and shipbuilding Co. LTD.

Ключевые слова: функциональное диагностирование, судового дизель, сплайн-аппроксимация, интерполяция, ряды Фурье, вейвлет, квазистатический режим.

Key words: functional diagnosis, ship diesel, spline approximation, interpolation, Fourier's ranks, wavelet, quasistatic mode.



ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ эффективность судна непосредственно зависит от технического состояния главных и вспомогательных двигателей, являющихся основными потребителями топлива в рейсе. Поэтому их функциональному диагностированию, то есть проверке правильности функционирования в процессе выполнения ими основных технологических операций по назначению, всегда уделялось большое внимание.

При диагностировании судового дизеля необходимо выполнять проверку исправности, работоспособности и правильности его функционирования. Исправный объект характеризуется от-

сутствием дефектов при соблюдении всех требований нормативно-технической документации. Проверка работоспособности состоит в анализе правильности выполнения требуемых технологических функций на всех режимах работы с сохранением заданных значений параметров и признаков в допустимых областях работоспособности. Проверка правильности функционирования производится в рабочем режиме в данный момент времени при конкретном рабочем входном сигнале. Достоинством проверки во время функционирования объекта является оперативность получения информации о возможных отклонениях его характеристик от величин, определенных допустимой областью работоспособности, о приближении к граничным значениям этой области с целью исключения возможности перехода объекта в неисправное состояние. Даже при невысокой полноте контроля такая проверка целесообразна для динамических объектов и систем, находящихся длительное время в эксплуатации в режимах, близких к установившимся.

Автоматизированные установки главных и вспомогательных дизелей сухогрузных судов, танкеров, газовозов, контейнеровозов, ледоколов, буксиров-толкачей, высокопроизводительных судов технического флота, как правило, оборудуются электронными микропроцессорными системами для измерения рабочих параметров дизелей в различных условиях эксплуатации. Такие системы для крупных судов выпускаются фирмами "NORCONTROL", "AUTRONIC" и другими и предназначены для оценки основных показателей, характеризующих механическую и тепловую напряженность судовых дизелей во время эксплуатации. Измерениям подлежат давление сжатия в цилиндрах дизеля, давление сгорания, давление расширения, среднее индикаторное и эффективное давление, температура выпускных газов, индикаторная и эффективная цилиндровая мощность. Оценивается механический КПД двигателя. Выполняются графические построения индикаторных диаграмм.

Однако вышеуказанные системы не обеспечивают комплексного анализа технического состояния дизелей, в частности топливной аппаратуры, цилиндропоршневой группы, турбонаддува, системы газовыпуска и др. К тому же до настоящего времени судовые главные и вспомогательные ДВС (более 35 % от всего состава мирового флота) еще не оборудованы электронными микропроцессорными системами и техническими средствами для функционального диагностирования, параметрической идентификации моделей, измерения нагрузки и выполнения других технологических операций. Поэтому способы диагностирования технического состояния судовых дизелей в условиях эксплуатации приходится непрерывно совершенствовать путем выбора совокупности надлежащих диагностических признаков, удовлетворяющих требованиям измерений, информативности и инвариантности. Требуется создание более совершенных алгоритмических структур и устройств для параметрической оценки измеряемых сигналов на базе теории идентификации с использованием эталонных значений диагностируемых параметров, полученных по результатам стендовых испытаний, буксировочным характеристикам, испытаниям гребного винта в свободной воде и тому подобного с окончательной проверкой и коррекцией инвариант на ходовых испытаниях.

Создание высокоточных моделей отдельных процессов и элементов, являющихся составными частями полной (общей) модели ДВС, играет определяющую роль в обеспечении высокой степени адекватности качества численного моделирования. Эксперимент является наиболее важным средством оценки достоверности реализуемой системы моделей и корректности алгоритмических решений. В процессе численного моделирования учитывается специфика технологических процессов преобразования тепловой энергии в механическую работу, характерная для конкретного объекта. Модель объекта реализуется при наличии информации о конструктивных параметрах, параметрах настройки, характеристиках внешней среды. Наиболее наукоемкой частью моделирования является решение инверсной задачи динамики и получение искомых периодических процессов в цилиндрах двигателя при заданном порядке их работы, определение параметров наддува на основе балансировки мощности агрегатов воздухообеспечения, а также процессов в выпускном коллекторе и газовой турбине на различных режимах. Сравнительная оценка результатов моделирования с экспериментом проводится также для согласования и оцен-

ки параметров уравнений сгорания топлива, теплопередачи и других моделей, основанных на эмпирических зависимостях.

