

ИНТЕНЗИФИКАЦИЯ НА ТОПЛООБМЕНА В КОРАБНИТЕ ТОПЛООБМЕННИ АПАРАТИ ПОСРЕДСТВОМ ПРОМЯНА НА ХИДРОДИНАМИКАТА НА ПОТОКА

Николай М. Керемегчиев, ВВМУ "Н. Й. Вапцаров", Варна

INTENSIFICATION OF THE HEAT EXCHANGE IN THE SHIPS HEAT EXCHANGERS BY MEANS OF STREAM'S HYDRODYNAMIC CHANGE

Nikolaj M. Keremedchiev, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna

Abstract: *A new method for improving the heat exchange in the ships heat exchangers is shown in the report. The results from the experimads are also shown. An analisys has been made and the conse quent codusions werw also made.*

Key words: *heat exchanger, turbulence, boundary layer.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

При взаимодействието между твърда, непроницаема, топлопредаваща стена и обмиващия еднофазов поток, се образува пристенен граничен слой, който се явява и основното хидравлично съпротивление при топлопредаването. Колкото по-голяма е неговата дебелина, толкова топлоотдаването е по-слабо. Ето защо за ускоряването на процеса на топлообмена е необходимо да се въздейства на граничния слой така, че той или да бъде разрушен, или да се окаже възможно най-тънък.

Най-простият способ за интензификация на топлообмена се състои в увеличаването на скоростта на постъпващия флуиден поток. Увеличаването на тази скорост обаче е ограничено, тъй като с нарастването ѝ нараства силно и хидравличното съпротивление, което въпреки че е полезно (съпротивление от триене), води до увеличаване на мощността, необходима за преминаване на флуида през топлообменника.

От хидродинамиката е известно, че движението на флуида в тръба може да е ламинарно или турбулентно. Като критерий за вида на течението служи критерият на Рейнолдс:

$$Re = \omega \cdot d / \nu \quad ,$$

където ω е скоростта на флуида, m/s ;

d - диаметър на тръбата, в която се разглежда течението, m ;

ν - коефициент на кинематичния вискозитет, m^2/s .

Критерият на Рейнолдс е безразмерна величина и характеризира отношението на силите на инерция и вискозитет. По неговата стойност се съди за характера на флуидното течение: при $Re < 2\,300$ движението е ламинарно; при $Re > 10\,000$ - турбулентно, а при $2\,300 < Re < 10\,000$ - преходно (от ламинарно към турбулентно). Между двата вида движение съществува

голяма разлика както по отношение на скоростния профил на напречното сечение на потока, така и по отношение на пренасянето на топлина от флуида към стената на тръбата, или обратно. Това се дължи на интензивното разместване на флуидните частици при турбулентния режим.

Необходимо е да се знае, че колкото по-ниска е стойността на Re , при която ще се постигне устойчива турбулизация в граничния слой, толкова по-големи са възможностите за интензификация на конвективния топлообмен, чрез увеличаване на скоростта на потока, като толкова по-ефективна е и интензификацията от гледна точка на понижаването на загубата на напор, изразходван за достигане на съответната висока интензивност на топлообмена.

Основните методи за интензификация на конвективния топлообмен включват: методи с увеличения на топлообменната повърхност; методи с хидродинамично въздействие върху потока; методи с механично въздействие върху топлообменната повърхност; методи, при които се въздейства върху потока посредством електрическо и/или магнитно поле.

2. ИЗЛОЖЕНИЕ

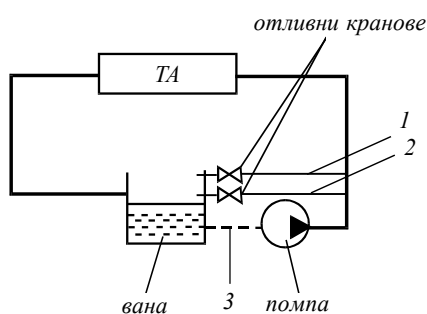
Способът за интензификация на топлообмена, разглеждан в настоящия доклад, е от групата методи, при които върху флуидния поток се въздейства хидродинамично - един нов начин за организиране на топлообменния процес, който понастоящем не е изследван достатъчно задълбочено.

Проблемът за намаляването на дебелината или за разрушаването на ламинарния слой, образуван при обтичане на топлообменна повърхност, може да бъде решен и по следния начин: чрез атакуване на пристенния слой с еднороден флуиден поток. Този поток се влива по перпендикулярно направление спрямо движението на основния поток на топлоносителя (флуид, в конкретния случай - вода), който обмива надлъжно нагретата повърхност. Образуваните по

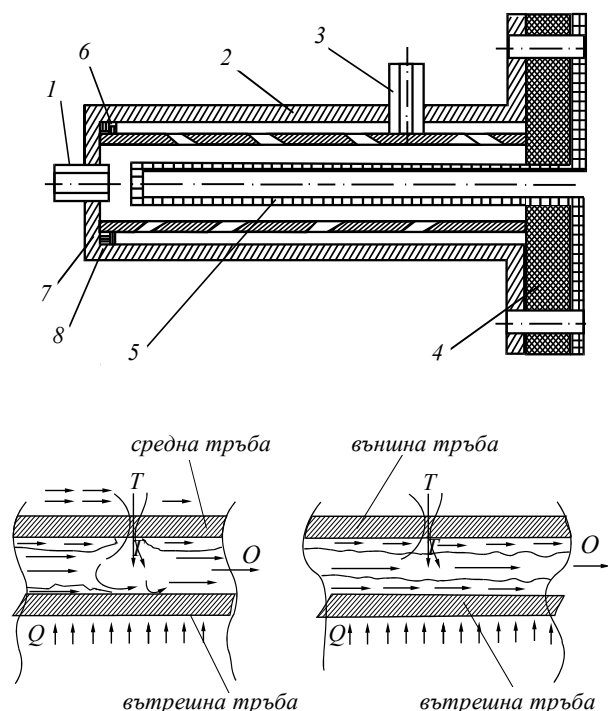
този начин вихри предизвикват изтъняване на ламинарния слой и при определени условия - разрушаването му.

Предложеният модел на топлообменен апарат (ТА) се състои от три тръби с различен диаметър, които са разположени една в друга. В най-вътрешната тръба, чийто диаметър е най-малък, е поместен електрически нагревател, осигуряващ постоянен топлинен поток през стените ѝ. Тръбата с най-голям диаметър, която е и външна, се явява корпусната. Средната тръба, разпробита с определен брой отвори с зададен диаметър, се явява турболизатор на потока.

Всички проведени опити са извършени с едно и също количество вода, циркулиращо в опитната уредба, чиято схема е представена на фиг. 1. На фиг. 2 е представен общият чертеж на ТА.



Фиг. 1. Схема на опитната уредба. Тип линии: рециркуляционна отливна (1), нагревателна (2), всмукателна (3)



Фиг. 2. Общ чертеж на топлообменния апарат: 1 - щуцер изходен; 2 - корпус; 3 - щуцер входен; 4 - уплътнение; 5 - тръба нагревател; 6 - пръстен поддържащ; 7 - тръба турболизираща

Движението на потока флуид вътре в ТА на представената опитна уредба се осъществява както следва:
- След помпата, потокът постъпва в топлообменника през входящия щуцер, след което флуидът се разделя на два по-малки потока, условно обозначени на фиг. 2 с "О" и "Т".

Поток "О" е основният. Той обмива тръбата, в която е поместен нагревателя, т.е. този поток се движи между тръбите с най-малък и среден диаметър.

Поток "Т" е турболизиращият поток, който преминавайки през отворите на средната тръба създава вихри в относително спокойният основен поток.

И така в крайна сметка се получава последователно вливане на части от поток "Т" в поток "О", като през всеки един отвор се оформя струя, която смесвайки се с основния, го турболизира.

Основните параметри, от които зависи струйното вихрообразуване около топлообменната повърхност са следните: 1. Пад на налягане на флуида между вход и изход на ТА; 2. Дебитите на потоците "О" и "Т"; 3. Геометричните размери на тръбите; 4. Формата, размерите, стъпката и взаимното разположение на отворите по средната тръба.

Данните за уредбата са:

1. Тръба стоманена безшевна (нагревател), фиг. 2, елемент 5

Външен диаметър $D = 34 \text{ mm}$

Вътрешен диаметър $D_{\text{от}} = 26 \text{ mm}$

Дебелина на стената $\delta = 4 \text{ mm}$

Дължина $L = 1000 \text{ mm}$

Забележка: В тази тръба е поместен нагревателят.

2. Тръба стоманена безшевна (турболизираща), фиг. 2, елемент 7

Вариант 1

Външен диаметър $D_1 = 57 \text{ mm}$

Вътрешен диаметър $D_{1\text{от}} = 49 \text{ mm}$

Дебелина на стената $\delta_1 = 4 \text{ mm}$

Дължина $L_1 = 1000 \text{ mm}$

Брой на отворите 50 броя

Ъгъл между отворите 90°

Вариант 2

Външен диаметър $D_2 = 60 \text{ mm}$

Вътрешен диаметър $D_{2\text{от}} = 52 \text{ mm}$

Дебелина на стената $\delta_2 = 4 \text{ mm}$

Дължина $L_2 = 1000 \text{ mm}$

Брой на отворите 14 броя
Ъгъл между отворите 90°

Вариант 3

Външен диаметър $D_3 = 60\text{ mm}$
Вътрешен диаметър $D_{3\text{ вт}} = 52\text{ mm}$
Дебелина на стената $\delta_3 = 4\text{ mm}$
Дължина $L_3 = 1000\text{ mm}$
Брой на отворите 14 броя
Ъгъл между отворите 180°

3. Тръба стоманена безшевна, фиг. 2, елемент 2

Външен диаметър: $D_k = 76\text{ mm}$
Вътрешен диаметър: $D_{k.\text{вт}} = 70\text{ mm}$
Дебелина на стената: $\delta_k = 3\text{ mm}$
Дължина: $L_k = 1000\text{ mm}$

Забележка: Тази тръба представлява корпуса на ТА.

4. Нагревател електрически - мощност 1,5 kW, захранване с напрежение 220 V, 50 Hz.

5. Помпа циркулационна

Помпата е центробежна и има следните характеристики:

Дебит: $Q = 40\text{ l/min}$
Напор: $H = 42\text{ m}$
Входяща мощност: $P = 0,37\text{ kW}$
Честота на въртене: $n = 2900\text{ min}^{-1}$
Захранване: 220 V, 50 Hz

6. Ваня метална

Тя съдържа определено количество от работния флуид и е с размери: 405x350x185 mm.

7. Шлангове термоустойчиви - диаметър 20 mm, сумарна дължина - 327 mm.

Забележка: Шланговете свързват отделните елементи на опитната уредба.

8. Кранове сферичен тип 1/2 цола.

9. Измерватели - термометър лабораторен с обхват $(-10 \div -110)^\circ\text{C}$.

При осъществяването на опити е спазена следната последователност:

1. Запълване на ваната с 15 литра работен флуид (вода) - фиг. 1.

2. Измерване на температурата на водата във ваната.

3. Измерване на температурата на въздуха в помещението.

4. Включване на циркулационната помпа (фиг. 1) и проверка за наличие на неплътности по цялата система.

5. Включване на електрически нагревател.

6. Отчитане на температурата на водата във ваната на интервали от 5 минути в продължение на 55 минути. Измерването стартира след като температурата на водата достигне 21 °C.

7. След изтичане на времето на опита нагревателят се изключва. Водата се оставя да циркулира в системата още 2-3 минути.

8. Изключване на циркулационната помпа.

Опитно установени данни без средна тръба

Температура на околния въздух 16 °C, дебит на помпата: 34,3 l/min, отдадена към водата топлина: 163,05 kJ/kg).

Опитно установени данни със средна тръба № 1

Температура на околния въздух, °C	Диаметър на отворите, mm	Дебит на помпата, l/min	Отдадена към водата топлина, kJ/kg	Нарастване на топлообмена, %
17	2	30	163,05	0
17	2,5	33	163,145	1,28
17	3	33	163,05	0
17,5	3,5	34	170,166	4,36
17,5	4	34	163,05	0

Опитно установени данни със средна тръба № 2

Температура на околния въздух, °C	Диаметър на отворите, mm	Дебит на помпата, l/min	Отдадена към водата топлина, kJ/kg	Нарастване на топлообмена, %
18	3	32,6	170,166	4,366
19	3,5	31,6	158,87	- 2,57
19	3,5	21,4	175,61	7,7
19	3,5	19,5	170,584	4,62
19	4	33,3	170,584	4,62
19,5	4	21,4	177,705	8,99
19,5	4	20	165,145	1,28
19,5	4,5	33,43	166,4	- 2,05
19,5	4,5	22,22	175,561	7,7
19,5	4,5	20	158,87	- 2,5

Опитно установени данни със средна тръба № 3

Температура на околния въздух, °C	Диаметър на отворите, mm	Дебит на помпата, l/min	Отдадена към водата топлина, kJ/kg	Нарастване на топлообмена, %
18	3	32,6	177,6	7,08
19	3,5	31,6	167,24	2,57
19	3,5	21,4	170,584	4,62
19	3,5	20	169,85	3,85
19,5	4	33,3	167,24	- 2,57
19	4	21,4	175,61	7,7
19,5	4	20	173,515	6,42
19,5	4,5	33,33	170,584	4,62
19,5	4,5	22,22	163,88	0,5
19,5	4,5	20	173,467	6,4

3. ИЗВОДИ

Анализът на резултатите от осъществените експерименти е основание за следните изводи:

1. Най-голямо нарастване на топлообмена (8,99%) се получава при средна тръба - вариант 2, на която са разпробити 14 отвора с диаметър 4 mm и дебит на помпата $Q = 20 \text{ l/min}$.

2. Добри са и получените резултати при средна тръба - вариант 2, на която са разпробити 14 отвора с диаметър 4,5 mm и дебит на помпата $Q = 22,22 \text{ l/min}$ (топлообменът нараства със 7,7%) и при средна тръба - вариант 3, на която са разпробити 14 отвора с диаметър 4 mm и дебит на помпата $Q = 32,6 \text{ l/min}$ (топлообменът нараства със 7,7%).

3. При сумарно сечение на отворите от $175,80 \text{ mm}^2$ и $222,54 \text{ mm}^2$ нарастването на топлообмена е най-голямо.

Наред с цитираните положителни резултати, трябва да се има предвид и че:

1. в местата на отворите е налице ускорено ерозионно износване, с оглед на което цялата средна тръба трябва да бъде изработена от качествена износоустойчива стомана;

2. по сравнително малките отвори е възможно насляване на отлагания, влошаващи работата на ТА;

3. при определени условия наличието на средна тръба може да доведе до намаляване на КПД на ТА в сравнение с КПД на ТА без средна тръба

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. К э й с, В. М., А. Л. Лондон. Компактные теплообменники. М., Энергия, 1967.
2. Л ы к о в, А. В. Тепломассообмен. Справочник. М., Энергия, 1978.
3. С е н д о в, С. Х., П. В. Йорданов. Интензифициране на топлообмена. С., Техника, 1981.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ НА СХЕМАТА НА ВЪВЕЖДАНЕ НА ОГНЕТРЪБНИТЕ ПАРНИ КОТЛИ В ДЕЙСТВИЕ

Николай М. Керемедчиев, ВВМУ "Н. Й. Вапцаров", Варна

RESEARCH OF THE POSIBILITIES FOR OPTIMIZING THE WAY OF PUTTING THE OIL FIRED BOILERS IN OPERATION

Nikolaj M. Keremedchiev, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna

Abstract: *The problems which may follow oil fired boilers putting in operation are shown in the report. The results from the experiments which has been made are also shown. An of operation of the experimental iustalation has been described in the report. The results from the tests which were made are also shown. An analysies has been. A number of designer's suggestions were made. These suggestions could help for problems solution.*

Key words: boiler, stress, operation.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Парните котли се амортизират най-силно по време на въвеждането и спирането им от действие, тъй като именно през този период се създават условия за възникване на топлинни напрежения с до 20 пъти по-големи стойности от възникващите при работата на котела на номинален режим. С оглед на това котлите се въвеждат и спират от действие по определена схема, недопускаща прегряване на отделните му части, вкл. и възникване в конструкцията на по-големи напрежения от разчетните.

Факторите, от които зависи пуска на котела, са: начално топлинно състояние, определено от продължителността на престоя и начина на спирането му; параметрите на работа, вида и мощността му; приспособеността му за пускане и използваната технология.

Режимът на въвеждане на котела в действие трябва да удовлетворява следните изисквания: надеждно протичане на процесите, необходими за охлаждане или равномерно нагряване на всички елементи на котела; скоростта на нагряване на елементите му да е такава, че възникналите в този период напрежения да са по-малки от допустимите; загубите на гориво и енергия по време на пускането да са минимални; безопасната работа на обслужващия персонал и на оборудването да са обезпечени.

В процеса на пускането котелът работи при променливи условия, вследствие на изменението в широки граници на работното налягане, акумулирането на топлина в работната среда и в различните конструктивни елементи, и на топлинното натоварване (0-100%). Очевидно е, че най-важната особеност на пускането на котела се явява различаващата се от номиналните условия работа на конструктивните елементи, които в установен режим нямат съществена роля (например акумулиране на топлина, топлинни напрежения и др.).

2. ИЗЛОЖЕНИЕ

Изследванията сочат, че влияние върху характера на изменението на температурата на продуктите от изгарянето на горивото, работната среда и елементите

на котела, оказват следните параметри:

• **Параметри, свързани с конструкцията на котела:**

1. Параметърът P_k , определен от съотношението на нагревателните повърхности на котела и компановката им.

2. Акумулиращата способност на преобразуващите части на котела, A_k и на паропрегревателя, A_p , определяни от количеството топлина, необходима за изменението на температурата на съответните части на котела с 1°K .

3. Видът на разпалващото гориво, B , който оказва влияние върху големината и компановката на нагревателната повърхност на котела. Той определя още условията на разпалване и интензивността на топлообмена, вкл. КПД на пусковия процес.

4. Хидравличната характеристика на паропрегревателя, определяща степента на равномерност на разпределение на масовите разходи на пара между серпентините на паропрегревателя, n_m^r .

5. Материалите, размерът и конструктивната схема на котела и елементите му, M .

• **Параметри, свързани с технологията на пуска:**

1. Скорост на повишаване на температурата на отделните елементи, т.е. скорост на загреване: $dtn/d\tau$, $^\circ\text{K}/\text{min}$.

2. Коефициент на натоварване на котела: $U_Q(\tau) = Q^r(\tau) / Q^z$, определен от отношението на топлинния поток, подведен в даден момент към котела, $Q^r(\tau)$, към топлинния поток при номинално натоварване, Q^z .

• **Параметри, свързани с конструкцията на котела, топлинното му състояние и технология-**

та на пуска:

1. Температура на елементите при пускане, $tn(\tau)$, характеризираща топлинното състояние на котела в даден момент от пускане. Параметърът определя и моментното отношение на топлината на прегрялата пара към топлината на пареообразуване.

2. Коефициент на излишния въздух, $\alpha^r(\tau)$, зависещ от коефициента на натоварване на котела, U_Q и степента на плътността на котела.

3. Неравномерно топлинно натоварване на паропрегревателя, n_q^r , зависещ от конструкцията му и от разположението на горивните устройства.

• **Основни параметри, свързани с техническото състояние на котела, S:**

1. Степен на чистота на нагревните повърхности.
2. Техническо състояние на горивните устройства.
3. Техническо състояние на арматурата.
4. Техническо състояние на КИП.
5. Техническо състояние на устройствата за автоматично управление.

• **Основни параметри, които най-добре описват процесите "пуск" и "стоп", са:**

- скорост на нагряване на котела, $dt_n/d\tau$,
- коефициент на натоварване на котела, $U_Q(\tau)$;
- топлинно състояние на котела, $tn(\tau)$.

Тъй като продължителността на пускане на котела се определя от най-дебелостенните му елементи, за установяване на оптималната продължителност на неговото въвеждане (спиране) в действие е необходимо да се определи изменението на параметрите и разхода на пара, което би осигурило допустими стойности на загряване (определени от якостните изисквания) на тези елементи.

С цел изследване на възможността за оптимизиране на времето за въвеждане в действие на огнетръбните котли и на възможностите за намаляване на термичните напрежения, възникващи от температурните разлики в различните слоеве на водното пространство на котела, бе **конструиран и изработен опитен образец** със следните характеристики (фиг. 1):

А. Габарити:

- дължина, $L = 800 \text{ mm}$,
- диаметър, $D = 500 \times 3 \text{ mm}$,
- обем: $0,153 \text{ m}^3$.

Б. Нагреватели (фиг. 1, елементи 4):

- брой - 3 бр.,
- мощност: - 1 бр. x 3 KW, 2 бр. x 1 KW.

В. Помпа (фиг. 1, елемент 2):

- тип - водна помпа "370WRD-ПК60",
- мощност: 370 W,
- максимална височина: 5-35 m,
- максимално всмукване: 8 m,
- дебит: 5-40 l/min,
- обороти: 2 900 min⁻¹.

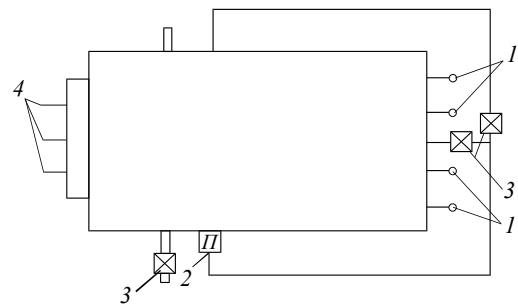
Г. Контролно-измервателни прибори (фиг. 1, елементи 1):

- прибор: 1 бр., модел "SS-Dresdener" - 4-20 mA,
- първични датчици: 4 бр., pt100,
- скала за отчитане на температурата: 1 бр. (0 ÷ 150 °C).