Построение и реализация высокоточных алгоритмов аппроксимации экспериментальных характеристик, позволяющих значительно уменьшить погрешность моделирования, существенно упрощают вычислительные процедуры оценки параметров, поскольку допускают получение производных от переменных состояния с помощью функций различных вычислительных сред при малом уровне помех. Например, с помощью пакета функций сплайн-аппроксимации возможно реализовать интерполяционные процедуры, базирующиеся на свойствах минимальной кривизны интерполяционной характеристики, точно проходящей через узлы интерполяции при обеспечении равенства производных слева и справа от каждого узла. В результате путем построения сплайна от сплайна можно также получить малую погрешность в оценке второй производной. При наличии производных и значений сигналов далее нетрудно получить переопределенную систему уравнений, линейных относительно искомых параметров модели, и с помощью метода наименьших квадратов решить инверсную задачу динамики.

В настоящее время для получения индикаторных диаграмм наряду с механическими индикаторами широко используются электронные системы контроля рабочего процесса дизеля, которые могут применяться в составе судовых диагностических комплексов. В работе [4, с. 30–33] показано, что в спектре сигнала давления в цилиндре двигателя могут содержаться высокочастотные гармонические составляющие. Эти составляющие плохо воспроизводятся при аппроксимации характеристик с помощью ортогональных полиномов, в частности рядов Фурье. Во временной области им соответствуют отдельные импульсы, а также сигналы небольшой продолжительности.

Исследования показали, что на результаты индицирования дизеля могут существенно влиять динамические характеристики самого индикаторного канала. Поскольку давление газов в цилиндре передается к датчику по индикаторному каналу, то собственная частота канала зависит не только от его геометрических параметров, но и от режима работы двигателя. Колебания, возникающие в индикаторном канале, значительно искажают сигнал и, следовательно, вносят погрешность в определение показателей рабочего процесса [4].

Следует отметить, что проблема, связанная с применением индикаторов как динамических объектов в процессе эксплуатации судовых машин и механизмов, была ранее рассмотрена в классических трудах академика А. Н. Крылова [3, с. 278–297]. Исследуя перемещения поршня механического индикатора под действием давления пара, он не только обнаружил погрешности показаний прибора, но и установил правило устранения этих погрешностей: для правильности показаний индикатора необходимо, чтобы период основного колебания его пружины вместе с поршнем был мал по сравнению с продолжительностью нарастания давления. Процессы же, протекающие в индикаторных каналах и имеющие периодический характер, в момент нахождения поршня двигателя в зоне верхней мертвой точки аналогичны тем, которые исследовал А. Н. Крылов при определении продольных колебаний ствола орудия — морской 4-дюймовой пушки 60-го калибра.

В работе [4] приведены рекомендации по устранению погрешностей индицирования, выраженные в терминах частоты вращения вала двигателя, а в случае применения рядов Фурье для аппроксимации периодической кривой изменения давления в цилиндре двигателя предложено использовать индикаторный канал в форме низкочастотного фильтра с полосой пропускания не менее 20 гармоник основной частоты, равной частоте вращения вала двигателя.

Содержание в составе аппроксимируемых кривых во временной области импульсных сигналов и сигналов прямоугольной формы (меандров) приводит к большой погрешности их восстановления путем суммирования гармонических составляющих, ввиду проявления эффекта Гиббса. Фурье-синтез прямоугольных функций показал, что волнообразные колебания на левой и правой границах сигнала прямоугольной формы сохраняются при числе гармоник, превышающих несколько тысяч. Сигналы в виде кратковременных импульсов с помощью Фурье-анализа практически не обнаруживаются. Последнее означает, что, например, при ударе гребного винта о небольшую льдину или иной твердый предмет импульсный сигнал не будет идентифицирован даже при нали-

ции безынерционного датчика информации. Иначе говоря, с помощью рядов Фурье весьма трудно обеспечить возможность обнаружения локальных особенностей сигналов и функций. Иррегулярные функции, частотные и масштабные характеристики которых эволюционируют во времени, не могут быть адекватным образом представлены с помощью бесконечного числа гармоник. На практике же очень важно локализовать моменты разладок, соответствующие изменениям этих характеристик.

Для получения высокой точности воспроизведения измеряемых сигналов следует использовать математический аппарат приближения функций, свободный от указанных недостатков, в частности вейвлеты и вейвлет-преобразования [1].

Вейвлет-анализ и полученные по его результатам спектрограммы составляют инструмент исследования сигналов с локальными особенностями, не обязательно обладающих свойствами периодичности и стационарности. Этот аппарат позволяет легко определять местоположение локальных особенностей в амплитудно-временной области, что практически невозможно выполнить при спектральном анализе Фурье.

Числом используемых при разложении сигнала вейвлетов задается уровень декомпозиции сигнала. Точность представления сигнала по мере перехода на более низкие уровни декомпозиции снижается, но зато улучшаются условия его обработки [5, с. 313–323].

Процедуры вейвлет-анализа сигналов предусматривают их разделение на две составляющие: аппроксимирующую (грубую) и детализирующую (утонченную). Каждый шаг разделения соответствует определенному уровню декомпозиции и восстановления сигнала, которые могут производиться как во временной, так и в частотной областях. В среде MatLab принят ниспадающий порядок следования («дерево») коэффициентов, дающий улучшение приближения в процессе реконструкции сигнала. Чем меньше номера коэффициентов, тем ближе реконструированный сигнал к оригиналу.

Рассматривается способ диагностирования рабочего процесса судового дизеля в рейсе по инвариантам, установленным по эталонным моделям с применением вейвлетов. Вейвлет-преобразование изменения давления выполним в кодах MatLab с помощью файла sah568f.m.

```
% sah568f.m
% Вейвлет-диагностика.
%=====
% Давление в цилиндре двигателя.
% =====
% Исходные данные представлены матрицей Z размерности (73x2), где
% в первом столбце содержится угол (в градусах), а во втором - давление
% в цилиндре двигателя (бар), соответствующее каждому значению угла
% поворота коленчатого вала.
load Z
% Сплайн-аппроксимация столбцов матрицы Z.
fi=-160:0.5:200;
Pcs=spline(Z(:, 1 ),Z(:, 2), fi 1);
% Формирование рабочего цикла:
fi=-160:0.5:200;
% Вектор P размерности (1x720)
P=[Pcs];
% РЕЖИМ ДИАГНОСТИКИ
% Наложение на эталонный сигнал P аддитивного сигнала, содержащего
% шум с равномерным распределением :  $y=(b-a)*x+a$ . Здесь b - верхняя
% граница сигнала, a - нижняя граница, x - стандартный сигнал равномерного
% распределения со средним 0.5 и границами (0,1). Шум наложен на три
% элемента вектора P с номерами (501, 502 и 503). Импульс с амплитудой 3.0
```

```

%наложен на элемент вектора 604, что следует из записи f.
a=l;b=3;
% Наложение "помехи" на "эталонный" сигнал
f=[zeros(1,500) (b-a)*rand(1,3)+a zeros(1,100) 3.0 zeros(1,117)];
P=P+f;
v=size(P);
% Обозначения:
s=P(1:v(2));
l_s= length(s);
% Трехступенчатая форма разложения s по схеме Sm3=A3+D1+D2+D3:
% Первый уровень аппроксимации.
% Разложение s=P на вейвлет-компоненты по схеме Sml=A1+D1
% Вейвлет-функция dbl из группы вейвлетов Добеши:
[cA1,cD1] = dwt(s,'dbl');
A1 = upcoef('a',cA1,'dbl',1,l_s);
D1 = irpcoe^',cO1,'aBГ,1,1_8);
A1 = idwt(cA1,[],'dbl',l_s);
D1=idwt([],cD1,'dbl',f_s);
% Вейвлет-реконструкция сигнала первого уровня.
Sml=idwt(cA1,cD1,'dbl',l_s);
% Максимум абсолютного значения ошибки аппроксимации первого уровня:
err = max(abs(s-Sml));
% Второй и третий уровни аппроксимации.
[C,L] = wavedec(s,3,'dbl');
cA3 = appcoef(C,L,'dbl',3);
cD3 = detcoef(C,L,3);
cD2 = detcoef(C,L,2);
cD1 = detcoef(C,L,1);
[cD1,cD2,cD3] = detcoef(C,L,[1,2,3]);
A3 = wrcoef('a',C,L,'dbr',3);
D1=wrcoef('d',C,L,'dbl',1);
D2 = wrcoef('d',C,L,'dbl',2);
D3 = wrcoef('d',C,L,'dbl',3);
Sm3 = waverec(C,L,'dbl');
err = max(abs(s-Sm3))
% Для рассматриваемого процесса получен результат:
%err = 4.9738e-014.
% Оценка детализирующих коэффициентов на трех уровнях:
subplot(3,1,1); plot(fi,D1);grid; 11ie('Уровень детализации 1');
%axis off
subplot(3,1,2); plot(fi,D2);grid; 11ie('Уровень детализации 2');
%axis off
subplot(3,1,3); plot(fi,D3);grid; 11ie('Уровень детализации 3');
pause
% Графические построения исходной кривой P
% давления газов в цилиндре и вейвлет-модели Sm:
[thr,sorh,keepapp] = ddencmp('den','wv',s);
Sm = wdencmp('gbr,C,L,'dbl',3,thr,sorh,keepapp);
subplot(2,1,1); plot(fi,P);grid; иИе('Оригинал')
subplot(2,1,2); plot(fi,Sm);grid; 11ie('Вейвлет-модель')