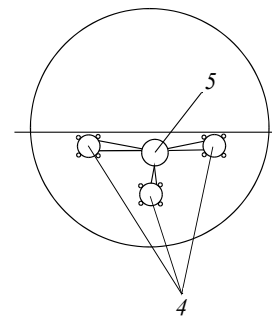
Д. Спирателни кранове (фиг. 1, елементи 3):

4 бр., $\frac{1}{2}$ ''.

Е. Водоразпръскваща тръба (фиг. 2, елемент 5): 1 бр.



Фиг. 1



Фиг. 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО СА ИЗВЪРШЕНИ ТРИ ВИДА ОПИТИ:

ОПИТ 1

Цел: Да се установи каква е температурната разлика между най-горния и най-долния слой вода при естествената ѝ циркулация.

Резултати: Получените при експерименталния опит резултати са представени в табл. 1.

ОПИТ 2

Цел: Да се установят времето, за което температурата на водата в котела достига 84 °С, и температурните разлики между отделните слоеве вода при положение, че е организирана принудителна циркулация на водата. Помпата засмуква вода от най-ниската и я

нагнетява в най-високата част на котела (фиг.1).

Резултати: Получените при експерименталния опит резултати са представени в табл. 2.

ОПИТ 3

Цел: Да се установи времето, за което температурата на водата в котела достига 84 °С при условие, че циркулацията е принудителна, а с помощта на водоразпръскваща тръба с пробити отвори (фиг. 2, елемент

Таблица 1

Без циркулация

min		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
Датчик №, °С	1	15	16	18	20	22	24	26	29	30	32	34	36	38	40	42	43	45	47	48	50	52	54	56
	2	15	15	17	19	21	23	25	28	30	31	33	35	37	39	41	42	44	46	48	49	51	53	55
	3	15	15	15	16	18	20	23	25	27	29	30	32	34	36	38	40	42	43	44	46	48	50	52
	4	15	15	15	15	15	15	15	15	16	16	16	17	17	18	19	19	20	20	21	22	23	24	25
min		115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	217	
Датчик №, °С	1	58	60	61	62	64	66	68	69	70	72	74	75	77	79	80	81	83	85	86	87	89	90	
	2	57	59	60	61	63	65	67	68	69	71	73	75	76	78	79	80	82	84	85	86	88	89	
	3	54	56	57	59	60	62	64	65	67	69	70	72	73	75	77	78	79	81	83	85	86	87	
	4	27	28	29	29	30	32	33	34	35	36	37	39	40	41	43	44	45	46	47	49	50	50	

Таблица 2

Циркулация през големия кръг

min		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115
Датчик №, °С	1	16	18	20	21	22	24	26	27	28	30	32	34	36	38	39	40	42	44	46	48	49	50	51	53
	2	16	18	20	21	22	24	26	27	28	30	32	34	36	38	39	40	42	44	46	48	49	50	51	53
	3	16	18	20	21	22	24	26	27	28	30	32	34	36	38	39	40	42	44	46	48	49	50	51	53
	4	16	18	20	21	22	24	26	27	28	30	32	34	36	38	39	40	42	44	46	48	49	50	51	53
min		120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220	225	230	
Датчик №, °С	1	55	56	58	60	62	64	65	66	68	69	70	71	72	74	75	76	78	79	80	81	82	83	84	
	2	55	56	58	60	62	64	65	66	68	69	70	71	72	74	75	76	78	79	80	81	82	83	84	
	3	55	56	58	60	62	64	65	66	68	69	70	71	72	74	75	76	78	79	80	81	82	83	84	
	4	55	56	58	60	62	64	65	66	68	69	70	71	72	74	75	76	78	79	80	81	82	83	84	

Таблица 3

С турбулизираща тръба с размери: $\phi = 1,5 \text{ mm}$,
разстояние между отворите 35 mm

min		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Датчик №, °С	1	15	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	38	40	41	43	45	47	49	51
	2	15	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	38	40	41	43	45	47	49	51
	3	15	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	38	40	41	43	45	47	49	51
	4	15	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	38	40	41	43	45	47	49	51
min		115	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	207	
Датчик №, °С	1	55	57	58	60	62	64	66	67	68	70	71	73	75	76	78	79	80	82	83	84	
	2	55	57	58	60	62	64	66	67	68	70	71	73	75	76	78	79	80	82	83	84	
	3	55	57	58	60	62	64	66	67	68	70	71	73	75	76	78	79	80	82	83	84	
	4	55	57	58	60	62	64	66	67	68	70	71	73	75	76	78	79	80	82	83	84	

5) се осъществява допълнителна турбулизация на потока (фиг. 1, фиг. 2).

Резултати: В таблица 3 са отразени резултатите от най-добрия опит, постигнат с турбулизираща тръба с отвори $\phi = 1,5 \text{ mm}$ и разстояние между отворите 35 mm . на котвата;

3. ИЗВОДИ

Резултатите от осъществените експерименти са основание за следните изводи:

1. При ОПИТ 1 времето, за което температурата на най-горния слой достига $90 \text{ }^\circ\text{C}$, е 217 min , температурата на най-долния слой е $50 \text{ }^\circ\text{C}$, а температурната разлика между двата слоя е $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

При достигане на температура $150 \text{ }^\circ\text{C}$ в най-горния слой (когато налягането на парата в котела е 5 bar) температурната разлика преди началото на консумацията на пара ще бъде приблизително $60 \text{ }^\circ\text{C}$. При тези условия в котела ще възникнат температурни

напрежения с големи стойности.

2. Резултатите от ОПИТ 2 доказват, че осигуряването на принудителна циркулация при въвеждането на огнетръбния котел в действие гарантира недопускането на температурни разлики между отделните елементи.

3. Резултатите от ОПИТ 3 сочат, че топлообменът нараства с $8,7\%$ при използване на допълнителна турбулизация на водата чрез водоразпръскващата тръба.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Д е р м е н т ъ в, С. Романов, В. Турлаков и др. Проектирование судовых парогенераторов. Л., Судостроение, 1986.

2. М о с к о в, Ю. В. Комплексно управление на КДД чрез адаптивни математични модели. Дисертационен труд. Варна, 2005.

3. Ц ы н а р, Л. Пуск паровых котлов. М., Энергоиздат, 1981.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА СКОРОСТТА НА ОБТИЧАНЕ ВЪРХУ ИНТЕНЗИВНОСТТА НА НАКИПООБРАЗУВАНЕТО ПО НАГРЕВНАТА ПОВЪРХНОСТ НА ТОПЛООБМЕННИТЕ АПАРАТИ

Николай М. Керемедчиев, ВВМУ "Н. Й. Вапцаров", Варна

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE STREAM VELOCITY OVER SCALE INTENSITY OUTO THE HEAT SURFACE

Nikolaj M. Keremedchiev, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna

Abstract: *The principle of operation of the experimental iustalation has been described in the report. The results from the tests which were made are also shown. An analisys and conclusions has been done. Some suggestions which can be used in the practice are also shown.*

Key words: *scale, crystallization, structure.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Отлагането на накип върху нагревната повърхност на топлообменните апарати е резултат от физико-химични процеси, сред които основен е кристализацията. От многокомпонентен преситен разтвор се отделя твърда фаза (накип). Теплоизолационните свойства на накипа зависят от неговите физико-химични показатели. Малкият му коефициент на топлопроводност води до преразход на гориво, активизиране на корозионните процеси и прегряване на метала.

Във водна среда повечето от разтворимите накипообразуващи вещества са във вид на йони. В най-общ случай всяко едно от тях може да бъде представено по следния начин:

$$[K^+] \cdot [A^-] = P_{PKA} \quad ,$$

където $[K^+]$ и $[A^-]$ представят концентрацията на

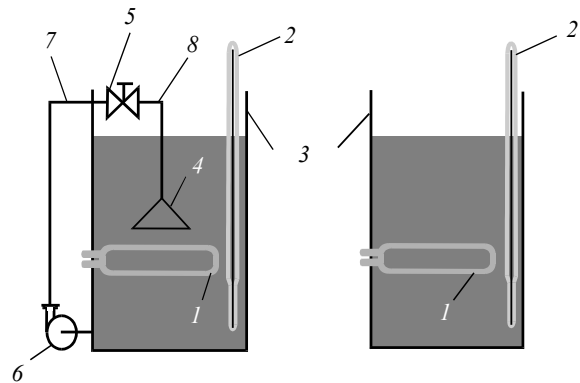
йоните във водата, а P_{PKA} - произведението на разтворимостта на веществата KA .

Произведението P_r за всяко конкретно вещество при неизменна температура е постоянна величина. При промяна на температурата то се изменя в зависимост от температурния коефициент на разтворимост на веществата: при положителен коефициент, с повишаването на температурата нараства и P_r , а при отрицателен коефициент с повишаването на температурата P_r намалява.

Ако $[K^+] \cdot [A^-] < P_{PKA}$, разтворът е ненаситен и не настъпва отделяне на твърда фаза. Ако $[K^+] \cdot [A^-] > P_{PKA}$, разтворът е наситен и е налице отделяне на твърда фаза.

2. ИЗЛОЖЕНИЕ

За изследване на влиянието на скоростта на обтичане върху интензивността на отлагането на накип по нагревната повърхност на топлообменниците са проведени експерименти на базата на специално изработена опитна уредба (фиг. 1).



Фиг. 1: 1 - нагревател; 2 - термометър; 3 - съда; 4 - разпръсквач; 5 - кран; 6 - центробежна помпа

При осъществяването на експериментите е спазена следната последователност:

1. Замерване на теглото на двата нагревателя.
2. Запълване на двата съда с по 18 литра вода.
3. Измерване на температурата на водата в двата съда.
4. Включване на циркуляционната помпа (фиг. 1, елемент б).
5. Включване на електрическите нагреватели.
6. Отчитане на температурата на водата в двата съда на интервал от пет минути.
7. Разбъркване на водата в съда без циркуляция след изключването на нагревателите и замерване на температурата й.

8. Замерване след двадесет часа след стартирането на експеримента на теглата на нагревателите. Наблюдение под микроскоп на структурата на образувалия се накип.

9. Почистване на нагревателите. Монтиране.

РЕЗУЛТАТИ ОТ ПРОВЕДЕНИТЕ ЕКСПЕРИМЕНТИ (при скорост на потока 0,88 m/s; 1,25 m/s и 1,29 m/s):

ОПИТ 1 - скорост на потока 0,88 m/s:

Измерени температури при чисти нагреватели:

1. В съда с циркулация (Δh_u - разлика в енталпите в съда с циркулация):

$$t_{нач.} = 14^\circ C ; h_{нач.} = 58,75 \text{ kJ/kg} ,$$

$$t_{кр.} = 53^\circ C ; h_{кр.} = 221,80 \text{ kJ/kg} ,$$

$$\Delta h_u = 163,05 \text{ kJ/kg} .$$

След двадесет часа работа:

$$t_{нач.} = 13,5^\circ C ; h_{нач.} = 56,66 \text{ kJ/kg} ,$$

$$t_{кр.} = 50^\circ C ; h_{кр.} = 209,26 \text{ kJ/kg} ,$$

$$\Delta h_u = 152,6 \text{ kJ/kg} .$$

При опита е налице 6,6% намаление на топлообмена.

2. В съда без циркулация ($\Delta h_{б.ц.}$ - разлика в енталпите в съда без циркулация):

$$t_{нач.} = 14^\circ C ; h_{нач.} = 58,75 \text{ kJ/kg} ,$$

$$t_{кр.} = 52^\circ C ; h_{кр.} = 217,62 \text{ kJ/kg} ,$$

$$\Delta h_{б.ц.} = 158,87 \text{ kJ/kg} .$$

След двадесет часа работа:

$$t_{нач.} = 13,5^\circ C ; h_{нач.} = 56,66 \text{ kJ/kg} ,$$

$$t_{кр.} = 49^\circ C ; h_{кр.} = 205,07 \text{ kJ/kg} ,$$

$$\Delta h_{б.ц.} = 148,41 \text{ kJ/kg} .$$

При опита е налице 6,6% намаление на топлообмена.

ОПИТ 2 - скорост на потока 1,24 m/s:

Измерени температури при чисти нагреватели:

1. В съда с циркулация:

$$t_{нач.} = 15,5^\circ C ; h_{нач.} = 65,04 \text{ kJ/kg} ,$$

$$t_{кр.} = 56^\circ C ; h_{кр.} = 234,35 \text{ kJ/kg} ,$$

$$\Delta h_u = 169,31 \text{ kJ/kg} .$$

След двадесет часа работа:

$$t_{нач.} = 16^\circ C ; h_{нач.} = 67,13 \text{ kJ/kg} ,$$

$$t_{кр.} = 52,5^\circ C ; h_{кр.} = 219,71 \text{ kJ/kg} ,$$

$$\Delta h_u = 152,58 \text{ kJ/kg} .$$

При опита е налице 9,9% намаление на топлообмена.

2. В съда без циркулация:

$$t_{нач.} = 15,5^\circ C ; h_{нач.} = 65,04 \text{ kJ/kg} ,$$

$$t_{кр.} = 53,5^\circ C ; h_{кр.} = 223,89 \text{ kJ/kg} ,$$

$$\Delta h_{б.ц.} = 158,85 \text{ kJ/kg} .$$

След двадесет часа работа:

$$t_{нач.} = 16^\circ C ; h_{нач.} = 67,13 \text{ kJ/kg} ,$$

$$t_{кр.} = 51,5^\circ C ; h_{кр.} = 215,53 \text{ kJ/kg} ,$$

$$\Delta h_{б.ц.} = 148,4 \text{ kJ/kg} .$$

При опита е налице 6,6% намаление на топлообмена.

ОПИТ 3 - скорост на потока 1,29 m/s:

Измерени температури при чисти нагреватели:

1. В съда с циркулация:

$$t_{нач.} = 17^\circ C ; h_{нач.} = 71,31 \text{ kJ/kg} ,$$

$$t_{кр.} = 54,5^\circ C ; h_{кр.} = 228,08 \text{ kJ/kg} ,$$

$$\Delta h_u = 156,77 \text{ kJ/kg} .$$

След двадесет часа работа:

$$t_{нач.} = 17^{\circ}C ; h_{нач.} = 71,31 \text{ kJ/kg} ,$$

$$t_{кр.} = 52,5^{\circ}C ; h_{кр.} = 219,71 \text{ kJ/kg} ,$$

$$\Delta h_{ц.} = 148,4 \text{ kJ/kg} .$$

При опита е налице 5,4% намаление на топлообмена.

2. В съда без циркулация:

$$t_{нач.} = 17^{\circ}C ; h_{нач.} = 71,31 \text{ kJ/kg} ,$$

$$t_{кр.} = 54^{\circ}C ; h_{кр.} = 225,98 \text{ kJ/kg} ,$$

$$\Delta h_{б.ц.} = 154,67 \text{ kJ/kg} .$$

След двадесет часа работа:

$$t_{нач.} = 17^{\circ}C ; h_{нач.} = 71,31 \text{ kJ/kg} ,$$

$$t_{кр.} = 51,5^{\circ}C ; h_{кр.} = 215,53 \text{ kJ/kg} ,$$

$$\Delta h_{б.ц.} = 144,22 \text{ kJ/kg} .$$

3. ИЗВОДИ

Резултатите от осъществените експерименти са основание за следните изводи:

Анализът на резултатите от осъществените

експерименти е основание за следните изводи:

1. При скорост на потока 1,29 m/s топлообменът в съда с циркулация намалява едва с 5,4%, докато при съда без циркулация - с 6,6%.

2. Образувалият се накип по нагревателя в съда с циркулация е с 0,44 гр. по-тежък от този по нагревателя в съда без циркулация, но е разположен на значително по-малка площ от тази на накипа по нагревателя в съда без циркулация.

3. Образувалият се накип по нагревателя в съда без циркулация има формата на шупли, под които се образуват пароводни мехури, влошаващи значително топлообмена.

Образувалият се накип по нагревателя в съда с циркулация е значително по-твърд, а топлообменът - по-добър. При удар се почиства много по-лесно отколкото накипа, образувал се по нагревателя в съда без циркулация. Причина за това са страничните включения от оксиди на желязото, които придават на накипа крехкост.

Следователно, при увеличаване на скоростта на потока се получава по-добър топлообмен количеството накип, което се отлага, е по-малко.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Р и в к и н, С., А. Александров. Термодинамични свойства на водата и водната пара. С., Техника, 1978.
2. С т о я н о в, С. Справочник на енергетика. Том 9. С., АВС Техника, 2000.
3. Ш а с к о л ь с к а я, М. П. Кристаллография. М., Высшая школа, 1978.
4. Ш у б н и к о в, А. Б., В. Ф. Парвов. Зарождение и рост кристаллов. М., Наука, 1969.

СТРУКТУРА И СЪДЪРЖАНИЕ НА ТЕСТ ПО ФИЗИКА ЗА СЕМЕСТРИАЛЕН КОНТРОЛ

Павлина Н. Тодорова, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна
Красимира И. Кърджилова, Технически университет - Варна

A STRUCTURE AND CONTENT OF TESTS ON PHYSICS FOR CURRENT CONTROL

Pavlina N. Todorova, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna
Krasimira I. Kardjilova, Technical University, Varna

Abstract: *The general structure of the test about type and number of tasks is presented in the article. The content of the tasks is discussed and the system of evaluation is submitted. There are present the initial quality results of the some of the realized tests of the current (term) control.*

Key words: *system of tests, type and content of the tasks, system of evaluation, distant learning.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

При представянето на системата за тестово изпитване в [1] бяха направени някои предложения за повишаване на резултативността от обучението по физика. Едно от тях бе въвеждането на информационните и комуникационните технологии в обучението по физика. Изготвен бе пълен комплект от мултимедийни лекционни презентации, публикувани предварително в Интернет [2]. На второ място, бе разработен комплект от контролни тестове от тип А (теория). С примерни варианти на тестовете студентите могат да се запознаят в същия сайт [2]. Настоящата статия разглежда методиката на съставяне на този тип тестове.

2. СТРУКТУРА НА ТЕСТОВЕТЕ

Тестовете за семестриален контрол от тип А (теория) са два и се провеждат в планираните часове за контролна работа с цел проверка на знанията и уменията на студентите по свързани помежду си теми. Оценка се включват в текущата оценка за семестъра. Първоначалната форма – есе бе заменена от комплекс въпроси със свободен и избираем отговор и качествени задачи върху теоретичния материал.

Разработени са и са проведени по два контролни теста в два лекционни потока. Контролните тестове са критериално ориентирани и целят проверка на резултатите от учебния процес за всеки студент, съобразно с поставените цели от учебната програма по физика.

- За Поток I (90 студенти) Тест 1 обхваща теми от разделите Механика и Термодинамика, а Тест 2 – теми от разделите Електричество и магнетизъм, Трептения и Вълни.

- За Поток II (110 студенти) Тест 1 обхваща теми от разделите Механика, Механика на флуидите, Трептения и Термодинамика, а Тест 2 – теми от раздела Електричество и магнетизъм.

Тестовете съдържат задачи от I ниво – знание, II ниво – разбиране, III и IV ниво – приложение и анализ [3,4].

Чрез задачите от I ниво се проверява познаването на основните физични величини, означението им, измерването им, понятията и законите. От студента се изисква да дефинира, посочва, избира, възпроизвежда.

Чрез задачите от II, III и IV ниво се проверяват интелектуалните умения на студентите. На II ниво се проверява разбирането на знанията – тяхното обяснение, преобразуване и свързване в логическа връзка. На III и IV ниво се проверяват уменията на студентите да анализират определена информация и да прилагат получените знания в нова ситуация. От студента се изисква да свързва, да решава, да избира определена информация, да прави изводи и заключения.

Броят на задачите от всяко ниво, както и общият брой задачи в теста се определя от обема на проверявания лекционен материал чрез таблица и тест спецификация [3], които се изготвят за всеки конкретен тест в зависимост от поставените цели и очакваните резултати от обучението. В разработените контролни тестове от общия брой задачи 50-60 % са на I ниво и 40-50 % на II, III и IV ниво.

Например в първият тест за Поток I от общо 13 задачи 9 са на ниво знание, 1 на ниво разбиране и 3 на ниво приложение и анализ. От задачите на първо ниво 6 са с изборност на верния отговор (задачи за съответствие) и 3 със свободен отговор. Всички задачи от нива II, III и IV са със свободен отговор. В теста за Поток II от 3 задачи на ниво знание една е с изборност на отговора (задача за съответствие) и две със свободен отговор. Сред задачите от нива II, III и IV, чиито брой (5-8) варира в зависимост от сложността, половината са с изборност на отговора, останалите – със свободен отговор, като са указани стъпките за решение.

Теловното отношение е продиктувано от факта, че в учебната програма за дисциплината физика отсъстват часове за семинарни упражнения – решаване на задачи за приложение на знанията от лекционния материал. Този пропуск може да бъде попълнен само при коренна промяна в начина на преподаване. Когато студентите се запознаят предварително с теорията от

учебника и публикуваните лекционни презентации, в часовете за лекции преподавателят може да се съсредоточи върху коментирането на основните пунктове и приложението на разглежданите зависимости и закони при решаването на различни задачи. По този начин се съвместяват задачите на лекцията и семинара, като се изисква сериозна самостоятелна работа от студентите.

3. СЪДЪРЖАНИЕ НА ТЕСТОВЕТЕ

Изготвени са общо 8 варианта на Тест1 и Тест2, по 4 варианта за всеки от потоците. Във всеки вариант са включени всички проверявани дялове в различните задачи. Тук представяме примерно съдържание на задачите от различните типове.

Задачи от I ниво

На това ниво са разработени следните видове задачи: с изборност на верния отговор – задачи за съответствие и задачи със свободен (отворен) отговор. В тестовете за Поток I задачите за съответствие са от 4 до 6 на брой, а тези със свободен отговор от 2 до 4 (определени от таблицата на спецификациите). За Поток II задачата за съответствие е една, със свободен отговор са две.

- Задачи с изборност на верния отговор:

- поток I, Тест 2. Зад. 1. В празните квадратчета от колона А поставете буква от колона В, така че да се получи вярно твърдение.

Колона А

Електромагнитните вълни са

Стоящи вълни се получават при

Интерференцията е

Дифракция се наблюдава

Звуковите вълни са

Колона Б

- а) наслагване на падаща и отразена вълна с еднакви честоти и амплитуди;
 б) механични, сферични, бягащи вълни и се разпространяват с различна скорост;
 в) наслагване на две кохерентни вълни, в резултат на което в едни точки на пространството има усилване, а в други - отслабване на резултантната вълна;
 г) напречни, бягащи и се разпространяват във всички среди с еднаква скорост;
 д) при отклонение на вълните от праволинейно разпространение при преминаване покрай прегради и през отвори съизмерими с дължината на вълната;
 е) от естествена светлина, на която светлинния вектор трепти само в едно направление.

Поток II. Тест 1. Зад.1. Срецу всяко название на величина или закон от първата колона запишете номера на съответната формула от третата колона, чрез която се изразява.

Величина	№	Формула
а) Ускорение на материална точка	<input type="checkbox"/>	1. $m\vec{V}$
б) Импулс на тяло	<input type="checkbox"/>	2. $\vec{F} = -\text{grad}(E_p)$
в) Основен закон на динамиката на материална точка	<input type="checkbox"/>	3. $\frac{d\vec{\varphi}}{dt}$
г) Работа на променлива сила	<input type="checkbox"/>	4. $\vec{F} = m\vec{a}$
д) Работа на еластична сила за деформация на пружина	<input type="checkbox"/>	5. $d\vec{L} = \vec{M}dt$
е) Зависимост между силата и потенциалната енергия	<input type="checkbox"/>	6. $I = I_G + ma^2$
ж) Ъглова скорост	<input type="checkbox"/>	7. $-\int_{x_1}^{x_2} k\vec{x} \cdot d\vec{x}$
з) Инертен момент на твърдо тяло	<input type="checkbox"/>	8. $\int_{r_1}^{r_2} \vec{F} \cdot d\vec{r}$
и) Закон за изменение на момента на импулса	<input type="checkbox"/>	9. $\int_V r^2 dm$
й) Теорема на Шайнер	<input type="checkbox"/>	10. $\frac{dv}{dt} \vec{\tau} + \frac{v^2}{R} \vec{n}$

- Задачи с отворен отговор:

- Поток I, Тест 2. Зад. 2. Какво представлява написаното равенство:

$$hv = A + \frac{mv^2}{2}$$

- а) за какво се отнася
 б) как се тълкува
 в) напишете какво означава всеки член в него

- Поток II, Тест 1. Зад. 2. Срецу всяка от формулите запишете названието на величината/законът, който тя изразява.

Формула	Изразява
а) $n = n_0 \exp\left(-\frac{mg}{kT}h\right)$	
б) $\left(p + \frac{a}{V_\mu^2}\right)(V_\mu - b) = RT$	
в) $p = \frac{F}{S}$	
г) $M = \frac{I}{k}$	
д) $\sigma = \frac{\delta A}{dS}$	
е) $\frac{dM}{Sdt} = -\frac{dp}{dx}$	
ж) $\frac{\rho^2}{2}$	
з) $v = \mu\sqrt{2gh}$	
и) $\rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2$	
й) $f = \sigma l$	

- Поток II, Тест 2. Зад. 3. Попълнете празните места в таблицата.

Величина	Означение	Формула	Размерност
а)		$E \cdot d\vec{S}$	
б) електрична индукция			
в)			F
г)			V/m
д) потенциал			
е)		$en\vec{v}$	
ж)		UIt	
з) относителна магнитна проницаемост			
и)		$I_m S_m$	
й) индуцираното ЕДН при самоиндукция			

Задачи от II ниво

Задачите на това ниво са с отворен отговор. В тестовете за Поток I са от 1 до 2 на брой. В тестовете за Поток II са 2.

- Поток I, Тест 2. Зад. 3. Напишете с формула и дефинирайте физическия смисъл на величината **относителна магнитна проницаемост**. Какво показва формулата?

Формула:

С думи:

Анализ:

.....

- Поток II, Тест 2. Зад. 5а. Запишете с думи и формули Правилата на Кирхоф за изчисляване на електрически вериги. От кои закони са следствие? Как се определя знака на тока и на електродвижещото напрежение?

- Поток II, Тест 2. Зад. 5б. Запишете с думи и формула закона на Фарадей за електромагнитната индукция. Запишете наименованието, вида и размерностите на всяка от величините. Дефинирайте правилото на Ленц.

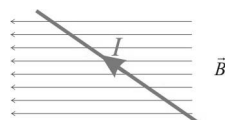
.....

Задачи от III и IV ниво

За Поток I във всеки тест те са 3 на брой, с отворен отговор. За Поток II задачите са 4-6, сред тях има както с отворен отговор, така и с изборност на отговора.

• Задачи, в които се посочват стъпките за решението:

- Поток I, Тест 2. Зад. 4. Проводник с дължина 10 cm по който тече ток 10 A е поставен в хомогенно магнитно поле с индукция 2T. Определете големината и посоката на магнитната сила действаща върху проводника, ако ъгълът между посоката на тока и индукцията на полето е 30°.



Кой закон определя големината на силата – напишете формулата и анализирайте:

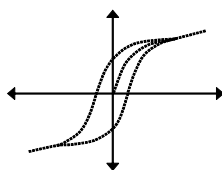
По кое правило се определя посоката на силата – напишете го:

.....

Отговорете на поставения въпрос, като приложите закона и правилото за посоката на магнитната сила.

.....

- Поток II, Тест 2. Зад. 4. На графиката е начертана крива, изразяваща поляризацията на сегнетоелектрик.



а) Надпишете величините върху осите.

б) Повторете с плътна линия областите, в които сегнетоелектриктът се ДЕполяризира.

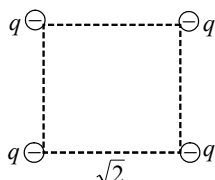
в) Отбележете с A_1 и A_2 точките на насищане.

г) Отбележете с C_1 и C_2 точките в които поляризацията е равна на нула.

д) Означете с K_1 и K_2 коерцитивната сила.

• Задачи с избор на 1 верен отговор от 5 възможни.

- Поток II, Тест 2. Зад. 4. Четири равни неподвижни точкови заряда са разположени във върховете на квадрат. Определете потенциала в точката, в която интензитетът на полето е равен на нула.



- а) $\frac{q}{\pi\epsilon_0}$; б) $\frac{-q}{\pi\epsilon_0}$; в) $\frac{-q}{2\pi\epsilon_0}$; г) $\frac{-4q}{\pi\epsilon_0}$; д) 0;

4. ОЦЕНЯВАНЕ

Задачи от I ниво: Всеки верен отговор получава една точка. В задачите с отворен отговор, правилен отговор на всеки от подвъпросите носи също 1 точка, така една задача може да носи от 3 до 5 точки.

Задачи от II, III и IV ниво - за разбиране, приложение и анализ: Всяка вярна стъпка от решаването на задачата се оценява с 1 точка. Общият брой точки за една задача зависи от броя на стъпките. Например в Зад. 3. (Поток I, Тест 2.), по една точка се дава за формулата, обяснението с думи и анализа; пълно решение на Зад. 4 (Поток I, Тест 2.) получава 4 точки, които са зададени още в условието на задачата; по подобен начин се оценяват задачите Зад. 5а и Зад. 5б. (Поток II, Тест 2.) – съответно - 8 т. и 6 т.

Общата оценка на теста се определя от условието за средно труден критериален дидактически тест [3], при който при резултат под 25 % от общия брой точки оценката е слаб 2.

5. РЕЗУЛТАТИ И ИЗВОДИ

Резултатите показаха, че студентите добре се справят със задачите на ниво знание, по-точно със задачите за съответствие, но сериозно ги затрудняват задачите със свободен отговор, както и задачите за приложение

на знанията.

От двата проведени теста е показателно увеличението на броя на студентите, справили се със задачите на II, III и IV ниво в сравнение с предишни години.

Първичните резултати от проведените контролни работи върху теоретичния лекционен материал показват, че в сравнение с формата „есе“ за контролна работа, тестовия метод на контрол позволява:

- обективна оценка;
- за кратко време (1 или 2 учебни часа) да се провери повече материал;
- да се включат задачи за проверка на приложението на знанията, което позволява и по-трайно им усвояване

Студентите изпитват затруднение при:

- въпросите със свободен отговор: да напишат определената формула; да изразят с думи определеното по дадена формула;
- при задачите от разбиране и приложение: да четат и тълкуват формулите; да изкажат собствено мнение;
- при задачите от III и IV ниво, когато не са показани стъпките за решаването.

Причините за това са комплексни и част от тях се коренят в средното училище. *По-важните според нас са:*

- недостатъчна теоретична подготовка от средното училище;
- неформирани в средното училище умения за наблюдение и анализ; за отделяне на същественото и важното в конкретен случай;
- липса на навици за самостоятелна работа, ниска самоорганизираност;
- малък брой часове за практически занятия и липса на семинарни занятия, като следствие от преминаването на висшето училище към бакалавърски програми.

След провеждането на 2 контролни работи по описания метод, в поток I бе проведена анонимна анкета (вж. приложението), която показва, че:

- Студентите считат, че контролният тест е по-обективен.
- Включването на задачи на ниво приложение е полезно, защото разбират приложението на знанията по физика. Би било полезно да се отделят часове за решаване на задачи.
- Студентите изпитват затруднение при задачите със свободен отговор. Считат, че това затруднение идва от многото на брой формули.
- В анкетата присъстват отговори като: ”Ако си чел - успяваш, ако не си - не”.

- Студентите биха желали повече примерни варианти за подготовка на контролните тестове.

6. ПРЕПОРЪКИ

- По възможност да се включат в лекционните часове повече примери и задачи за приложение на знанията.

- В часовете за учебната дисциплина физика да се предвидят и такива за решаването на задачи на ниво разбиране и приложение.

- В Лабораторната тетрадка по физика да се отдели място за приложението на изучаваното явление или закон.

- Да се подготви учебно помагало, съдържащо тестови въпроси и задачи с цел подпомагане на студентите в самоподготовката им за текущия контрол и изпита по физика.

- Да се изготвят тематични тестове от тип А [1] за текуща проверка на лекционния материал (подобно на тестовете Б1, провеждани в началото на часа за всяко лабораторно упражнение), което би подпомогнало студентите в подготовката им по физика, а също така би спомогнало формирането на умения за наблюдение и отделянето на съществена и важна информация.

- Преминаването на висшето образование със кредитната система създава предпоставки за създаване и въвеждане на нормативни тестове в които да се установяват индивидуалните постижения на тестирания студент или група в сравнение с останалите тестирани студенти.

Представените в статията критериални тестове са в процес на разработка и стандартизация, на изследване на показателите на задачите и теста като цяло. Това ще доведе не само до усъвършенстване на теста, но и на

оценяването му. Този въпрос ще бъде тема на следваща научна публикация.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Анкета

Уважаеми студенти,

Настоящата анкета е анонимна и цели проучването на вашето мнение за провеждането на текущия контрол и изпита по физика .

1. Как предпочитате да бъдете изпитвани?

- А) с тест;
- Б) писмено на два развити въпроса;
- В) устно върху целия материал;
- Г) писмено върху теми от конспекта и после устно.

2. Напишете защо предпочитате този начин.

3. Какво Ви затрудни при тестовото изпитване?

4. Затрудниха ли Ви задачите за решение и защо?

5. Напишете предложения за подобряване на теста.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т о д о р о в а, П. Н., К р. К ъ р д ж и л о в а. Система за тестово изпитване в обучението по физика във ВВМУ “ Н. Й. Вапцаров”, Трудове на ВВМУ, т. 5, 2005.

2. Т о д о р о в а, П. <http://pawtod.wordpress.com>

3. Б и ж к о в, Г. Теория и методика на дидактическите тестове, С., Просвета, 1996.

4. B l o o m, B. et.al. Taxonomy of educational objectives, Handbook I, Cognitive Domain, Longmans Green, New York, 1956.

5. Т а ф р о в а - Г р и г о р о в а, А. Съставяне на тестове. Приложение към обучението по химия. С., Педагог 6, 2007.

З А К О Н Т А К Т И:

1. П. Н. Тодорова: e-mail: pawtod@abv.bg;

2. Кр. Ив. Кърджилова: e-mail: kardjilova@yahoo.com

ЛАБОРАТОРНА ТЕТРАДКА ПО ФИЗИКА - НОВА ФОРМА ЗА ИНДИВИДУАЛНА РАБОТА
ВЪВ ВВМУ "Н. Й. ВАПЦАРОВ"

Павлина Н. Тодорова, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна
Красимира И. Кърджилова, Технически университет - Варна

PHYSICS EXERCISE-BOOK - NEW MODE FOR INDIVIDUAL WORK
IN THE NAVAL ACADEMY „N. J. VAPTCAROV“

Pavlina N. Todorova, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna
Krasimira I. Kardjilova, Technical University, Varna

Abstract: *The necessity in alteration form of individual work in the physics laboratory is discussed. There are present the structure of the exercise-book and some results in use.*

Key words: *physics, laboratory, exercise-book.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Физическият практикум е неделима част от учебния процес по физика. По време на лабораторните упражнения студентите самостоятелно наблюдават и изследват различни физични процеси, явления и закономерности. Формираните в този процес умения за измерване, обработка на резултатите, анализа и оценката на достоверността им са особено необходими както за изучаването и усвояването на инженерно-техническите дисциплини, така също и в практиката на бъдещите инженери.

В класическата форма на практикума теорията и методът на експеримента са описани в отделна книга [1], като за правилното и пълно разбиране студентът трябва предварително да се запознае с теорията от препоръчвания учебник [2] или лекциите [3]. В процеса на изпълнение на упражнението той си води записки в лична тетрадка, а отчета за извършената работа се попълва на специално отпечатана бланка (фиг. 1), в която студентът трябва самостоятелно да начертае и попълни таблиците за данните, ако задачата изисква, чертае графика на милиметрова хартия, която

залепва върху бланката. Оформянето изисква допълнително време и спомагателни материали. Обикновено двата часа, отделени в програмата за едно лабораторно упражнение се оказват недостатъчни за обсъждането на упражнението, извършването на експеримента, обработката на данните, попълването на отчета и защитата му пред преподавателя от всички студенти в групата. Недостигът на време понижава мобилизацията на студентите по време на час и те отлагат част от работата за дома. Отложената за „покъсно“ обработка на експерименталните данни, обаче изисква повече време и усилия, тъй като с времето някои условия на експеримента, незаписани навреме и на място са забравени, появяват се и други пропуски и се стига до преписване на чужди данни и дори цели отчети. А това свежда почти до нула резултата от методическата работа. Допълнителното извънаудиторно натоваване е не само за студентите, но и за преподавателя, който трябва да приеме защитата на отчетите. Очевидно обемът на извънаудиторната работа нараства прекомерно, и е съсредоточен обикновено в края на семестъра.

ВИСШЕ ВОЕННОМОРСКО УЧИЛИЩЕ "Н. Й. ВАПЦАРОВ" Катедра "Математика и информатика"	
ПРОТОКОЛ	
Дисциплина: физика Изпълнил: Класно отделение: № в клас:	Проверил: Оценка:
Тема на лабораторното упражнение:	
Резултати от измерванията:	
Изводи:	

Фиг. 1. Традиционна форма за отчет от лабораторно упражнение

В резултат от многогодишната практика, описана по-горе и проведените контролни тестове по време на лабораторните упражнения, се достига до извода, че студентите изпитват затруднения първо, в подготовката за лабораторните упражнения, второ, при изпълнение на отделни операции, извършвани по време на лабораторните упражнения - работа с измервателни уреди, чертане на графики, графично определяне на физична величина и др. И трето, при самостоятелното изготвяне на отчета извън училище.

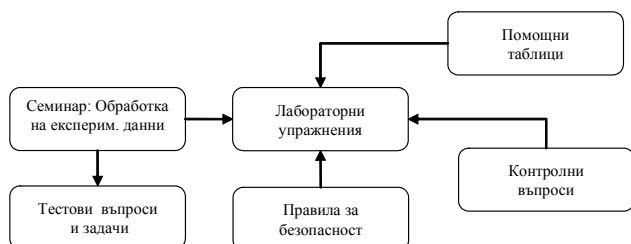
Това породи необходимостта от подготовка на методическо ръководство за лабораторните упражнения от нов тип - индивидуална Лабораторна тетрадка. Първоначалната идея е на колегите от Технически университет – Варна [4]. Тук представяме Лабораторната тетрадка по физика за ВВМУ „Н. Й. Вапцаров” [5], разработена от авторите като една възможност за самостоятелна работа на студентите и повишаване на ефективността на учебния процес в учебната физична лаборатория. Тя е учебно помагало за лабораторните упражнения, изпълнявани в учебните физични лаборатории и е съобразена с програмата по физика за всички специалности във ВВМУ „Н. Й. Вапцаров”.

2. СТРУКТУРА НА ЛАБОРАТОРНАТА ТЕТРАДКА

В хода на изпълнение на експеримента по време на лабораторните упражнения, е необходимо да се води протокол, в който измерванията и изчисленията е удобно да се подреждат в таблици, а резултатите да се представят числено, аналитично или графично. Отчитайки важната роля на тези действия и ограниченото време за изпълнение, за всяко упражнение са събрани на едно място в работна тетрадка: кратка теоретична обосновка; методика на провеждане на експеримента; описание на опитната постановка; задачи и последователност от действия за тяхното изпълнение; резултатите от направените експериментални изследвания във вид на таблици и графики; помощни таблици; списък от избрани въпроси и задачи, подпомагащи анализа на резултатите.

Структурата на Лабораторната тетрадка е показана на фиг. 2.

Тетрадката започва с изключително важен елемент - списък от правила за безопасност в лабораториите.



Фиг. 2. Структура на лабораторната тетрадка

В уводната част са включени най-общи сведения за физичните величини, измерителните им единици, точността на измерване, обработката и представянето на опитните данни, които се обект на обсъждане в семинар преди лабораторните упражнения.

Централната, базова част на тетрадката съдържа описанието на лабораторните упражнения.

Приложението съдържа: а) минимално количество необходими основни таблици: система СИ - основни и производни единици, представки към основните единици; коефициент на Стюдънт, коефициент на Дик и Диксън и най-често използваните формули за абсолютна и относителна грешка; б) тестови въпроси и задачи върху методите за обработката на опитните данни; в) набор от въпроси и задачи за проверка на всяко упражнение.

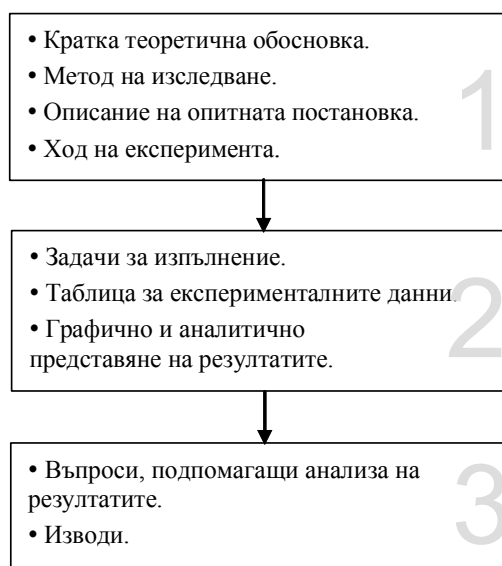
3. СТРУКТУРА НА ЛАБОРАТОРНОТО УПРАЖНЕНИЕ

Всяко лабораторно упражнение е структурирано в три основни блока, представляващи гръбнака на един протокол (фиг. 3).

Блок 1 съдържа основната теоретична информация, необходима за провеждането на експеримента, с която студентът трябва да се запознае самостоятелно преди упражнението. Наред със схемата на опитната постановка е приложена и фотография, на която се вижда свързването на отделните елементи.

Блок 2 подрежда и представя опитните данни и обработката им. За целта са приложени таблици със съответните размери и брой графи, ако е необходимо и милиметрова скала с подходящи размери.

Блок 3 съдържа крайния резултат и изводите.



Фиг. 3. Структура на лабораторното упражнение

4. ИЗПЪЛНЕНИЕ НА ЛАБОРАТОРНОТО УПРАЖНЕНИЕ

Блок 1 (фиг. 3). Отделните етапи се обсъждат в групата, изпълняваща съответния експеримент и с преподавателя. Следва разпределяне на задачите за изпълнение в групата.