```


Экспериментальные данные в виде вектора Z размерности (73×2) содержат в первом столбце угол (в градусах), а во втором — давление в цилиндре дизеля (бар), соответствующие каждому значению угла поворота коленчатого вала [2]. Их аппроксимация на одном рабочем цикле осуществлена с помощью сплайна с шагом дискретности 0.5° . Затем восстановлен рабочий цикл (при угле поворота $\varphi_i = -160:0.5:200$ градусов) с вектором исходных данных давления P размерности (1×721) . Для решения задачи диагностики на «эталонный» сигнал P аддитивно наложен сигнал, содержащий шум с равномерным распределением: $y = (b-a) \cdot x + a$. Здесь b — верхняя граница сигнала, a — нижняя граница, x — стандартный сигнал равномерного распределения со средним 0.5 и границами (0,1). Шум наложен на три элемента вектора P с номерами (501, 502 и 503). Дополнительно для создания помехи сгенерирован импульс с амплитудой 3.0 (элемент вектора 604), что следует из записи f (см. файл `sah568f.m`).

Вектор P разложен на вейвлет-компоненты по схеме $S_{m1} = A1 + D1$, где $A1$ — аппроксимирующая и $D1$ — детализирующая составляющие первого уровня аппроксимации. При разложении применен вейвлет `db1` из группы вейвлетов Добеши:

$$S = P,$$

$$[cA1, cD1] = \text{dwt}(S, 'db1'),$$

где оператор `dwt` использован для расчета вектора аппроксимирующих коэффициентов `cA1` и вектора `cD1` детализирующих коэффициентов путем декомпозиции вектора S с помощью `db1`. Для реконструкции коэффициентов применена функция `upcoef`. Синтаксис функции:

$$Y = \text{upcoef}(0, X, 'wname', N, L),$$

где Y — коэффициенты, 0 — вид аппроксимации (0='a' — аппроксимация, 0='d' — детализация), X — аппроксимируемый вектор, N — уровень аппроксимации, L — расстояние по оси абсцисс, 'wname' — наименование используемого вейвлета. В файле эта операция представлена следующими зависимостями:

$$A1 = \text{upcoef}('a', cA1, 'db1', 1, 1_s).$$

Одноуровневое обратное дискретное вейвлет-преобразование сигнала давления S в файле выполнено с помощью функции `idwt`. На рис. 1 представлены исходная характеристика и характеристика вейвлет-модели

$$S_{m1} = \text{idwt}(cA1, cD1, 'db1', 1, 1_s),$$

которая фактически воспроизводит эксперимент.