Блок 2. Експеримент. Работата във всеки един от етапите се извършва самостоятелно от студентите.

Блок 3. При анализа на получените резултати и изводите се проявява групова работа, като всеки студент отстоява своето собствено мнение и решение. На този етап освен груповата работа, се проявява и самостоятелната работа на всеки студент. Тя е особено важна и при окончателното оформяне на протокола от проведеното упражнение и при неговата защита (обсъждане с преподавателя) в края на занятиято.

Работата на всеки студент по време на упражнението се оценява текущо с две оценки. Едната отразява проверката на теоретичните знания, необходими за провеждане на упражнението, чрез контролен тест в началото на часа (Блок 1). Втората оценка отразява самостоятелната работа на студентите - резултата от изпълнението на задачите в Блок 2 и Блок 3. Проверката и оценяването на изпълнението на всяко упражнение по този начин, мобилизират студентите да завършат работата си в час. Задачите и въпросите от Приложението ги подпомагат в подготовката им за изходния тест в края на годината. Този тест е критериален и проверява знанията и уменията на студентите, придобити от провеждането на всички лабораторни упражнения.

5. РЕЗУЛТАТИ ОТ АПРОБАЦИЯТА

Лабораторната тетрадка бе апробирана в течение на две години (4 семестъра) сред студентите от първи и втори курс. В резултат може да се направят следните изводи:

1. Студентите харесват предложената им форма на провеждане на лабораторните упражнения с помощта на лабораторната тетрадка, тъй като в нея са събрани всички необходими сведения (теория и приложения) и са подпомогнати при провеждането на упражнението, оформянето на отчета и подготовката за контролна работа.

2. Наложена еднотипна строга форма на отчета възпитава у студентите умение за подреждане на факти и резултати, подпомага анализа и оценката.

3. В резултат от по-добрата организация на работата (работа в екип) и използването на тетрадката,

все по-голяма част от студентите успяват да завършат напълно обработката на опитните данни и протокола.

4. Тъй като тетрадката е индивидуална и задължителна, отпада опасността от недостиг на учебни помагала в библиотеката дори при увеличаване на броя студенти.

5. Избраният за Лабораторната тетрадка формат А4 е удачен. Спомага от една страна теоретичният и помощните материали да бъдат класифицирани, подредени и форматираны ергономично - по възможно най-удобен за ползване и работа начин - групите сведения са на една и съща страница, лесно да се намират; таблиците и графиките са с размери, достатъчни, за да се пише и чертае свободно. Отделните лабораторни упражнения имат обем 3 или 4 страници заедно с протокола, което улеснява както работата, така и проверката ѝ.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Считаме, че представената тук *Лабораторна тетрадка* замества успешно ръководството за лабораторни упражнения [1] и множеството протоколи, изготвени от студентите на отделни листи, като обединява в едно теорията и практическите задачи за изпълнение на лабораторните упражнения. В ролята си на индивидуално методическо помагало, тя изпълнява предназначението си да подпомогне студентите както в предварителната им подготовка за лабораторните упражнения, така и при практическото им изпълнение. Приложената организация на работата, изразяваща се в работа в екип по време на измерванията и анализа и същевременно индивидуално изготвяне на отчета и защитата, повишава ефективността на обучението.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Р а л ч е в, Ив., Р. Ралев, Ст. Миленков. Ръководство за лабораторни упражнения по физика. С., ВИ, 1992.
2. Р а л ч е в, Ив., Р. Ралев, Ст. Миленков. Физика. Варна, „Компас”, 1993.
3. Т о д о р о в а, П. <http://pawtod.wordpress.com>.
4. В о й н о в, Вл. (редактор), Работна тетрадка за лабораторни упражнения по физика. Варна, Технически университет, 2004.
5. Т о д о р о в а, П. Н., Кр. Кърджилова. Физика. Лабораторна тетрадка, II-ро издание. Варна, „Данграфик”, 2006.

З А К О Н Т А К Т И:

1. П. Н. Тодорова: e-mail: pawtod@abv.bg;
2. Кр. Ив. Кърджилова: e-mail: kardjilova@yahoo.com

ВИРТУАЛНА ФИЗИЧНА ЛАБОРАТОРИЯ - НОВ ПОДХОД В ОБУЧЕНИЕТО ПО ФИЗИКА ВЪВ ВВМУ "Н. Й. ВАПЦАРОВ"

Павлина Н. Тодорова, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна
Мария П. Николова, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна

A VIRTUAL PHYSICS LABORATORY - NEW APPROACH IN LEARNING ON PHYSICS IN NAVAL ACADEMY "N. J. VAPTSAROV"

Pavlina N. Todorova, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna
Maria P. Nikolova, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna

Abstract: *In the paper analysis of electronic publications of studying physics, existing up to now in the Internet, is presented. The necessity to alter the traditional laboratory exercise is proved. The virtual laboratory, developed in the Naval Academy, is presented, including theory; simulation of physics phenomena and developments, invisible to the naked eye; interactive models; control tests; library and a table of results. The virtual physics laboratory corresponds to the requirements of contemporary studies in higher schools and technical universities. The laboratory can be used by students for e-learning, distance learning and self-dependent work. The program languages used for the simulation models are HTML, Java, Java Script, Macromedia Flash and Electronics Workbench.*

Key words: *virtual laboratory, distance learning.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Необходимостта от текущо осъвременяване на учебното съдържание по физика съобразно новите открития и приложението им в практиката, от провокиране на задълбочен интерес към предмета и повишаване на качеството на знанията и уменията, изисква разработването и внедряването на нови образователни технологии на обучение и интензификация на целия учебен процес. Това включва както осъвременяване на материалната база, така също и разработване на система от електронни учебни материали, като същевременно представлява и подготовка към въвеждането на дистанционно обучение. Глобалната мрежа Internet се явява интегрирано средство, използвано в тази форма на обучение. Разработени са различни електронни средства за обучение: компютърни учебници, обучаващи системи, мултимедийни учебни материали, тренажори, справочници, бази данни с учебно предназначение, лабораторни практикуми, контролиращи програми [1]. База за обучението са компютърните зали, кабинетите по информатика и снабдените с компютър и мултимедийен проектор лекционни зали.

Някои от предимствата на Web базираното дистанционно обучение са:

- многоплатформеност на технологията - обучаващите системи в Internet могат да се ползват от всички компютри независимо от операционната им система;
- евтино разпространение - докато са в Internet продуктите не заемат място на потребителската машина;
- лесна и мобилна преработка на съдържанието на електронните издания;
- моделиране на процеси и явления, които не

могат да се наблюдават по друг начин;

- повишаване на интереса на обучаемите към изучаваната дисциплина.

Електронното обучение има и някои недостатъци:

- обучаемите трябва сами да постигат желаната организираност и систематизираност при обучението си;
- намалена е връзката преподавател-обучаем;
- мониторът изморява очите повече, отколкото четенето от хартиен носител.

Тези недостатъци са минимални в сравнение с предимствата, което дистанционното обучение може да осигури на студентите от задочно обучение, които имат определен минимален брой присъствени дни за лекции и упражнения. А в обучението по физика, където се налага моделиране на сложни процеси и явления, компютърната симулация е незаменим помощник на преподавателя при обучението и на редовните студенти.

2. САЙТОВЕ ЗА ОБУЧЕНИЕ ПО ФИЗИКА

В българските образователни сайтове обучението по физика навлиза едва от няколко години. При търсене на български език чрез Google с ключова дума *симулации по физика* се получи (към 05.05.2007 г.) 830 резултата, сред които най-търсеният пакет със симулации (автор Б. Стефанов) е предназначен за обучение в средните училища. По ключова дума *дистанционно обучение по физика* се намират 1910 резултата, но реално подобно обучение все още няма. Търсене чрез ключова дума *виртуална физична лаборатория* показа 8 резултата, но информация за подобна лаборатория се намери единствено във формат .pdf.

От проведеното търсене в български сайтове може да се направят следните изводи:

- Има разработени симулации по физика, подходящи за основно и средно образование.
- Няма сайт, който да предлага дистанционно обучение по физика, включващо лекционен материал, упражнения, симулации.
- Няма създадена виртуална физична лаборатория във ВУЗ.

Търсенето в сайтове на други езици показва следните резултати: за *virtual laboratory of physics* - 1470000 резултата, за *distance learning in physics* - 1540000 резултата, а за *physics simulations* – 31500000 (!).

Прегледът на най-търсените сайтове показва, че много университети от различни страни обучават дистанционно своите студенти по физика, показвайки им компютърни симулации на физични явления и процеси използвайки Java-аплети, Flash-анимации и анимирани графични файлове от тип .gif. Най-популярният език за програмиране на физични процеси е Java. Някои от авторите на сайтовете [2] предлагат освен демонстрация на аplet, още source-кода му, като по този начин компютърните симулации могат да се разглеждат в offline режим или да се променят при необходимост в зависимост от учебната задача. Добър пример може да се види в [3] (Фиг. 1) и [4].

В болшинството сайтове обаче, като например [5], независимо от заглавието, се предлагат само текст върху теорията и интерактивни тестове, но без модел. Други [6] представляват методически разработки с добри илюстрации и схеми, но изискват реална постановка за изпълнението.



Фиг. 1. Сайт, съдържащ виртуална лаборатория и симулации по физика

Директното използване на материалите по физика от чуждестранните ВУЗ не е подходящо поради езиковата бариера от една страна, а от друга - поради различията в програмите за обучение. Една част от илюстративните материали, достъпни безплатно в мрежата, могат да се ползват без съществено изменение, други изискват превод и/или адаптиране към конкретния учебен материал, към целите и

методическите изисквания на обучението в конкретното учебно заведение, поради което е необходимо добро познаване на програмните продукти и езици, с които са създадени илюстрациите и моделите. За получаването на методически издържан добър програмен продукт се изисква отличен синхрон между преподавателя и програмиста.

3. ВИРТУАЛНА ФИЗИЧНА ЛАБОРАТОРИЯ



Web сайтът *PhyZone* [7], разработен от гл. ас. д-р П. Тодорова, представлява база от електронни материали, чиято цел е да обхване целия процес на обучението по физика във ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“. Поради големия си обем е предназначен за базиране в Intranet. Състои се от 5 основни модула: електронен учебник, сборник със задачи, сборник с тестове, виртуална физична лаборатория и библиотека, като всеки модул е свързан с всички останали.

Модулът Виртуална физична лаборатория *Phy ZoneLab* съдържа комплект виртуални лабораторни упражнения, изградени по единен план, който включва: кратка теория, метод на експеримента, интерактивен модел, тестове за самоподготовка и за контрол, библиотека, форма за попълване на резултатите от експеримента и тяхната обработка. Създадена е с използването на програмните езици HTML, Java Script, Java, Macromedia Flash, Electronics Workbench, PHP и MySQL, като включва и много анимирани графични изображения.

Първоначалната цел на този модул бе да обезпечи самостоятелната работа на студентите от задочно (а за в бъдеще и дистанционно) обучение от ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, но с развитието му, той бе успешно използван и от студентите от редовно обучение при подготовката им за работа на реална лабораторна постановка, така също и в качеството на лекционни демонстрации от преподавателя. Към настоящия момент той съдържа 4 напълно завършени лабораторни упражнения, други две са в напреднал стадий на разработка, и още 4 на етап идеен проект. Автор на идейния проект на всяко от упражненията и на лабораторията като цяло е П. Тодорова. В програмирането на интерактивните модели най-голям е приносът на доц. М. Николова, като в работата се включиха и студенти (табл. 1).

Физическата наука в същността си е експериментална. По време на обучението на физическия практикум се отрежда мястото на най-важното средство за обучение, тъй като той позволява на преподавателя ясно да постави и реализира целите на занятието. Традиционната постановка на експеримента в обучението преследва следните цели:

1. Формиране на умение за наблюдение, анализ и обяснение на физическите явления.

Таблица 1
Интерактивни лабораторни упражнения

Тема	Автор на анимацията
Определяне на инерчен момент на тяло и дирекционен момент на нишка	Димитър Крачунов
Определяне на динамичния вискозитет по метода на Стокс	М. Николов, Г. Петров
Определяне на скоростта на звука по метода на стоящите вълни	М. Николов
Определяне на скоростта на звука по метода на фазовата разлика	М. Николов
Изследване на волт-амперната характеристика на P-N преход	Деян Коларов
Работа с електронен осцилоскоп	Бейхан Исмаилов
Изследване на затихващите трептения с осцилоскоп	Бейхан Исмаилов

2. Ползване на физически прибори и инструменти.

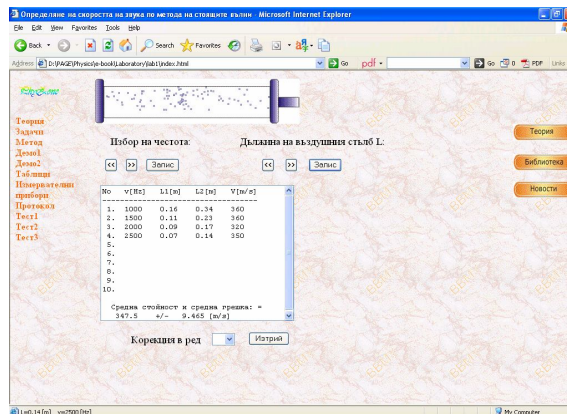
3. Запознаване със структурата и постановката на физическия експеримент.

4. Обработка на експерименталните данни, анализ и оценка на получените резултати.

За осъществяването на изброените цели, лабораторните упражнения във *PhyZoneLab* са разработени във формата на Web сайт (Фиг. 2), като обемът на работата с всяко от тях е предвиден за изпълнение в рамките на един-два учебни часа. Екранът е разделен на три фрейма, като основната информация се показва в централния фрейм.

Чрез бутоните от менюто в левия фрейм може да се премине към избрано място в упражнението. Подреждането им подсказва оптималния ред за работа. Упражнението започва с кратка теория, следва поставяне на задачите и описание на метода със схема на опитната постановка (или фотография на реална постановка). След изпълнението на тези стъпки, на студента се предлага да попълни контролен Тест 1, който е предназначен за самообучение и отговорите може да се видят на следващата страница. При правилни отговори следва запознаване и работа с измервателните прибори, след което може да се премине към контролен Тест 2, който е критериален. При положителна оценка от този тест, студентът се допуска до работа със симулацията (или на реална постановка). В симулацията получените данни от експеримента се попълват автоматично в таблица (Фиг.2). Автоматичната обработка се свежда до намиране на средната стойност и средната грешка. Времето за тези изчисления са спестени на студента, като в замяна се изисква вниманието му да е насочено към наблюдение, анализ, осмисляне на експеримента и оценка на възможните

грешки. В края на упражнението студентът попълва заключителен Тест 3, чрез който се осъществява традиционната „защита на отчета”. С това упражнението се счита за завършено. Протоколът с отчета за извършената работа се изпраща по e-mail на преподавателя. Окончателната оценка е на базата на оценките от Тест 2, Тест 3 и Отчета.



Фиг. 2. Лабораторно упражнение "Определяне на скоростта на звука по метода на стоящите вълни"

Чрез трите бутона в десния фрейм може да се получи допълнителна информация: Бутон „Теория” препраща към съдържанието на електронния учебник, в „Библиотека” може да се намери допълнителна литература по разглеждания въпрос и всякакви помощни таблици (Физически закони, Дефиниции, Величини, Физични формули, Математически формули, Система Си, Гръцка азбука), както и връзки към сайтове със сродна тематика, а в „Новости” - последните изследвания в по-широка област.

Лабораторните упражнения във *PhyZoneLab* са три типа:

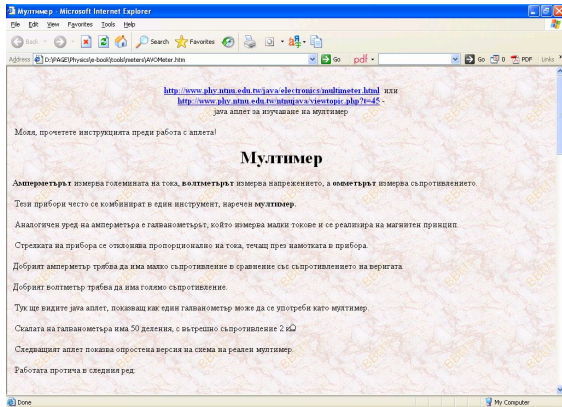
А) Напълно заместващи реалния експеримент: „Определяне на скоростта на звука по метода на стоящите вълни”, „Определяне на скоростта на звука по метода на фазовата разлика”, „Определяне на динамичния вискозитет по метода на Стокс” (автор М. Николова), „Работа с електронен осцилоскоп” и „Изследване на затихващи трептения с осцилоскоп”.

Б) Демо-версия, реализирана посредством Flash анимация, която не е интерактивна и позволява единствено наблюдение на различните процеси и явления при определени стойности на параметрите: „Изследване на волт-амперна характеристика на P-N преход”.

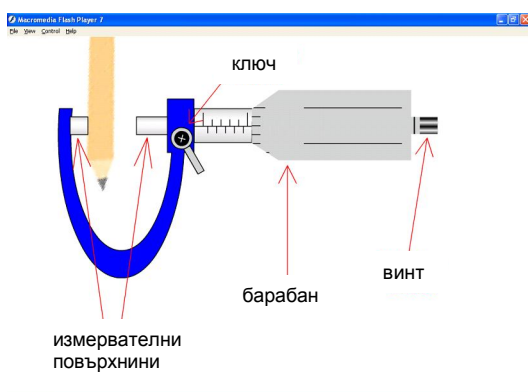
В) Подпомагащи обработката на данните. Flash анимация на процеса, която не е интерактивна. В интерактивен режим се обработват данните от реален експеримент: „Определяне на динамичния вискозитет по метода на Стокс” (автор Г. Петров) и „Определяне на инерчен момент на тяло и дирекционен момент на нишка”.

За постигането на цел 2, а именно формиране на

умения за работа с измерителни прибори, към модул „Библиотека” има специален раздел „Инструменти”. Той съдържа интерактивни упражнения с основните измервателни уреди. Те са реализирани посредством Java – аплети [8,9] (Фиг. 3), или Flash-анимации [10] (Фиг. 4), преведени на български и адаптирани.



Фиг. 3. Инструкция за работа с мултиметр [8]



Фиг. 4. Flash-анимация за измерване на микрометър

4. ИЗВОДИ

Предложените във Виртуалната физична лаборатория *PhyZoneLab* упражнения представляват модели - анимация или симулация на физични процеси, в които се имитира лабораторна работа. Тъй като теоретичните зависимости са зададени програмно, процесите на екрана протичат съгласно теорията. Ако отчитането на данните беше автоматично (както в голяма част от Java-аплетите, предлагани като виртуални упражнения), щяха да се получават теоретични или близки до теоретичните резултати. Възможността студентите сами да направят измерване, като посочват точка с показалеца на мишката (която има определена чувствителност) върху екрана на монитора (с крайна разделителна способност), внася определена грешка. Ако трябва например да се натисне бутон, за да се засече момент от време, точността зависи от бързината на реакция, от наблюдателността, не на последно място от честотата на процесора и разделителната способност на монитора. В последния случай харак-

теристиките на компютъра и монитора внасят систематични грешки, а дейността на студента - груби, систематични и случайни. От студентите се изисква в изводите от упражнението да направят анализ и оценка на възможните грешки.

Предимствата на предложения метод на организация на лабораторната работа са следните:

- Създават се възможности за издигане на нивото на обучение на по-висока степен чрез използване на информационни и комуникационни технологии;
- Дава възможност на обучаемите да работят сами, подбирайки нужните им инструменти, да изследват сами процеса, при което се развиват качества като наблюдателност, съобразителност, логическо мислене, формират се умения за наблюдение, анализ и обяснение на физическите явления;
- Дава възможност за избиране на индивидуален темп за усвояване на знанията по време на упражнението, което повишава качеството на обучението;
- Спестеното време и усилия за обработка на експерименталните данни, се посвещава на оценка и анализ на получените резултати;
- Стимулира се естествения стремеж към творчество, изобретателство, конструиране и самостоятелно изготвяне на прибори и демонстрации;
- Спестява времето на преподавателя за въвеждане в лабораторното упражнение и устно препитване;
- Относителна обективност на оценяването чрез тестова форма.
- Подготвено във вид на Web-сайт, лабораторното упражнение предлага бърз и лесен достъп до всички необходими спомагателни информационни и технически средства и обработващи програми по време на упражнението.
- Позволява по-нататък лесно да се премине към дистанционно обучение, тъй като техническата реализация на компютърен практикум за очното обучение е идентична на практикума при дистанционното обучение.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ролята на виртуалните лабораторни работи не се ограничава само със замаяната на реалните експерименти. Компютърният практикум може да бъде използван и като разширяващо допълнение към традиционния практикум във формата на тренажор. Преди изпълняване на лабораторната работа може да се проведе изследователска работа от студентите върху виртуалния модел, изобразяващ особеностите при протичане на процесите в реалната установка. След преминаването на този своеобразен тренинг на компютърния модел, те ще формират по-ясна структура от знания, която ще им позволи с разбиране на всички физически особености да проведат експеримента. По такъв начин виртуалният модел може да се използва в два варианта: като интерактивно нагледно пособие,

което ще позволи на преподавателя да организира самостоятелна изследователска дейност на студентите (когато няма достъп до лабораторно оборудване), или в качеството на тренажор преди изпълняването на реален експеримент. Те могат да се използват за e-learning, дистанционно обучение и самообучение от студенти и курсанти, обучаващи се във ВВМУ и в другите висши училища.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. О б у ч е н и е пред монитора, PC World, 2006
2. Т о д о р о в а, П. Н. Електронен учебник по физика. I. Структура. - В: Морски научен форум, т. 2 "Проблеми на висшето образование. Науки за морето и кораба", Варна, ВВМУ "Н. Й. Вапцаров", стр. 39-45, 2003.