Оценка максимума абсолютного значения разности векторов модели и эксперимента равна

$$\text{err} = \max(\text{abs}(S - S_{m1})) = 2.1316 \cdot 10^{-14}.$$

Выполнение второго и третьего уровней аппроксимации по схеме

$$S_{m3} = A3 + D1 + D2 + D3$$

позволило получить оценку ошибки

$$\text{Err} = \max(\text{abs}(s - S_{m3})) = 4.9738 \cdot 10^{-14}.$$

Заметим, что такую малую оценку погрешности невозможно получить с помощью других методов разложения аппроксимируемой характеристики давления P на составляющие.

В приведенном файле предусмотрены графические построения коэффициентов вейвлет-декомпозиции сигнала давления в цилиндре дизеля на всех уровнях. На рис. 1 приведены графики коэффициентов для трехуровневого разложения.

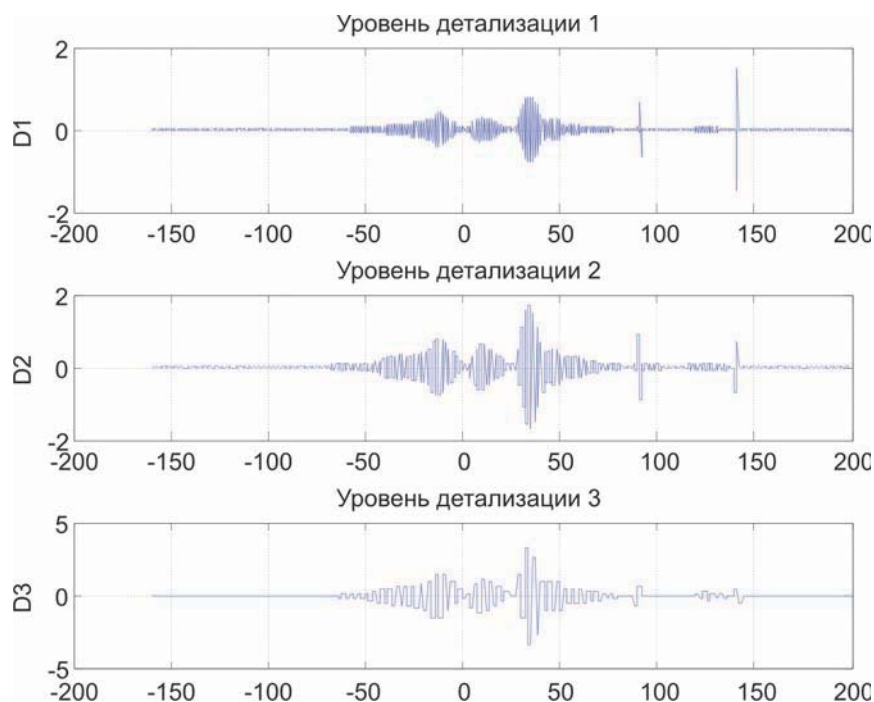


Рис. 1. Коэффициенты вейвлетов на трех уровнях детализации

Рассмотрим теперь режим диагностирования. На рис. 2 представлены две характеристики: эксперимент (верхний график) и его вейвлет-модель (нижний график).

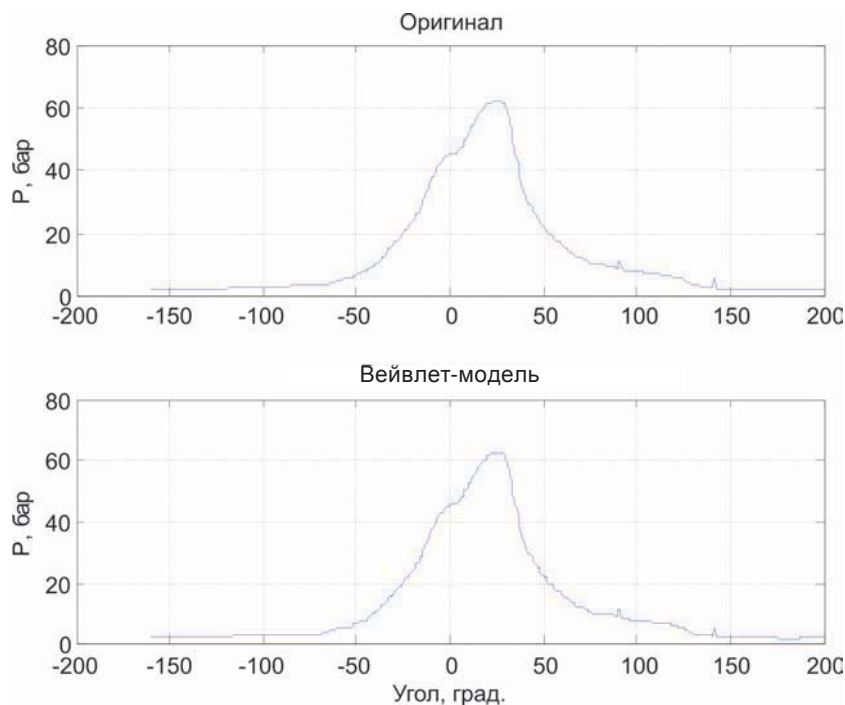


Рис. 2. Эксперимент (верхний график)
и вейвлет-модель диагностируемой характеристики (нижний график)

Видно, что вейвлет-модель точно воспроизводит экспериментальную характеристику и восстанавливает отдельные возмущения в виде кратковременных импульсов, воздействующих на

диагностируемый объект. Эти возмущения практически невозможно восстановить с помощью рядов Фурье и других частотных методов разложения периодических сигналов.

В квазистатических режимах, при отсутствии в составе экспериментальных данных помех в виде кратковременных импульсов, высокоточные процедуры аппроксимации можно реализовать, используя численные методы аппроксимации с высокими разрешающими свойствами. При этом необходимо, чтобы индикаторная диаграмма практически совпадала с расчетной кривой на всех режимах работы дизеля. Тогда при нормальном техническом состоянии судовой дизельной установки с помощью моделей аппроксимации на каждом режиме можно образовать группы массивов «эталонных» индикаторных диаграмм и хранить их в форме полученных оценок коэффициентов.

При кластерной оценке экспериментально определенных коэффициентов представляется возможным иметь «эталонные» множества, где кластеры могут считаться инвариантами, между которыми, в свою очередь, устанавливается связь, позволяющая интерполировать параметры «эталонной» модели на множестве «эталонных» режимов.

Аналогичные модели можно построить по измерениям температуры газов перед турбиной, давления в коллекторе. В результате инвариантные множества параметров оценки могут быть непосредственно использованы в диагностической модели рабочего процесса дизеля. При возникновении искажений индикаторной диаграммы вследствие потери герметичности выпускных клапанов, из-за износа компрессионных колец поршня, ухудшения работы топливной аппаратуры либо повреждений движительного комплекса судна изменяется форма индикаторной диаграммы и, как следствие, параметры модели аппроксимации. Смещение параметров за пределы границ, определенных кластером, служит диагностическим признаком возникновения неисправностей в работе СЭУ.

Способ диагностирования рабочего процесса судового дизеля по инвариантам, установленным по эталонным моделям, был апробирован и применен на главном двигателе MITSUI B&W 6L80GFCA (завод-изготовитель MITSUI Engineering and shipbuilding Co., LTD). Двигатель установлен на нефтеналивном судне дедвейтом 66 881 р. т. Построечная скорость судна в грузу 15,68 уз. при номинальных оборотах вала двигателя $n_{\text{НОМ}} = 97\%$ от $n_{\text{МАХ}} = 102$ об/мин. Эффективная эксплуатационная мощность двигателя 11 900 кВт (16 180 л. с.).