3. <http://www.myphysicslab.com>.
4. <http://www.haselwood.k12.mo.us/~grichert/sciwb/applets.html>
5. <http://webphysics.davidson.edu/applets/applets.html>
6. http://virlib.eunnet.net/win/metod_materials/wm11/WEB_LAB/web_lab.htm
7. <http://www.expel.hit.bg/>
8. <http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/electronics/multimeter.html>
9. <http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/viewtopic.php?t=51>
10. <http://faraday.physics.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/Flash/index.html>

З А К О Н Т А К Т И:

1. П. Н. Тодорова: e-mail: pawtod@abv.bg;
2. Кр. Ив. Кърджилова: e-mail: kardjilova@yahoo.com

FLEX PROGRAM PACK TO SIMULATE A VIRTUAL ENGINE ROOM FOR DIAGNOSTICS AND EDUCATION

Julian V. Moskov, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna

Abstract: *This paper include an algorithm of complex simulator and its building in trainee complex. The Pack shows an engine room by two channels. Mathematic models are parallel and working on time. The software working on FLASH and DELPHI system, but many of models work on DELPHI. This way is light for resorts. The study shows the necessity of building an adaptive mathematical model at system level of a marine diesel engine, its implementation in a simulator complex and its use for training marine engineers.*

Key words: *sdiesel engine, mathematical model, simulator, operation system, program pack.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

През последното десетилетие в световния флот се наблюдава силно развитие, довело до създаването на много сложни корабни енергетични уредби снабдени с модерни технически средства за управление, контрол и диагностика. Грешки, дължащи се на работата на човека обаче, все още биват допускани. Експлоатационните аварии и лошата комуникация могат лесно да причинят тежки инциденти и големи повреди свързани със значителни икономически последици за компанията-собственик.

С влизането в сила на Международните правила за безопасна експлоатация (International Safety Management code), отговорността за нивото на професионалните умения на членовете на екипажа, сега се поема и от корабособственика. Секция 6.5 от правилата регламентира задължението да се вземат мерки за определяне уменията и установи каква допълнителна подготовка е нужна за изпълнение на правилата за безопасна експлоатация. Тя определя обема на тази подготовка за всички членове на екипажа.

Предизвикателството пред корабните компании, морските учебни заведения и тренировъчните центрове е да бъдат открити начини за осъществяване на такава подготовка и оценка. За съжаление високата цена на оборудването, разходите по пребиваването на обучаеми на борда на действащи кораби, както и риска от осъществяване на екстремни и аварийни режими при реални експлоатационни условия ограничават възможността цялата необходима подготовка да се извърши на борда на съответните плавателни съдове. Това налага търсенето да продължи в друга насока. Развитието на компютърните технологии в последните години осигурява един ефективен и евтин начин за повишаване компетентността на морските лица чрез използване на компютърни симулатори [2]. Подготовката на корабните механици с тренажор е метод доказал ефективността си през последните години, особено що се отнася до грешки в преценката, които могат да застрашат човешкия живот, околната среда и плавателния съд [3]. Един универсален компютърен тренажор от ново

поколение, работещ с динамичен модел в реално време може да събере десетки години експертен опит в неколкоседмично обучение и да осигури способност за справяне с такива ситуации. Неговия комплексен математичен модел може да бъде обучен посредством паралелен и едновременен алгоритъм с база знания за динамичните и взаимнообвързани процеси типични за реалната енергетична уредба [4]. Така обучаемите ще бъдат поставени пред динамично променяща се обстановка и се избягва шаблона на високите нива. Това помага за снижаване на усилията за входните нива и прави програмният пакет достъпен за лица с ниска компютърна грамотност.

Правилната тренажорна подготовка на това ниво ще намали инцидентите и повиши продуктивността, ще осигури на механиците необходимия опит и увереност при тяхната работа.

Упражненията по взимане на решения при работа с този симулатор, ще осигури запознаване с резултатите от тези индивидуални решения, с възможност и за тяхната оценка. Провеждането на експерименти по определени проблеми и получаване на отговор е уникална. Симулаторът дава лесно въведение в теориите по експлоатация, посредством реалистичното му гъвкаво управление.

Съгласно конвенцията STCW 95 тренажорът за корабни механици трябва да има три принципни нива на подготовка:

1. Опознавателно ниво.
2. Експлоатационно ниво.
3. Диагностично ниво.

Новият подход обхваща и усъвършенствува тези нива.

2. ГЪВКАВ ИНТЕЛИГЕНТЕН ПРОГРАМЕН ПАКЕТ

Ефективността от тренажорната подготовка и въвеждането и като задължителен етап в обучението на корабните механици води до нарастване търсенето от страна на морските учебни заведения и квалификационни центрове на симулаторни установки. Като резултат се появява силна конкуренция и стремеж за развитие на софтуерните и хардуерните пакети с тенденция за тяхното подобряване и получаване на модели

с резултати по-близки до реалните [5,6]. Разнообразието от корабни силови установки и специфичните особености при експлоатацията на всяка една от тях поставя изискването за адаптивност на моделите и разнообразие от пакети, покриващи различните видове силови уредби с цел запознаване на обучаемите с тях. Следват данни систематизирани за разработения в катедра Корабни силови уредби под ръководството на доц. Янакиев, д-р [1,2] програмнен пакет под наименованието Гъвкав интелигентен програмнен пакет - Smart Flexible Program Pack.

Нива на обучение:

1. Опознавателно-настроечно ниво.
2. Експлоатационно-експертно ниво.
3. Диагностично-интелигентно ниво.

Разработени подсистеми:

1. Корабен дизелов пропульсивен комплекс.
2. Спомагателни системи и механизми.

Възможности за селективна работа с подсистемите: разработена.

Стартовият входен панел насочва към двете основни системни модификации. Те са корвет и кораб с друго назначение. Панелът е илюстриран на фиг. 2 заедно с първичното изображение на фиг. 1.



Фиг. 1



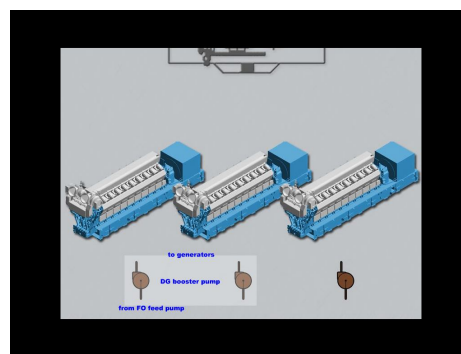
Фиг. 2

Системни модификации:

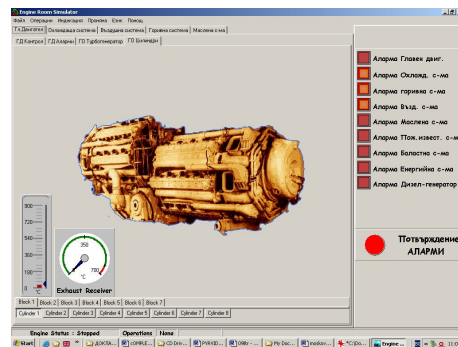
1. Компютърен мрежов продукт за 12 обучаеми с 1 инструктор без интерфейсен хардуер "Машинно помещение на боен кораб – 2D". Базовата среда е FLASH компилирана с DELPHI, входен прозорец е показан на фиг. 3. Комплексният математичен модел е на основата на високочестотен корабен дизелов двигател, като посочения на фиг. 4.

2. Компютърен мрежов продукт за 5 обучаеми с 1 инструктор без интерфейсен хардуер, включващ:

- Софтуер за силовата уредба с визуализация на работното поле на главния двигател при работа по винтова характеристика.
 - Софтуер за диагностика и подготовка на отчетите и първичните документи на главния механик.
3. Симулатор за персонален компютър.



Фиг. 3



Фиг. 4

Възможности на интерфейса за обучаемите:

1. Съдържа математическия модел.
2. Включва програма за визуализация на системите и механизмите, чрез разбираеми схеми включително и на алармената система.
3. Звукови ефекти.
4. Възможност за използване на специален хардуер, след проект и реализиране.

Разработени математически модели:

1. Математически модел на корабна пропульсивна уредба в следните варианти:

- 1.1. Двухактов реверсивен нискочестотен главен корабен дизелов двигател работещ на винт с фиксирана стъпка, прототип MAN B&W 6S60MC, 12240 kW, до

195 г.р.м.

1.2. Четиритактов нереверсивен високочестотен главен корабен дизелов двигател с редуктор и работещ на винт с регулируема стъпка, прототип M507/4, 4750 kW, 1950 г.р.м.

Двата модела включват следните спомагателни системи:

- Система за автоматичен дистанционен контрол;
- Охлаждаща система – контур сладка вода;
- Охлаждаща система – контур морска вода;
- Смазваща система;
- Горивоподготвителна система;
- Горивна система;
- Въздушно-пускова система;
- Газоизпускателна и въздухоснабдителна системи.

2. Математически модел на следните спомагателните менюта:

- Система за свръхпълнене и газоизпускане – центробежен компресор и турбина постоянно налягане.
- Визуализация на горивоподаването и горенето с температурните полета на пламъка.
- Адаптиране на математичния модел по база знания.
- Блок управление закона за движение на изпускателния клапан.
- Хидравлична система за управление на изпускателния клапан и визуализация на температурните полета.

Възможности на ЦПУ:

ЦПУ съдържа следните табла за управление:

1. Главно разпределително табло.
2. Табло за контрол на пропусивната уредба.
3. Табло за управление на спомагателния котел.
4. Табло за комуникация.
5. Алармено табло.

Възможности на машинно отделение:

Машинно отделение дава възможност за контрол

над различните системи от специализирани табла.

Вземайки в предвид съществуващите и предлагани на пазара симулатори, пред настоящата разработка е цялостен математичен модел – виртуално машинно отделение и неговата визуализация. При това са реализирани следните възможности:

1. Разработване структуриран модел на виртуално машинно отделение на базата на съществуващия математичен модел.

2. Разработване на програмен пакет за комплексно обединяване на симулационните модели за целите на обучението и тренинга.

3. Съсредоточаване на усилията върху встъпителните, входни и начални нива за улесняване достъпа и приложимост на програмния пакет сред начинаещия специалисти.

4. Възможност за входни нива за настройване на математичните модели и техните обекти.

5. Системно обучение на математичните модели на пакета по натурна база данни при непрекъсната системна оценка на точност на изходните показатели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я н а к и е в В. Х. Методи за определяне на експлоатационните характеристики на КДВГ в бойни и експлоатационни условия. Дисертация за получаване на научната степен к.т.н., Варна, 1982.

2. Я н а к и е в В. Х. Приложение на ЕИМ в теорията и експлоатацията на корабните двигатели с вътрешно горене. С., ВИ, 1985.

3. A g r e l l F., H. E. Angstrom, B. Eriksson, J. Linderyd, "Integrated Simulation and Engine Test of Closed Loop HCCI Control by aid of Variable Valve Timing," SAE paper 2003-01-0748.

4. N i k o l a o s P. Kyrtatos*, Gerasimos Theotokatos Laboratory of Marine Engineering Department of Naval Architecture & Marine Engineering National Technical University of Athens A VIRTUAL EXPERIMENT TOOL FOR MARINE DIESEL ENGINE POWERPLANT ANALYSIS.

5. Н о м е р а г е of Progress Works, www.rt-science.de/rt-plot.html.

6. Н о м е р а г е of программный комплекс "Дизель + Турбокомпресор", www.vdtch.narod.ru.

СТАТИСТИЧЕСКИ ПОДХОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ИЗОЛИНИИТЕ НА КПД ОТ РАЗХОДНАТА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ТКА - ИЗОБАРНА ТУРБИНА

Юлиан В. Москов, ВВМУ "Н. Й. Вапцаров", Варна

A STATISTICAL WAY FOR DETERMINATION OF I- CURVES EFFICIENCY OUT OF AIR CONSUMPTION OF TURBOCHARGER WITH CONSTANT PRESSURE

Julian V. Moskov, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna

Abstract: *This paper includes a technology of made of nature database for prototypes and modifications of turbochargers of slow speed diesel engines. The technology shows all process of analysis and includes appreciation of efficiency of three and more parameters. This dependence is applied to learning of mathematical model of combined slow speed diesel engine. The purpose of technology is better working and validation of model.*

Key words: *combined slow speed diesel engine, mathematical model, turbochargers, nature database, technology.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В днешно време се наблюдават изключително голямо разнообразие от типове, модели и модификации, като при това броят на двигателите от конкретната модификация, намиращи се в експлоатация намаляват, с което намалява достъпната информация за поведението на този двигател. От друга страна един и същ модел двигатели, произведени от един и същ завод по една и съща документация по време на експлоатация имат различно поведение, за което вина има и несъвършенството на технологията на изработване. Същевременно се повишават сложността на конструкцията, степента на температурната и механична напрегнатост, а така също и изискванията за икономическа ефективност на флота [1].

Всичко това поставя създателя на математичния модел в изключително голямо затруднение, особено като се има предвид каква сложна система представлява ДВГ. А създаването на универсален математичен модел е още по-трудно. Налага се при изграждането на математически модел да се подхожда съобразно особеностите на конкретния двигател, за да бъде моделът, както адекватен така и с необходимата точност. Това поставя една бариера пред навлизането и разпространението на математичните модели в експлоатацията на КДВГ, тъй като тяхното създаване се усложнява, оскъпява и отнема време.

Характеристиките на ДВГ се определят от процесите на преобразуване на енергията, които протичат в цилиндрите му; тези характеристики се подчиняват на законите от теорията на работния процес на ДВГ [2]. От своя страна процесите на преобразуване на енергията, протичащи в ТКА, се подчиняват на законите от теорията на турбомашините, във връзка с което ефективността на ТКА се определя от неговите собствени характеристики, които не зависят от ДВГ. Поради тази причина успешната експлоатация на ДВГ със СП е възможна само при условие на удовлетворително съгласуване на характеристиките на ДВГ и ТКА. За качественна оценка на

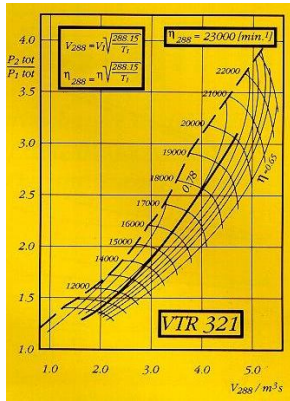
съвместната работа на КДД с ТКА е необходимо получаването на точна зависимост не само на границата на помпажа, а и зависимостта на КПД от степента на повишаване на налягането и разхода на въздух на двигателя [3].

2. МОДЕЛЕН ЕКСПЕРИМЕНТ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЗАВИСИМОСТТА $\eta_k = f(\pi_k, G_k)$

Технологията на извършеното изследване включва апроксимация на натурни данни, получени от заводо-производители на "АББ" и "Мицубиши"- България. Базите данни представляват универсални разходни характеристики на тип оразмери и модификации на изобарни турбини, използвани в окомплектовката на турбо бутални КДД. Цикълът на обработка на данните включва следните основни етапи:

1. Подготовка на данните за оцифроване в матрична форма. То включва разпределяне на изолиниите на постоянния η_k в таблична форма като подбраните η_k приемат следните стойности: 65, 75, 80, 83 и 84. За олекотяване на подхода и удовлетворяване на степента на точност са подбрани посочените стойности на КПД. По този начин са обхванати в изследването възможните стойности през които преминава линията на работните режими. Набора от универсални характеристики на основата на които е извършена цифровизацията [4] включва характеристики като посочената на фиг.1.

2. Подбор и формиране на основната матрица данни във формат Excel(.XLS). Пълните данни за КПД стойности 0,78;0,65 и стойности за границата на помпажната линия са посочени в табл. 1. Стойностите по оцифроване са получени след прецизна обработка със специализиран програмен продукт Grafula II [4]. Това е последната технологична стъпка за въвеждане на базата данни към т. 3.



Фиг. 1

Таблица 1

78		65		z surge	
Пк	Gк, m³/s	Пк	Gк, m³/s	Пк	Gк, m³/s
1,35	1,80	1,30	2,15	1,30	1,00
1,50	2,10	1,40	2,50	1,50	1,60
1,70	2,55	1,50	2,80	1,65	2,00
1,80	2,80	1,65	3,00	1,75	2,20
1,85	3,00	1,70	3,25	2,00	2,70
2,00	3,20	1,80	3,50	2,25	3,00
2,50	3,90	1,90	3,80	2,50	3,30
2,80	4,30	2,00	4,00	3,00	3,90
3,00	4,40	2,25	4,40	3,10	4,00
3,20	4,45			3,50	4,60
				3,80	5,00
				4,00	5,15

3. За извеждане на аналитични зависимости на изолините във функция от степента на повишаване на налягането и разхода на въздух през компресора, при този етап се използва стандартен софтуер за цифрова обработка LABFIT [5]. При тази последователност получаваме апроксимационните зависимости. Класът на точност на обработените база данни отговаря на изискванията за максимална грешка/абсолютна, относителна и СКО до 5%. Съществува зависимост за функционалното изменение на $\eta_k = f(\pi_k, G_k)$ за всички изследвани изолинии на всички стойности на η_k и всички изследвани типоразмерни редове и модификации от наличните натурни данни. Извършеното изследване използва стандартен софтуер LABFIT по ISO 9000-2000 [5] и отговаря изцяло на европейските стандарти за полиномиална обработка на база данни. Посоченият софтуер позволява извеждането на екран на стандартизирани и уеднаквени зависимости за изследваните показатели от база включваща над 550

зависимости с допълнителна възможност за определяне на броя на коефициентите.

Описанието на технологичният процес на гореспоннатите стъпки включва:

- подбор на изолиния с $\eta_k = const$,
- цифровизация на посочения показател в координатна система π_k, G_k ,
- нанасяне на данните от електронна таблица Excel в специализирания програмен продукт, при уточняване на броя на независимите променливи,
- обработка за апроксимиране към определена зависимост с посочени стойности на ковариантната матрица,
- извеждане на печат и графична визуализация на получените зависимости,
- сумарен анализ на получените зависимости според номерацията на LABFIT и определяне на отклоненията от точността за посочения метод; тук подборът се извършва чисто субективно по критерии удовлетворяващи минимална грешка и СКО при съвпадение на коефициентите и независимите променливи,
- сравнителен анализ-извършване на съпоставяне на всички получени резултати приоритетно по $\eta_k = const$ за минимум 20 от апроксимационните функции аналогично в предходната стъпка,
- класиране на подобните функции по критерий на точността на обработката, подбор на оптимална зависимост за посоченото изследване на по критерий минимална грешка, максимално съвпадение на моделните резултати с реалните данни.

Частичната база обработени данни за един ТКА е представена в табл. 2:

Таблица 2

DATA	
kpd65.txt	ATTENTION: THE FILE OF DATA OF THE LAB Fit HAS THE FOLLOWING FORMAT
	4 <=== NUMBER OF EXPERIMENTAL POINTS
	2 <=== NUMBER OF INDEPENDENT VARIABLES
	3 <=== NUMBER OF PARAMETERS OF THE FIT FUNCTION
	x(1,i)
0.130000E+01	0.175000E+01 0.210000E+01 0.300000E+01
	sigmax(1,i)
0.000000E+00	0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
	x(2,i)
0.270000E+01	0.400000E+01 0.500000E+01 0.680000E+01
	sigmax(2,i)
0.000000E+00	0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
	y(i)

0.145000E+01 0.200000E+01 0.250000E+01 0.350000E+01
 sigmay(i)
 0.100000E+01 0.100000E+01 0.100000E+01 0.100000E+01
 INITIAL VALUES OF THE PARAMETERS
 0.108100E+01 0.289800E+01 -.215900E+00
 300 <==== MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS
 0.100000E-05 <==== TOLERANCE OF THE PARAMETERS
 0 <==== 0 MEAN THAT THERE IS NOT, 1 THAT
 THERE ARE UNCERTAINTIES IN X
 0 <==== 0 MEAN THAT THERE IS NOT, 1 THAT
 THERE ARE UNCERTAINTIES IN Y
 0 <==== 0 MEAN THAT X IS NOT, 1 THAT IS ANGLE
 IN DEGREES
 1 <==== POWER
 358 <==== NUMBER OF THE FIT FUNCTION
 FINDER (4 P): 318, 344, 354, 321, 348, 328, 358, 350, 373,
 336

RESULTS

THE CONVERGENCE HAPPENED IN THE
 ITERATION 7

kpd65.txt
 N. 358: $Y=(A+X^2)/(B+C*X1)$ <— Straight line / straight
 line (2)

PARAMETERS: Mean	UNCERTAINTIES: SD
t	P(t)
A = 0.10618498183E+01	SIGMAA = Calculation to proceed —
B = 0.28810073644E+01	SIGMAB = Calculation to proceed —
C = -0.21187394723E+00	SIGMAC = Calculation to proceed —

Chi-Square:

Deg. Freed.= 1 ChiSq.=0.447748E-03 Red.
 ChiSq.=0.447748E-03

Correlation Coefficient:

$R^2_{yy(x)} = 0.9998034E+00$ $adjR^2_{yy(x)} = 0.9994101E+00$

$R_{yy(x)} = 0.999902E+00 \Rightarrow P(NP,|R|) = 0.341E-03$

ATTENTION: THE FIT WAS ENDED BUT IT WILL
 BE RE-DONE!

UNCERTAINTIES OF Yi: $SIGMAY_i = 0.211600E-01$

THE CONVERGENCE HAPPENED IN THE
 ITERATION 8

kpd65.txt
 N. 358: $Y=(A+X^2)/(B+C*X1)$ <— Straight line / straight
 line (2)

PARAMETERS: Mean	UNCERTAINTIES: SD
t	P(t)
A = 0.10618498183E+01	SIGMAA = 0.29289665555E+00 0.362534E+01 0.171
B = 0.28810073644E+01	SIGMAB = 0.24907143820E+00 0.115670E+02 0.055
C = -0.21187394723E+00	SIGMAC = 0.57352181384E-01 -0.369426E+01 0.168

Attention: $SIGMA(p) = f * SIGMA$
 $p=68.3\%: f=1.84$ $p=90\%: f=6.31$ $p=95.4\%: f=14.00$ $p=99\%:$
 $f=63.66$

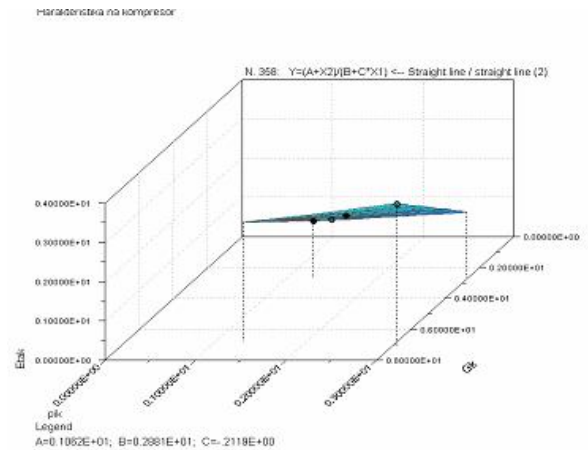
Chi-Square:

Deg. Freed.= 1 ChiSq.=0.100000E+01 Red.
 ChiSq.=0.100000E+01

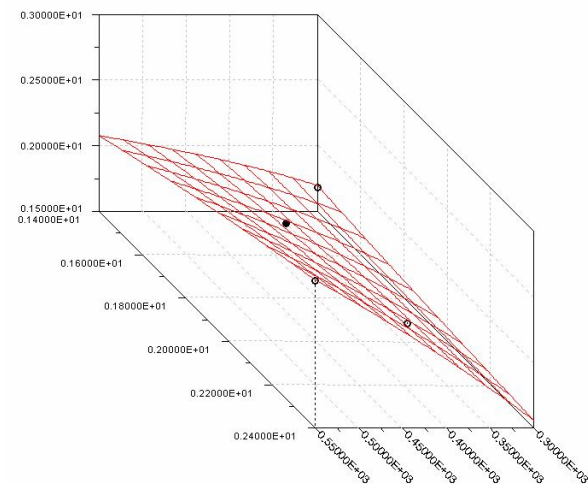
Correlation Coefficient:

$R^2_{yy(x)} = 0.9998034E+00$ $adjR^2_{yy(x)} = 0.9994101E+00$

$R_{yy(x)} = 0.999902E+00 \Rightarrow P(NP,|R|) = 0.341E-03$
 COVARIANCE MATRIX
 0.857885E-01 0.718527E-01 -0.160580E-01
 0.718527E-01 0.620366E-01 -0.141548E-01
 -0.160580E-01 -0.141548E-01 0.328927E-02
 Y(Xi) (THROUGH THE FIT FUNCTION)
 0.144377E+01 0.201649E+01 0.248837E+01 0.350134E+01
 UNCERTAINTIES OF Y(Xi) (THROUGH ERROR
 PROPAGATION, 95.4%)
 0.283179E+00 0.185679E+00 0.247542E+00 0.295714E+00



Фиг. 2. Зависимост на к.п.д. на компресора във функция от степента на повишаване на налягането и разхода на въздух от буталната част за разглеждания типоразмер и модификация



Фиг. 3. Реверсивна зависимост на к.п.д. на компресора във функция от степента на повишаване на налягането и разхода на въздух от буталната част

В резултат от проведеното цялостно изследване и след задълбочен анализ на получените данни съгласно споменатата технология е предложена зависимостта за $\eta_k = const$. При аналитично сравнение между всички изолинии на изследваните ТКА за КПД на ком-

пресора в най-близък план предлагаме следната функция, оврагов тип:

(1)

$$\eta_k = \left(\frac{G_k - 3}{100} \right)^2 - (\pi_k - G_k) + \exp[20(\pi_k - G_k)] .$$

Аналогично се обработва базата данни за установяване на функционална зависимост за границата на помпажа.

3. ИЗВОДИ

1. Недостатъчният опит по експлоатация на ТКА с отклонения от предписанията на завода производител не позволява да бъдат моделирани а и оттам симулирани в задълбочен план характерните особености и физическите процеси, протичащи в тези условия.

2. Разполагаемата база данни и информация за предаварийни и аварийни ситуации при ТКА позволи

да бъде симулирана както работата на центробежен компресор със замърсена проточна част, така и деформацията на границата на помпажа.

3. Така синтезираната зависимост на границата на помпажа и изолиниите на КПД на ТКА са преходен вариант, който подготвя фона на една по нова симулация на линията на работните режими за целите на обучението, диагностиката и управлението на съвместната работа с бугалната част на КДД.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Й о с и ф о в, Й., А. Межерицки. Турбокомпресорни агрегати за принудително пълнене на корабни двигатели с вътрешно горене. С., Техника, 1982.

2. Х у ц и е в, А. И. Двигатели внутреннего сгорания с регулируемым процессом сжатия. М., Машиностроение, 1986.

3. L e e Т. Н., G. E. Adams, W. M. Gaines, Computer process control: modeling and optimization, 2001.

4. Н о м е р а г е of Progress Works, http://home.comset.net/inaudit/files/graf3_d.phtml.

5. Н о м е р а г е of программный комплекс "LABFIT", www.vdtch.narod.ru.

КВАЗИСТАТИЧНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЛИНИЯТА НА РАБОТНИТЕ РЕЖИМИ ЗА СЪВМЕСТНА РАБОТА НА ТКА-ИЗБОРНА ТУРБИНА И НЧКДД ПРИ РАБОТА ПО ВИНТОВА ХАРАКТЕРИСТИКА

Юлиян В. Москов, ВВМУ "Н. Й. Вапцаров", Варна

A QUASISTATIKAL WAY TO CALCULATE WORKING LINE IN COMMON PROCESS OF SLOW SPEED DIESEL ENGINE WITH CONSTANT PRESSURE TURBINE UNDER PROPELLER CURVE

Julian V. Moskov, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna

Abstract: *This is a new way to calculate working line. Quasistatistical calculation gives us more specific results of movement of working point. This movement has a character of non-symmetrical hysteretic. The trajectory of this point shows real process on real time. That is very similar, when we need a complex mathematical model for control and diagnostic tools. The real time is decisive for capacity for work of like control or diagnostic system.*

Key words: *slow speed diesel engine, mathematical model, working line or point, control and diagnostic system, real time.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременните математични модели, които са в основата на практически приложни алгоритми за целите на управлението и диагностиката избягват задълбоченото моделиране на съвместната работа на ТКА и буталната част на КДД. Това се налага от заложения стремеж за използване на газодинамични модели намиращи по широко приложение в правата конструктивна задача. Въпреки напредъка в математичните програмни продукти изходните данни на такива модели се получават трудно и не постигат реално време така необходимо за целите на управлението, а в някои случаи и за диагностиката на съвременните КДД.

Проблема придобива важност най-вече при корабните двигатели, които работят в качеството си на главни за корабната силова уредба. Тук липсата на удовлетворителни модели за целите на управлението е осезателна. Водещите производители като MAN B&W, Wartsila и MITSUBISHI посочват в публикациите си частичните несъвършенства на комплексните системи за управление и диагностика, които следват поради незадоволителното решение на научния проблем на границата бутална част - турбокомпресорен агрегат [3,4]. Стремежа за динамичен подход още повече затруднява задачата. Използването на критериални уравнения за построяване на линията на работните режими е по-скоро приложимо за ретрофит и усъвършенстване на КДД посредством повишаване мощността с ТКА от ново поколение. Много често се изпуска хистерезиса на линията на работните режими с което резултатите чувствително се отдалечават от реалните особено при режим на разтоварване. Търсят се непопулярни методи за отдалечаване на работната точка от помпажната линия като преспускане на продувъчния въздух и др.[5]. Тези конструктивни решения водят до нарастване на енергийните загуби като цяло в КДД.

Квасистатичният подход се е утвърдил като класически при решаване на задачи за управление

[2]. Той дава добри резултати от страна на точността, но изисква олекотени алгоритми и обучение на математичните модели. Най-доброто е, че резултатите се получават в реално време и се вписват в паралелните и едновременни алгоритми на управлението. Съществената част на настоящата публикация разглежда част от инструментариума на този подход за олекотяване на алгоритъма за определяне на реалното поведение на работната точка при работа на КДД под винтова характеристика, т.е. главен корабен двигател с изобарна система на свръхпълнене.

2. ПРЕСМЯТАНЕ НА СЪВМЕСТНАТА РАБОТА С ОТЧИТАНЕ НА ДИНАМИКАТА НА ТКА

Инерционния момент на ротора и демпфиращото действие на изпускателния колектор и ресивера, не позволява на ТКА мигновено да следи изменението на натоварването на двигателя. По този начин налягането на свръхпълнене достига до стойности, които съответстват на измененото натоварване с някакво закъснение.

При бързи натоварвания закъснението на ротора на ТКА води до недостиг на въздух и в някои случаи понижава индикаторния КПД на двигателя и развивания от него въртящ момент [1].

Тези особености в протичането на преходния процес определят динамичните свойства на ТКА.

При това за преходния режим се използват всички уравнения на установения режим. Единствено, вместо съотношението на равенството на въртящите моменти на турбината и компресора, е необходимо да се добави уравнението на динамиката на ТКА:

$$(1) \quad T_{iqT} = t_{iqT_0} + \Delta T_{iqT}; \quad J_k \cdot \frac{\partial \omega_k}{\partial t} = T_{iqT} - T_{iqk};$$

$$T_{iqk} = T_{iqk_0} + \Delta T_{iqk}$$

Тъй като $\omega_k = \omega_{k_0} + \Delta \omega_k$ и $J_k = J_r + J_{pk}$, то, или с отчитане на условието: $T_{iqT} - T_{iqk} = 0$,

$$(2) \quad J_k \cdot \frac{\partial \Delta \omega_k}{\partial t} = \Delta T_{iqT} - \Delta T_{iqk},$$

$$J_k \cdot \frac{\partial \Delta \omega_k}{\partial t} = (T_{iqT_0} + T_{iqT}) - (T_{iqk_0} - T_{iqk}).$$

Изразът за T_{iqk} има следния вид:

$$T_{iqk} = \frac{G_k W_k}{\omega_{nk}},$$

т. е. $T_{iqk} = f(G_k, \omega_k, \pi_k)$.

Тъй като атмосферното налягане може да се приеме за постоянно аргументът се замества с налягането след компресора p_k .

Разходът на въздух G_k се определя от следната функционална зависимост:

$$(3) \quad G_k = f(p_k, W_k).$$

Като се има предвид

$$(4) \quad T_{iqk} = f(p_k, W_k),$$

след разлагането на функциите в ред на Тейлор и последващо линеаризиране:

$$\Delta T_{iqk} = \frac{\partial T_{iqk}}{\partial p_k} \Delta p_k + \frac{\partial T_{iqk}}{\partial \omega_k} \Delta \omega_k,$$

$$(5) \quad \Delta G_k = \frac{\partial G_k}{\partial p_k} \Delta p_k + \frac{\partial G_k}{\partial \omega_k} \Delta \omega_k.$$

За да се определи производната $\frac{\partial T_{iqk}}{\partial p_k}$ се строи

характеристика с координати $T_{iqk} = f(p_k)$ при $\omega_k(n_{TKA}) = const$.

Като се има предвид вече известната зависимост за T_{iqT} , може да се запише

$$T_{iqT} = f(W_{adT}; G_{g1}; \omega_k; \eta_T).$$

Съобразно със зависимостите:

$$(6) \quad \begin{aligned} W_{agT} &= f(p_{g1}; T_{g1}), \\ G_{g1} &= f(p_{g1}; T_{g1}), \\ \eta_T &= f(\omega_k; p_{g1}; T_{g1}). \end{aligned}$$

T_{iqT} се изразява с функцията

$$(7) \quad T_{iqT} = f(\omega_k; p_{g1}; T_{g1}).$$

След разлагане на получената функционална зависимост в ред на Тейлър и линеаризиране е полу-

чено
(8)

$$\Delta T_{iqT} = \frac{\partial T_{iqT}}{\partial \omega_k} \Delta \omega_k + \frac{\partial T_{iqT}}{\partial p_{g1}} \Delta p_{g1} + \frac{\partial T_{iqT}}{\partial T_{g1}} \Delta T_{g1}.$$

Производните, получени при това разлагане, се определят при избран равновесен режим. Например в съответствие със зависимостта:

$$(9) \quad T_{iqT} = \frac{G_{g1} W_{agT}}{W_k} \eta_T$$

се получава

$$(10) \quad J_k \frac{d\omega_k}{dt} + F_k \Delta \omega_k = \frac{\partial T_{iqT}}{\partial T_{g1}} \Delta T_{g1} - \frac{\partial T_{iqk}}{\partial p_k} \Delta p_k.$$

След заместване, уравнението на динамиката добива вида

$$(11) \quad \begin{cases} \frac{\partial T_{iqT}}{\partial \omega_k} = -\frac{T_{iqT}}{\omega_k} \\ \frac{\partial T_{iqT}}{\partial p_{g1}} = \frac{T_{iqT} \partial G_{g1}}{G_{g1} \partial p_{g1}} + \frac{T_{iqT} \partial W_{adT}}{W_{adT} \partial p_{g1}} \\ \frac{\partial T_{iqT}}{\partial T_{g1}} = \frac{T_{iqT} \partial G_{g1}}{G_{g1} \partial T_{g1}} + \frac{T_{iqT} \partial W_{adT}}{W_{adT} \partial T_{g1}} \end{cases}.$$

Тъй като първите първите производни на коефициентите пред нарастванията са непрекъснати, то уравненията в системата (11) се групират както следва:

(12)

$$\begin{cases} dT_{iqk} = \frac{\partial T_{iqk}}{\partial p_k} dp_k + \frac{\partial T_{iqk}}{\partial \omega_k} d\omega_k \\ dT_{iqk} = \frac{\partial T_{iqk}}{\partial p_k} dp_k + \frac{\partial T_{iqk}}{\partial \omega_k} d\omega_k \\ dG_k = \frac{\partial G_k}{\partial p_k} dp_k + \frac{\partial G_k}{\partial \omega_k} d\omega_k \\ dT_{iqT} = \frac{\partial T_{iqT}}{\partial \omega_k} d\omega_k + \frac{\partial T_{iqT}}{\partial p_{g1}} dp_{g1} + \frac{\partial T_{iqT}}{\partial T_{g1}} dT_{g1} \\ J_k \frac{d\omega_k}{dt} + F_k d\omega_k = \frac{\partial T_{iqT}}{\partial p_{g1}} dp_{g1} + \frac{\partial T_{iqT}}{\partial T_{g1}} dT_{g1} - \frac{\partial T_{iqk}}{\partial p_k} dp_k \end{cases}$$

Решаването на системата се заключава в решаването на следното уравнение:

$$(13) \quad T \frac{dx}{dt} + x = -k_n \mu_n - b_1 \frac{d\mu_n}{dt} - k_b \mu_b - b_2 \frac{d\mu_b}{dt},$$

където $x = \frac{\Delta p_k}{p_{k_0}}, \quad \mu_n = \frac{\Delta n_{\partial e}}{n_{\partial e_0}}, \quad \mu_b = \frac{\Delta B_e}{B_{e_0}}.$

Допускаме, че зависимостите на T_{iq_T} , T_{iq_k} и n_{TKA} по отношение на независимите променливи p_k , $n_{\partial\theta}$ и B_e са от вида:

$$(14) \quad \begin{aligned} T_{iq_1} &= C_T \cdot p_k^{\alpha_T} \cdot n_{\partial\theta}^{\beta_T} \cdot B_e^{\gamma_T} , \\ T_{iq_k} &= C_k \cdot p_k^{\alpha_k} \cdot n_{\partial\theta}^{\beta_k} \cdot B_e^{\gamma_k} , \\ n_{TKA} &= C_{TKA} \cdot p_k^{\alpha_{TKA}} \cdot n_{\partial\theta}^{\beta_{TKA}} \cdot B_e^{\gamma_{TKA}} . \end{aligned}$$

Наличието на четири константи при направеното предположение на вида на функциите предлага голяма гъвкавост на моделиране на реалния процес [28]. Например при $\gamma_T = \gamma_k = \gamma_{TKA} = 0$ се изключва зависимостта на T_{iq_T} , T_{iq_k} и n_{TKA} от независимата променлива B_e .

От уравненията (14) следват равенствата:

$$(15) \quad T = \frac{\pi}{30} J \left(\frac{\frac{\partial n_{TKA}}{\partial p_k}}{\frac{\partial}{\partial p_k} (T_{iq_T} - T_{iq_k})} \right) = \frac{\pi}{30} J \frac{C_{TKA}^{\alpha_{TKA}-1} C_{\partial\theta}^{\beta_{TKA}} B_e^{\gamma_{TKA}}}{C_k \cdot p_k^{\alpha_k-1} \cdot B_e^{\gamma_k} - C_T \cdot p_k^{\alpha_T-1} \cdot n_{\partial\theta}^{\beta_T} \cdot B_e^{\gamma_T}} .$$

Поради повтаряемостта на израза в знаменателя, той се означава с \overline{M} , а $\alpha_{TKA} - 1$ - с $\overline{\alpha_{TKA}}$; аналогични са и означенията за останалите степени.

Получават се и зависимостите:

$$(16) \quad k_n = \frac{n_{\partial\theta_0}}{p_{k_0}} \cdot \frac{C_k p_k^{\alpha_k} n_{\partial\theta}^{\beta_k} B_e^{\gamma_k} - C_T p_k^{\alpha_T} n_{\partial\theta}^{\beta_T} B_e^{\gamma_T}}{\overline{M}} ,$$

$$(17) \quad b_1 = \frac{\pi}{30} \cdot J \cdot \frac{n_{\partial\theta_0}}{p_{k_0}} \cdot \left(\frac{C_{TKA} p_k^{\alpha_{TKA}} n_{\partial\theta}^{\beta_{TKA}} B_e^{\gamma_{TKA}}}{\overline{M}} \right) ,$$

$$(18) \quad k_B = \frac{B_{e_0}}{p_{k_0}} \cdot \left(\frac{C_k p_k^{\alpha_k} n_{\partial\theta}^{\beta_k} B_e^{\gamma_k} - C_T p_k^{\alpha_T} n_{\partial\theta}^{\beta_T} B_e^{\gamma_T}}{\overline{M}} \right) ,$$

$$(19) \quad b_2 = \frac{\pi}{30} \cdot J \cdot \frac{B_{e_0}}{p_{k_0}} \cdot \frac{C_{TKA} p_k^{\alpha_{TKA}} n_{\partial\theta}^{\beta_{TKA}} B_e^{\gamma_{TKA}}}{\overline{M}} ,$$

където k_n и b_1 са коефициенти на усилване по честота на въртене на двигателя, а k_B и b_2 са коефициенти на усилване по разход на гориво.