Способ включает операции индицирования главного двигателя с записью параметров работы в целом и обслуживающих его систем (MEPERFORMANCEDATA), алгоритм и математическую модель обработки эксперимента и совершенствования технологических операций по оценке технического состояния.

Алгоритм и математическая модель использованы для повышения точности аппроксимации площадей индикаторных диаграмм с последующими оценками технического состояния топливной аппаратуры, условий функционирования цилиндропоршневой группы, системы турбонаддува и др.

Погрешность при обработке индикаторных диаграмм всех цилиндров на различных режимах была уменьшена за счет применения программы WINDOWS 2003 — EXE. Индицирование проводилось в рейсах на судне в течение семи месяцев — с апреля по октябрь 2011 г.

Способ использован для построения диаграмм, предназначенных для определения среднего индикаторного давления (по цилиндрам), зависимости максимального давления сгорания от среднего индикаторного давления, давления сжатия от среднего индикаторного давления. Получена диаграмма для оценки режимов функционирования турбоагнетателя. Математическая модель обработки данных и алгоритм вычислений представлены математическими соотношениями, предназначенными для приведения рабочих параметров дизеля в период эксплуатации к эталонным значениям, что позволило диагностировать техническое состояние двигателя в целом. В результате модельная и алгоритмическая оценки качества технологических операций элементов и систем дизеля позволили судовой команде оперативно и целенаправленно восстанавливать требуемые показатели рабочего процесса дизеля во время рейса, осуществлять мониторинг технического состояния судового энергетического комплекса.

Список литературы

1. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике / В. П. Дьяконов. — М.: СОЛОН-Р, 2002. — 448 с.
2. Иванченко Н. Н. Высокий наддув дизелей / Н. Н. Иванченко, О. Г. Красовский, С. С. Соколов. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. — 198 с.
3. Крылов А. М. Собрание трудов академика А. Н. Крылова / А. М. Крылов. — М.; Л., Изд-во АН СССР, 1948. — Т. X: Вибрация судов, § 55.2.
4. Самойленко А. Ю. Влияние индикаторного канала на результаты индицирования судового дизеля / А. Ю. Самойленко // Транспортное дело России. — М., 2003. — Спецвып.: Проблемы водного транспорта Российской Федерации.
5. Сахаров В. В. Вейвлет-аппроксимация изменения давления в цилиндре дизеля / В. В. Сахаров, В. И. Королев, А. А. Евсюков // Исследование, проектирование и эксплуатация судовых ДВС: тр. II Междунар. науч.-техн. семинара, 27 сентября 2007 г. — СПб.: СПГУВК, 2008.

УДК 621.311.1

А.Б. Каракаев,
д-р техн. наук, профессор;
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

А. В. Луканин,
канд. техн. наук, доцент
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТИ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ

THEORETICAL BASIC OF SHIP ELECTRICAL POWER SYSTEM CONTROLLABILITY AND ITS ELEMENTS

В статье рассмотрены вопросы представления судовой электроэнергетической системы с помощью логической модели, представлены функциональная, структурная и формализованная схемы, проводится анализ характера функционирования элементов и блоков судовой электроэнергетической системы.

In the article there are considered questions of ship electrical power system presentation by logical model, there are presented functional, structural and formalized schemes, there is given an analysis of functionality character of ship electrical power system elements and blocks.

Ключевые слова: судовой электроэнергетическая система, электрооборудование, контролепригодность.
Key words: ship electrical power system, electrical equipment, controllability.

В СООТВЕТСТВИИ с рекомендациями, изложенными в [1, с. 63–67], рассмотрим основные аспекты разработки теоретических основ анализа контролепригодности (КП).

Судовая электроэнергетическая система (СЭЭС) представляет собой систему, состоящую из логически и функционально взаимосвязанных блоков (генераторных агрегатов, секций главных распределительных щитов (ГРЩ), электростанции (ЭСТ), отсечных распределительных щитов, устройств переключения электропитания и т. д.), для процесса функционирования которой можно построить граф причинно-следственных связей. В связи с этим наиболее целесообразным