Поради това, че съществуват линейните зависимости

$$(20) \quad \begin{aligned} p_k &= p_{k_0} + \tilde{p}_k t , \\ n_{\partial\theta} &= n_{\partial\theta_0} + \tilde{n}_{\partial\theta} t , \\ B_e &= B_{e_0} + \tilde{B}_e t \end{aligned}$$

и апроксимирайки получените зависимости (16) ÷ (19) спрямо t около точката $(p_{k_0}, n_{\partial\theta_0}, B_{e_0})$, получаваме следното опростяване на изразите:

$$(21) \quad \begin{aligned} k_n &= k_{n_0} + \overline{k}_n t , & b_1 &= b_{1_0} + \overline{b}_1 t , \\ k_B &= k_{B_0} + \overline{k}_B t , & b_2 &= b_{2_0} + \overline{b}_2 t , \end{aligned}$$

а след заместване в изходното уравнение:

$$(22) \quad \begin{aligned} T \frac{dx}{dt} + x &= -(k_{n_0} + \overline{k}_n t) \frac{\tilde{n}_{\partial\theta} t}{n_{\partial\theta_0}} - \\ &- (b_{1_0} + \overline{b}_1 t) \frac{\tilde{n}_{\partial\theta}}{n_{\partial\theta_0}} - (k_{B_0} + \overline{k}_B t) \frac{\tilde{B}_e t}{B_{e_0}} - (b_{2_0} + \overline{b}_2 t) \frac{\tilde{B}_e}{B_{e_0}} . \end{aligned}$$

Опростявайки израза отлясно, получаваме уравнението

$$(23) \quad T \frac{dx}{dt} + x = C_0 + C_1 t + C_2 t^2 ,$$

където е положено:

$$(24) \quad \begin{aligned} C_0 &= -b_{1_0} \frac{\tilde{n}_{\partial\theta}}{n_{\partial\theta_0}} - b_{2_0} \frac{\tilde{B}_e}{B_{e_0}} , \\ C_1 &= -k_{n_0} \frac{\tilde{n}_{\partial\theta}}{n_{\partial\theta_0}} - \overline{b}_1 \frac{\tilde{n}_{\partial\theta}}{n_{\partial\theta_0}} - k_{B_0} \frac{\tilde{B}_e}{B_{e_0}} = \\ &= -\frac{\tilde{n}_{\partial\theta}}{n_{\partial\theta_0}} (k_{n_0} + \overline{b}_1) - \frac{\tilde{B}_e}{B_{e_0}} (k_{B_0} + \overline{b}_2) , \\ C_2 &= -\overline{k}_n \frac{\tilde{n}_{\partial\theta}}{n_{\partial\theta_0}} - \overline{k}_B \frac{\tilde{B}_e}{B_{e_0}} . \end{aligned}$$

Извършвайки аналогични преобразувания за T : $T = T_0 + \tilde{T}t$, получаваме окончателния вид на уравнението:

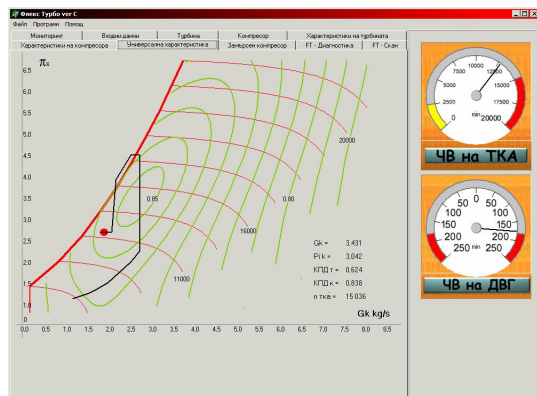
$$(25) \quad (T_0 + \tilde{T}t) \frac{dx}{dt} + x = C_0 + C_1 t + C_2 t^2 ,$$

което е линейно диференциално уравнение и неговото решение е в квадратура.

Използваният дедуктивен подход е за определяне на параметрите на ТКА при неустановен режим на КДД [51,85]. При нови конструкции и наличие на данни от завода-производител, по зависимости (12), (13) и (14) ММ може да се актуализира.

ММ като цяло позволява да се наблюдава траекторията на точката при промяна на режимните фактори на КДД. Характерът на траекторията показва процес, който далеч не съвпада със симетричния хистерезисен цикъл разглеждан в досегашните версии на продукта, за натоварване и разтоварване на двигателя. На фиг. 1 е изобразен графичният панел на разходна характеристика за въведените входни данни за ММ. Последният позволява сместване на границата на

помпажа във функция от експлоатационните фактори и замърсяването на проточната част на компресора. Аналогичен е способът на използване на програмният продукт при симулирано замърсяване на проточната част на компресора. Показани са контролни прибори, които посочват текущите стойности на показатели свързани с работния процес на буталната част на КДД. Програмният продукт позволява визуализация на ЛРР върху типови разходни характеристики на ТКА. Този панел позволява нанасянето на ЛРР върху стандартна характеристика и въвеждането на допълнителни от директория PICTURES.



Фиг. 1

Разглеждания в този доклад математичен модел на съвместната работа на КДД и ТКА е реализиран в *ї ő ĩ ää ĩ ëŷ ĩ ő äcëö SFP*. Програмата отговаря на съвременните изисквания към софтуерните продукти и е напълно интегрируема с други програмни продукти. Програмният продукт извежда всички показатели и характеристики аналогични на съвременните MIP

системи, което го прави напълно приложим за диагностиката, управлението и еталонния анализ. Програмният продукт има възможност да бъде използван за целите на обучението и тренинга и в тази връзка програмата **SFP** представлява съществен принос за тренажорната подготовка във ВВМУ „Н. Й. Вапцаров”.

3. ИЗВОДИ

1. Реализацията на усъвършенстван ММ е насочена към визуализация на работната точка под разходна характеристика в динамика.

2. Софтуерът за съвместната работа на КДД и ТКА е разширен по посока на показателите на газообмена, свръхпълненето и постъпковото (квазистатично) запаметяване на изображението на предходните процеси.

3. Графичното изображение на индикаторния процес е векторно разтерово, което избягва изкуствените заглаждания в образа, а високоскоростните му характеристики подобряват класа на точност с още $2 \div 2,5\%$

4. Подобрената версия на програмният продукт може да бъде използвана за целите на диагностиката, управлението и тренинга на корабни механици.

ЛИТЕРАТУРА

1. Й о с и ф о в, Й., А. Межерички. Турбокомпресорни агрегати за принудително пълнене на корабни двигатели с вътрешно горене. С., Техника, 1982.
2. Я н а к и е в, В. Х. “Корабни двигатели с вътрешно горене - теория и експлоатация”. С., ВИ, 1996.
3. A n a l y s i s Software for Peak Pressure Indicators - Diesel and Gas Turbine Worldwide. Nov. 1998.
4. К е е р the Engines Running with Computer-Controlled Surveillance (CoCoS) - Diesel and Gas Turbine Worldwide. Sept.1995.
5. I n s t r u c t i o n Book Operation of K-GF Engines”- B&W .

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА ДИСКРЕТИЗАЦИЯТА ВЪРХУ ТОЧНОСТТА НА МЕТОДА НА КРАЙНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ И ТРАНСЛАЦИОННИЯ МЕТОД ПРИ РЕШАВАНЕТО НА ЕДНОМЕРНИ ДИНАМИЧНИ ЗАДАЧИ

Васил С. Апостолов, ВВМУ "Н. Й. Вапцаров", Варна
Христинка Г. Иванова, ВВМУ "Н. Й. Вапцаров", Варна

RELATION BETWEEN THE DISCRETIZATION AND THE ACCURACY OF FINITE ELEMENT METHOD AND TRANSLATION METHOD FOR ONE-DIMENSIONAL DYNAMIC PROBLEMS

Vasil S. Apostolov, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna
Hristinka G. Ivanova, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna

Abstract: *The basic peculiarities of FEM and TM are described. The relation between the discretization and the accuracy of both methods are investigated. Based on the results received the advantages of TM in comparison with FEM for one-dimensional dynamic problems are shown.*

Key words: *discretization, dynamic problems, accuracy, FEM, TM.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Методът на крайните елементи (МКЕ) и Транслационния метод (ТМ) са изградени на една и съща основна предпоставка: предварителна физическа дискретизация на разглеждания обект, като във всеки участък елементът се приема с постоянно напречно сечение. В работата е извършен съпоставителен анализ на двата метода по отношение на влиянието на дискретизацията върху точността на получаваните резултати. Изследването е извършено за едномерни задачи - греди на конкретни примери.

2. СЪПОСТАВЯНЕ НА ДВАТА МЕТОДА ПО ОТНОШЕНИЕ НА СЪЩНОСТТА ИМ

2.1. Същност на метода на крайните елементи (МКЕ)

Една от основните операции, заложена в МКЕ е определянето на интерполиращ полином, чрез който се изразява изменението на търсената функция на преместването в рамките на отделния краен елемент.

Основната трудност на построението на полинома се състои в това, че използваните интерполиращи функции за всеки краен елемент трябва да осигуряват непрекъснатост на функцията $w(x, y, z)$ и нейните производни до $m - 1$ -ви порядък включително в съответните краища V (или L за едномерни задачи), където $2m$ е порядъка на диференциалното уравнение за описание на съответната гранична задача. Изпълнението на това изискване осигурява сходимостта на решението по МКЕ към точното при намаляване на размерите на крайните елементи.

Непрекъснатостта на функцията $w(x)$ и нейните производни до $m - 1$ -ви порядък в интервала ще се осигури, ако степента n на всеки полином удовлетворява зависимостта

$$(1) \quad n + 1 \geq 2m \quad .$$

Това условие следва от условието за стационарност на функционала $\Phi(w)$, който съответства на дадената гранична задача $\delta\Phi(w) = 0[I]$. Функционалът $\Phi(w)$ съдържа производни на функцията $w(x)$ до m -ти ред, което облекчава подбора на апроксимиращите функции.

За едномерна област провисването се търси в следния вид:

$$(2) \quad w(x) = p(x) = \sum_{i=0}^n \alpha_i x^i \quad .$$

За едномерна гранична задача, описвана с диференциално уравнение от 4-ти ред за огъване на гредата $2m = 4$, като се има предвид (1) за степента на полинома се получава $n = 3$. Интерполиращият полином ще има вида

$$(3) \quad p(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \alpha_3 x^3 \quad .$$

Неизвестните параметри α_i се определят от условията за непрекъснатост на полиномните функции:

$$(4) \quad \begin{aligned} p(0) = w(0) = q_1; \quad \frac{\partial p(0)}{\partial x} = \frac{\partial w(0)}{\partial x} = q_2; \\ p(\ell) = w(\ell) = q_3; \quad \frac{\partial p(\ell)}{\partial x} = \frac{\partial w(\ell)}{\partial x} = q_4; \end{aligned}$$

След определяне на коефициентите α_i и заместването им в (2) ще получим интерполиращия полином на крайния елемент:

$$(5) \quad w(x) = \sum_{i=1}^4 q_i E_i(x) \quad ,$$

където $E_i(x)$ са означени едномерните функции на Ермит [1].

С помощта на функциите на Ермит се определят коефициентите на матрицата на коравините:

$$(6) \quad k_{ik} = EI \int_0^{\ell} E_i''(x) E_k''(x) dx, \quad (i, k = 1, 2, 3, 4)$$

и елементите на вектора на възловите натоварвания:

$$(7) \quad P_i = EI \int_0^{\ell} q(x) E_i(x) dx, \quad (i, k = 1, 2, 3, 4)$$

При решаването на динамични задачи апроксимиращата функция се задава във вида (5), но се включва фактора време:

$$(8) \quad w(x, t) = \sum_{i=1}^4 q_i(t) E_i(x)$$

При разглеждането на статичната задача може да се очаква, че полиномът (3) ще даде точните стойности за провисването във всички точки по дължината на елемента. Очевидно същото не се отнася за динамичната задача тъй като решението на диференциалното уравнение на трептенията има свършено друг вид. Затова точността на решението е в пряка връзка с броя на точките на дискретизация дори за призматична греда.

При решаването на динамичните задачи се използват същите функции на Ермит, определени при решаването на съответните статични задачи.

С тяхна помощ се определят елементите на матриците на масата и съпротивлението съответно:

$$(9) \quad m_{ik} = \rho \int_0^a E_i E_k dx ;$$

$$b_{ik} = \beta \int_0^a E_i E_k dx .$$

Очевидно тези коефициенти, които се отнасят за възловите точки, се определят приблизително.

2.2. Същност на трансляционния метод (ТМ)

Трансляционният метод се отнася към групата числени методи, основани на предварителната дискретизация на физическия модел. Теоретичните постановки на метода са развити в [2]. Неговата същност ще бъде разкрита за едномерна конструкция в най-обща постановка - непрекъсната призматична греда на еластични опори и еластична основа, натоварена с произволна система от статични или динамични сили, в това число надлъжна сила (фиг. 1). От тази схема може да се премине към различни частни случаи, например неприматична греда със свободни краища.

Непрекъснатата греда се разделя на n - участъци, като точките на дискретизация се съобразяват с геометричните особености на конструкцията, в това число с разположението на опорите и характера на външното натоварване. В рамките на всеки участък, подобно на обобщения метод на началните параметри и МКЕ геометричните и физичните параметри на гредата се приемат неизменни; разпределеното натоварване се приема за равномерно.

При извода на зависимостите на ТМ за произволен участък от гредата се въвеждат следните характеристики, наречени "частични" ("парциални"), с което се подчертава, че се отнасят за част от конструкцията:

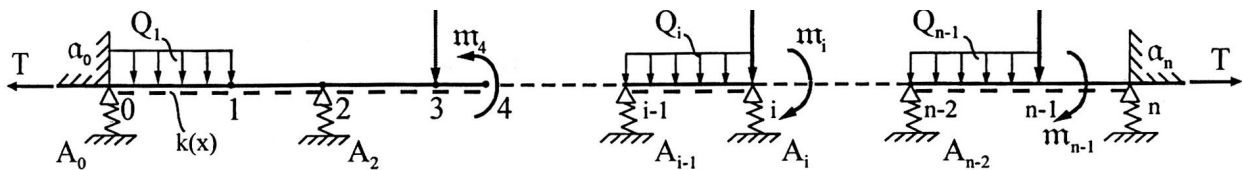
- "Частични" податливости за разглежданото сечение на гредата, отнасящи се за лявата или дясната отсечени части (фиг. 2а и фиг. 2б), където:

f_{iP} е вертикална податливост от единична сила в т. i ;

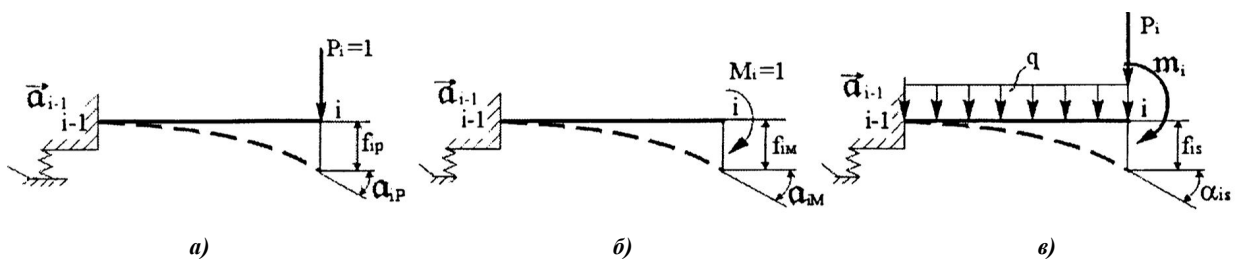
α_{iP} - ъглова податливост от единична сила в т. i ;

f_{iM} - вертикална податливост от единичен момент в т. i ;

α_{iM} - ъглова податливост от единичен момент в т. i .



Фиг. 1. Дискретизация на непрекъсната греда



Фиг. 2. Схема за определяне на частичните параметри

"Частичните" податливости обобщено ще означим с

$$(10) \quad \bar{\alpha}_i = \begin{Bmatrix} f_{iP} \\ f_{iM} \\ \alpha_{iP} \\ \alpha_{iM} \end{Bmatrix}$$

- "Частични" ("парциални") премествания за разглежданото сечение на гредата, които се отнасят за лявата или дясната отсечени части (фиг. 2б) където:

f_{is} е вертикално преместване в т. i от всички силови въздействия S на съответната отсечена част на гредата;

α_{is} - ъгъл на завъртане на напречното сечение в т. i от всички силови въздействия S на съответната отсечена част на гредата.

За всяка точка на дискретизация, включително точките, в които са разположени опорите, започвайки от единия край на гредата, например левия, последователно се определят частичните характеристики на гредата. Последните в същата последователност формират граничните условия на левия край на всеки един от разглежданите участъци при определянето на частичните характеристики за поредната точка на гредата, съвпадаща с десния край на съответния участък.

За определянето на частичните характеристики над опорните точки първоначално се определят неизвестните "частични" реакции за съответните отрязани части на гредата от условието за непрекъснатост на деформациите над съответните опори.

Пълните характеристики на напрегнатото и деформираното състояние на непрекъснатата греда се определят в следната последователност: Първоначално се определят неизвестните усилия в най-крайното (най-дясното) сечение на гредата от условията за непрекъснатост на деформациите. След това усилията и преместванията във всички точки на дискретизация се определят при т.н. "обратна трансляция".

Терминът "трансляция" означава, че се извършва предаване на силово-деформационните характеристики на гредата от един участък на друг, което се осъществява чрез зависимости, свързващи частичните характеристики на две последователни точки.

За определянето на частичните характеристики на системата се използват решенията на съответните линейни диференциални уравнения на огъване на гредата в статична и динамична постановка.

3. Изследване на влиянието на дискретизацията

А. Статистически задачи

Разгледана е стоманена конзолна призматична греда с дължина $\ell = 80 \text{ in}$, в свободния край на която е приложена сила $F = 50 \text{ lb}$, напречното сечение е квадратно с размери $2 \times 2 \text{ in}$. Гредата е разделена на 10

и 40 елемента. Резултатите от изчисленията на провисването в края на гредата и огъващия момент в опорното сечение по МКЕ, получени с програмния пакет COSMOS/M са представени в табл. 1. За сравнение в същата таблица са представени резултатите от изчисленията на посочените параметри чрез известни аналитични формули от справочната литература [3].

За ТМ тази проверка не е необходима. При $n = 1$ и произволна стойност на n резултатите от изчисленията са едни и същи, съвпадащи с тези в табл. 1.

Таблица 1

Резултати от изчисленията на конзолна призматична греда

Метод	Брой елементи	$w(\ell), \text{in}$	$M(0), \text{lb in}$
МКЕ	10	- 0,2133	- 4 000
	40	- 0,2133	- 4 000
Аналитични изрази [3]	-	- 0,2133	- 4 000

Б. Динамични задачи

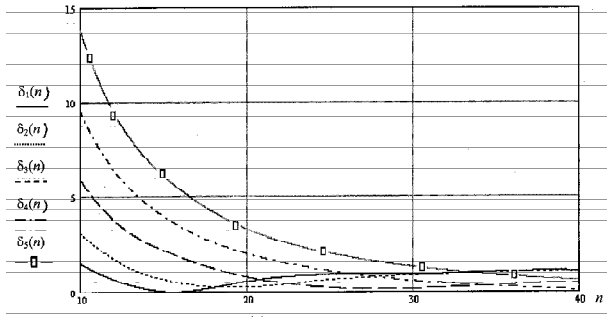
Б.1. Призматична греда

За определяне на броя на елементите, осигуряващ необходимата точност на изчисляваните собствени честоти е извършен честотен анализ на призматична греда със свободни краища с характеристики на 40 000 dwt кораб: дължина на гредата $L = 177,00 \text{ m}$; инерционен момент на напречното сечение $I_0 = 82,80 \text{ m}^4$; лице на срязване $\omega_0 = 0,46 \text{ m}^2$; интензивност на масите $m_0 = 587,4 \text{ t / m}$; инерционен радиус $r = 5,4 \text{ m}$; относителен масов инерционен момент на завъртане на напречните сечения $r / \ell = 0,03$; отношение на лицето на напречното сечение на гредата към лицето на срязване $F / \omega_0 = 6,41$. Гредата е разделена на 10, 20, 30 и 40 елемента. За прилагане на ТМ е използван програмен пакет *Mathcad Professional* [4]. Получените собствени честоти за първите пет тона от основния спектър са представени в табл. 2. На фиг. 3 е представено в графичен вид изменението относителната грешка $\delta(n)$ на собствените честоти, изчислени по МКЕ, в зависимост от броя на елементите n , на които е разделена гредата.

Таблица 2

Собствени честоти на призматична греда със свободни краища

Метод	Брой елементи	Собствени честоти, Hz				
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
МКЕ	10	0,546	1,231	1,941	2,579	3,124
	20	0,557	1,273	2,045	2,792	3,502
	30	0,559	1,281	2,064	2,832	3,574
	40	0,56	1,284	2,071	2,846	3,599
Честотни уравнения [4]	-	0,554	1,270	2,061	2,848	3,621
ТМ	10	0,554	1,270	2,061	2,848	3,621
	40	0,554	1,270	2,061	2,848	3,621



Фиг.3. Относителна грешка $\delta(n)$ на първите пет собствени честоти на трепене на призматична греда в зависимост от броя на елементите на дискретизация, n

Б.2. Непризматична греда - аналитичен тип

Приема се, че инерционният момент и масата на 40 000 dwt кораба се разпределят съгласно изразите:

$$(11) \quad \begin{aligned} I(x) &= I_0 \left(0,2 + 0,8 \cos \frac{\pi x}{\ell} \right) , \\ m(x) &= m_0 \left(0,2 + 1,265 \cos \cos \frac{\pi x}{\ell} \right) \end{aligned}$$

при начало на координатната система в средата на кораба.

В табл. 3 са представени резултатите от изчисленията на първите пет собствени честоти на непризматичната греда.

Таблица 3
Собствени честоти на непризматична греда със свободни краища - аналитичен модел на кораб

Метод	Брой елементи	Собствени честоти, [Hz]				
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
МКЕ	10	0,6	1,186	1,759	2,275	2,719
	20	0,622	1,248	1,887	2,502	3,087
	30	0,626	1,259	1,912	2,546	3,162
	40	0,627	1,263	1,918	2,559	3,184
ТМ	10	0,623	1,284	2,007	2,748	3,493
	20	0,634	1,307	2,04	2,787	3,536
	30	0,636	1,311	2,046	2,794	3,544
	40	0,637	1,312	2,047	2,796	3,547

4. АНАЛИЗ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

При статически задачи резултатите, получавани по двата метода (МКЕ и ТМ) не се влияят от броя на точките на дискретизация. При решаването на динамически задачи погрешността от дискретизацията е съществена при МКЕ даже за призматични греди. Резултатите, получавани съгласно ТМ при статически и динамически задачи не се влияе от броя на точките на дискретизация. За МКЕ съществува минимално число точки на дискретизация, равно на номера на тона на търсената честота, при което методът е приложим [4]. Освен това, както се вижда от фиг. 3 съществува

оптимален брой елементи, при който грешката от дискретизация при МКЕ е най-малка; при по-малък и по-голям брой - грешката нараства.

При непризматични греди влиянието на дискретизацията при МКЕ е по-силно от това при ТМ. Така например при изменение на n от $n = 10$ до $n = 40$ съгласно МКЕ честотата f_5 се променя със 17 %. В същото време при ТМ това изменение е само 1,5 %. Освен това крайните резултати по двата метода при $n = 40$ значително се различават. Например отноше-

$$\text{нието } \frac{f_5^{TM}}{f_5^{MKE}} = 1,11, \text{ което се дължи на приблизител-$$

ния характер на апроксимиращата функция за провисването w , приета в МКЕ за решаване на динамически задачи.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въз основа на направените изследвания могат да се направят следните изводи:

1. Точността на ТМ не зависи от броя на точките на дискретизация при решаването както на статически задачи, така и на динамически задачи за призматични греди, тъй като в неговия алгоритъм са заложени точни зависимости за определяне на провисването $w(x)$.

2. Точността на МКЕ също не зависи от броя на точките на дискретизация при решаването на статически задачи за призматични греди. Но тази точност е в пряка зависимост от дискретизацията при динамически задачи. Съществува оптимален брой точки на дискретизация, при който погрешността на резултатите е минимална. Основната причина за посочената зависимост произтича от използваните функции на Ермит, влизащи в изразите за провисването $w(x)$. Тези функции точно описват провисването между точките на дискретизация при статически задачи. Същите функции на Ермит са заложени в алгоритмите съгласно МКЕ при решаването на динамически задачи, което предопределя приблизителния характер на получаваните резултати даже за призматични греди.

3. За непризматични греди получаваните резултати зависят в по-голяма степен от броя на точките на дискретизация при МКЕ в сравнение с ТМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. П о с т н о в, В. А. Численные методы расчета судовых конструкций. Ленинград, Судостроение, 1977.
2. А п о с т о л о в, В. С. Същност и основни зависимости на транслационния метод. Годишник на Института по корабостроене - Варна, 1986.
3. С п р а в о ч н и к по строительной механике корабля, т. 1. Ленинград, Судостроение, 1982.
4. И в а н о в а, Хр. Г. Изследване на общите вертикални свободни вибрации на кораба. Дисертация за получаване на образователната и научната степен "Доктор". Варна, 2005.

ИЗПОЛЗВАНЕ НА ПРОГРАМАТА MATLAB ПРИ ОБУЧЕНИЕ НА СТУДЕНТИ И КУРСАНТИ ДА СИНТЕЗИРАТ СИСТЕМИ, АВТОМАТИЧНО РЕГУЛИРАНИ ПО МЕТОДА НА ХОДОГРАФА НА КОРЕНИТЕ

Любомир Й. Дънков, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна

Бохос Р. Апрахамян, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна

USUNG A MATLAB FOR EDUCATION

Lyubomir J. Dankov, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna

Bohos R. Aprahamian, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna

Abstract: *This paper take a view of using a Matlab in education process for students teaching “Fundamentals of Feedback Control”.*

Key words: *matlab, education, root-locus.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Целта на настоящата статия е да покаже как може да се използва програмната среда MATLAB и част от нейните приложения за синтез на системи за автоматично регулиране при обучение и трениране на студенти в курса по “Основи на автоматичното управление”. Тази програмна среда дава възможност за синтез по различни методи, но в настоящата статия се разглежда метода на ходографа на корените.

2. ИЗЛОЖЕНИЕ

При обучението студентите и курсантите се запознават със следните елементи:

1. Въвеждане на динамичния модел в MATLAB

За да се използват споменатите графични интерфейси е необходимо първо да се въведе динамичния модел на системата за автоматично регулиране. Динамичния модел може да бъде представен в един от стандартните за MATLAB три вида за линейни стационарни модели (LTI): предавателна функция, полюси и нули и пространство на състоянията. Практиката от използването на тази програма показва, че е достатъчно студентите да не се запознават пълните възможности на програмата, а само с такива които еднозначно позволяват решение на поставяните задачи. По тази причина е достатъчно те да могат да въвеждат моделите чрез предавателни функции, характерни за класическата теория на автоматичното регулиране.

```
>>Kc = 91.6800
Kc =
    91.6800
>> Ce=0.22
Ce =
    0.2200
>> Ky=1100
Ky =
    1100
>> ip=312
ip =
    312
>> Ko=0.0011
Ko =
    0.0011
>> Tm=0.1
Tm =
    0.1000
```

За пример се разглежда електромеханичната следяща система - зад. 4.4 от ръководството за практически упражнения [1].

Тази система за автоматично регулиране има следните параметри:

```
kc= 91,68 [V/rad],
ce=0,22[V.s/rad],
ky=1100,
ip=312,
ko=0,0011,
Tm=0,1[s].
```

Въвеждаме всички коефициенти на системата в работния прозорец на MATLAB, както е показано в текстовото поле вляво.

За да работим с предавателни функции, трябва да дефинираме **p** като комплексна променлива (показано на текстовото поле отдясно) и въвеждаме последователно предавателните функции (продължението на текстовото поле на следващата страница).

```
p=tf('p')
Transfer function:
p
>> W1=1/Ce/ip/(Tm*p+1)
Transfer function:
    0.01457
-----
    0.1 p + 1
```

```
>> W2=Ko*Ce*ip
W2 =
    0.0755
>> W3= 1/p
Transfer function:
    1
-----
    p
```

```
>>W4=feedback(W1*Ky,W2)
Transfer function:
    16.03
-----
    0.1 p + 2.21
>> W5=series(Eh*W4,W3)
Transfer function:
    16.03
-----
    0.1 p^2 + 2.21 p
```

Системата трябва да се синтезира така, че да осигурява следните качествени показатели:

- пререгулиране: < 20%;
- време на преходния процес: < 0,05 сек.;
- брой на колебанията: <=2.

2. Възможности на програмата MATLAB и нейните приложения LTI Viewer и SISO Design Tool за изобразяване на характеристиките на системите за регулиране

Програмната среда MATLAB разполага с няколко инструмента помагачи при синтеза на системи. Едни от най лесно приложимите за целите на обучението са графичните интерфейси(GUI) за анализ и синтез на системи с един вход и един изход (SISO) озаглавени LTI Viewer и SISO Design Tool

Първият графичен интерфейс се позволява да се видят и настройват преходните характеристики на линейни модели. На монитора се изобразяват след-

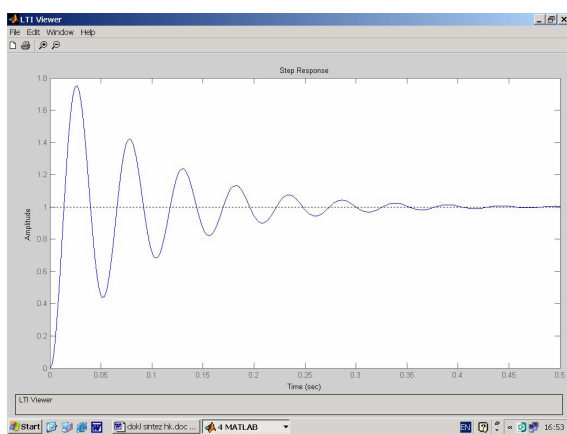
ните графики:

- преходни и тегловни функции (Step and impulse responses);
- логаритмични честотни характеристики (Bode plot);
- амплитудно-фазови характеристики (Nyquist plot);
- характеристики на Никълси др.

Вторият интерфейс позволява да се анализират системи с един вход и един изход и да се синтезират и настройват коригиращи устройства към тях. Двама интерфейса са динамично свързани и промените при синтеза в единия веднага променят характеристиките показвани в другия. Този софтуерен продукт позволява системите за автоматично управление да се синтезират и настройват по няколко начина, които се разглеждат в курса по "Основи на автоматичното управление". Наше мнение е че при един курс за обучение 45-60 часа е подходящо да се използва синтеза на системи за автоматично регулиране по метода, създаден от американския учен Еванс (W. R. Ewans), базиращ се на ходографа на корените [2]. При курсове с по голям брой часове (60 - 120) може да се използва като допълнение и формата на логаритмичните честотни характеристики.

3. Графичен интерфейс LTI Viewer

Стартирането на LTI Viewer се извършва с написването на командата "ltiview" в командния прозорец на MATLAB. Това отваря графичния интерфейс с празен прозорец за преходна функция по подразбиране. Може след командата в скоби да се посочи името на модела например, за нашия случай: ltiview(feedback(W5,1)). Това ни дава преходната функция на затворената система по която могат да се оценят качествените параметри. От тази функция се вижда че системата е силно колебателна и не изпълнява условията за пререгулиране и време на преходния процес.



Фиг. 1. Преходен процес в системата преди синтезиране на коригиращо звено

Кликването с десния бутон върху графичния прозорец на LTI Viewer отваря серия менюта, позволяващи:

- промяна вида на показваната графика;
- за кои от моделите да се показват графики;
- допълнителни характеристики към графиките;
- въвеждане на координатна мрежа;
- нормализиране на графиките за отделните системи така, че всяка да се наблюдава върху целия прозорец ;
- допълнителни настройки на надписите, размерността и др.

Когато е необходимо да се използват различни характеристики върху един екран се отваря прозореца Plot Configurations от менюто Edit. Прозореца може да се разделя на части по различен начин като максималния брой е 6 и се посочва във всяка част коя от характеристиките да се покаже. Например можете да разделите прозореца на три и в първата част да покажете преходната функция (step response), във втората тегловната функция (Impulse response) и в третата логаритмичните честотни характеристики (Bode plot).

4. Графичен интерфейс SISO DESIGN TOOL

Отварянето на втория интерфейс се извършва с командата sisotool, след която в скоби може да се посочи името на модела (за нас това е W5). Ако име на модела не е посочено се зарежда празен интерфейс в който по подразбиране има три прозореца в които се разполагат ходографа на корените, логаритмичната амплитудно-честотна характеристика (ЛАЧХ) и логаритмичната фазо-честотна характеристика (ЛФЧХ). В прозореца на корените разположен от ляво се разполагат полюсите (означени с X) и нулите (означени с O) и траекториите по които се движат при промяна на коефициента на усилване от 0 до безкрайност. В прозорците на логаритмичните честотни характеристики, освен характеристиките се изписват запасите на устойчивост. За да се въведе модел в празен интерфейс се използва Importing Model от падащото меню File. Отваря се диалогов прозорец Import System Data от където можем да изберем същия модел на електромеханичната следяща система W5, поставяме го в полето G на структурата на CAP и натискаме ОК.

Този графичен интерфейс позволява да се конструират регулатори за CAP с един вход и един изход в интерактивен режим. Заедно със синтеза на системата се проследява въздействието на следните елементи:

- промяна на динамиката на системата чрез промяна на разположението на корените;
- добавяне на полюси и нули в коригиращото звено (регулатора);
- построяване на ЛЧХЛЧХ и промяна на формата им;
- добавяне на пасивни интегриращи и диференциращи звена, и сръзвачи филтри;

- настройване на запасите на устойчивост;
- преобразуване на моделите от непрекъснати в дискретни.

Графичният интерфейс LTI Viewer може да се стартира и от прозореца на на SISO Design Tool, като в този случай двата разглеждани интерфейса са димамично свързани и в се наблюдава промяната на преходната функция на затворената система едновременно с промените в интерфейса за синтез.

Графичният интерфейс позволява промяна на структурата на САР, като по подразбиране регулатора (коригиращото устройство) е поставен в правата връзка преди модела за управление. Структурата на САР може да се види в горния десен ъгъл, като блоковете са означени по следния начин:

- G - обект за управление;
- H - датчик за ОБ;
- F - предусилвател на заданието;
- C - регулатор (компенсатор, коригиращо звено).

Стойностите по подразбиране на H, F и C са равни на 1, т.е. регулаторът има усилване 1. Алтернативните структури на САР се избират с кликане върху бутона FS. Чрез неколккратно кликане с този бутон могат да се изредят всичките възможни.

5. Синтез на системи по метода на ходографа на корените

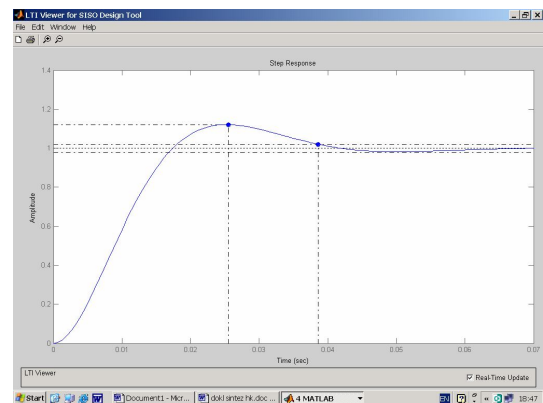
При синтеза ще се използва основната структура на САР в която коригиращото звено е в правата връзка. За да се въведат ограниченията на качествените показатели върху разположението на корените кликаме с десен бутон на мишката в прозореца на ходографа на корените, от появилото се меню избираме design constrains/new и в появилия се прозорец въвеждаме пререгулиране по-малко от 20%. След това по същия начин въвеждаме и времето за регулиране. За да са изпълнени изискванията корените трябва да са разположени наляво от ограничителните линии.

В нашия случай това не е изпълнено. Можем да намалим коефициента на усилване [3], като хващаме и теглим корените (червени квадратчета) към абсисната ос. Това прави системата по-устойчива и на преходната функция (показвана на другия интерфейс) да видим как това се отразява на качествените показатели. При корените на границите определящи пререгулирането то влиза в нормите, но времето за регулиране остава по високо от зададеното. За да следим нормите върху кривата на преходния процес, кликаме с десен бутон върху LTI Viewer и избираме от появилото се меню последователно Characteristics/ Peak response и settling time.

Необходимо е да се изтеглят още по-наляво корените, трябва да се добавят полюси и нули [2],[3]. За целта може да се използва пасивно диференциращо звено. Нулата на звеното трябва да се постави така, че да е близо до левия полюс, а допълнителния полюс възможно най наляво. Така при увеличаване на коефициента на усилване нулевия полюс се движи

наляво и се компенсира с нулата, а левия корен на некоригираната система и допълнителния полюс се движат един към друг след което стават комплексни.

Добавяме за нашата система нула и полюс по указания начин като изтегляме наляво допълнителния полюс докато полюсите преминават наляво от граничните линии. След това променяме коефициента на усилване докато се получат задоволителни качествени показатели които следим от втория интерфейс. Предавателната функция на необходимото коригиращо звено може да се види в прозореца в Current compensator. За разглеждания пример може да бъде $0.196(1+0.047s)/(1+0.0061s)$.



Фиг. 2. Крива на преходния процес при единично въздействие след добавяне на синтезираното коригиращо звено

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ИЗВОДИ

Разглежданата програмна среда е ориентирана към използване на всички основни теоретически постановки за целите на анализа синтеза на системи за автоматично регулиране. Ограниченията в използването на този комплекс от програми в учебни процес се налагат в по-голяма степен от ограниченото количество часове заложили в учебните програми отколкото от възможностите на MATLAB. Използването на програмни продукти в обучението повишава активността на обучаемите. Много от понятията се запомнят интуитивно, като влиянието им се оценява по метода проба-грешка. Тук се явява и мястото на преподавателя да постави точно формулирани задачи с които да обвърже изучените в теорията понятия с изобразяваните на екрана на компютъра. От приложението на описания комплекс от програми в продължение на няколко години се налагат следните изводи:

1. Разгледаният програмнен продукт с неговите проложения позволяват сравнително лесно да се синтезират системи за автоматично регулиране със зададени качествени показатели.

2. При синтезирането на такива системи студентите тренират промяна на различни параметри на системата и запомнят влиянието им върху качествените показатели.

3. Този продукт онаглеждава понятията и използването му позволява да се затвърдят голяма част от знанията, изучавани в дисциплината “Основи на автоматичното управление”, както и да се активизира работата на студентите по усвояване на сложната теория на автоматичното регулиране.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В а с и л е в, Г. Д., Г. П. Стоилов. Ръководство за практически занятия по корабна автоматика. С., ВТС, 1983.
2. F r a n k l i n, G. F. Feedback Control of Dinamic Systems, 1994.
3. Д а н е в, С. Основи на автоматичното управление, 1993.
4. M A T L A B release 13 documentation.

ЕВРОПЕЙСКАТА ПРОГРАМА ЗА ИКОНОМИЯ НА ЕНЕРГИЯ "ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВОТО НА ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛИТЕ (MOTOR CHALLENGE)"

Николай А. Ангелов, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна

THE EUROPEAN ENERGY SAVING PROGRAM „MOTOR CHALLENGE“

Nikolay A. Angelov, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna

Abstract: *In this paper, the most important aspects of the Motor Challenge Program (MCP) promoted by the European Commission are considered. The main objective of the MCP is to help companies improve the energy efficiency of their electric motor driven systems, which have a large technical and economic potential for energy savings. There are given data about motor operation in real driven systems of different companies in this region and energy saving calculation.*

Key words: *energy efficient motors, electric motor driven systems, energy saving.*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

В много корабни и брегови съоръжения се използват помпи, вентилатори, компресори и др., задвижвани с електродвигатели. При това мощността на такива двигатели достига стойности от десетки и стотици киловати. По тази причина е изключително важно те да работят с висок коефициент на полезно действие (к.п.д.), т.е. с минимални загуби на енергия. Има случаи, когато мощността на електродвигателя (ЕД) се избира доста по-голяма от необходимата без да се отчита факта, че ненатовареният двигател работи с по-нисък к.п.д. и следователно споменатите загуби на електрическа енергия са по големи. В други случаи не само ЕД но и останалите елементи на системата имат ниски показатели. Начинът на управление на ЕД в технологичните процеси също е важен фактор, който може да окаже положително влияние върху намаляване консумацията на електроенергия от задвижващите системи.

2. ПРОГРАМАТА "ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВОТО НА ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛИТЕ (MOTOR CHALLENGE)" - ОСНОВНИ ЦЕЛИ И ДЕЙНОСТИ

Направените проучвания от различни организации в ЕС [1] показват, че системите за електрозадвижване консумират 65% от електроенергията в промишлеността на ЕС. Въвеждането на енергоефективни електродвигатели (ЕЕЕД) може да спести на Европа над 200 милиарда киловатчаса годишно, което чувствително ще намали нуждата от електроенергия и ще доведе значителна икономия на капитали и ресурси, а именно:

- икономия на 5-10 милиарда евро експлоатационни разходи;
- икономия на 6 милиарда евро годишно разходи за екология;
- намаляване с почти 100 милиона тона емисиите на въглероден двуокис;
- намаляване с 45 гигавата нуждите от нови енергийни мощности в следващите 20 години;
- намаляване с 6% вноса на енергоносители в ЕС.

Екологичните ползи. С подписването на протокола от Киото ЕС се задължава да намали емисиите на парникови газове за периода от 2008 до 2012 г. с 8% в сравнение с 1998 г., т.е. с 336 милиона тона въглероден еквивалент. Неотдавна ЕС си постави нова амбициозна задача да увеличи дела електроенергията произвеждана от възобновяеми енергийни източници (ВЕИ) до 20% до 2020 г. Това не може да бъде постигнато без сериозни усилия във всички области на икономиката, включително производството и използването на електроенергията.

Съществуват четири начина за намаляване на емисиите, свързани с електрическата енергия:

- увеличаване използването на възобновяеми енергийни източници (ВЕИ);
- увеличаване използването на атомната енергия;
- когенерация и повишаване к.п.д. на електростанциите;
- икономия на електроенергия.

От изредените начини най-голям потенциал и най-ниска цена има последната мярка.

Ползите от повишаване ефективността на електрозадвижването може да се постигнат с икономически мерки и технически такива.

Първият вид е свързан с цените на енергоносителите и сроковете на възвращаемост и по приблизителни оценки може да осигури 29% от общите икономии.

Вторият тип мерки има значително по-висок потенциал и е свързан с к.п.д. на ЕД.

За да се постигнат желаните резултати, ЕС приема следните действия:

- **Информация за електродвигателите:** в Интернет от 1998 г. съществува база данни за произвежданите в Европейския Съюз енергоефективни ЕД и съответният софтуер за избор или замяна на съществуващ стандартен ЕД (**EuroDEEM**), което да подпомогне потребителите на задвижващи системи.

- **Класификация:** през 1999 г. бе постигнато съглашение между *Европейския комитет на производителите на електрически машини и*

силова електроника (СЕМЕР) и Европейската комисия относно класификационна схема за трифазните асинхронни двигатели за ниско напрежение с мощност от 1,1 до 90 kW, дву- и четириполусни, и намаляването на ЕД от клас EFF 3 с 50%. Според тази схема двигателите на СЕМЕР и някои други производители имат на табелката знак: EFF 1, EFF 2 или EFF 3. Как се разграничават посочените групи може да се види от табл. 1:

Таблица 1

kW	EFF 3 2p = 2;4 η _n , %	EFF 2 2p = 2;4 η _n , %	EFF 1 2p = 2 η _n , %	EFF 1 2p = 4 η _n , %
1,1	< 76,2	≥ 76,2	≥ 82,2	≥ 83,8
1,5	< 78,5	≥ 78,5	≥ 84,1	≥ 85,0
2,2	< 81,0	≥ 81,0	≥ 85,6	≥ 86,4
3	< 82,6	≥ 82,6	≥ 86,7	≥ 87,4
4	< 84,2	≥ 84,2	≥ 87,6	≥ 88,3
5,5	< 85,7	≥ 85,7	≥ 88,6	≥ 89,3
7,5	< 87,0	≥ 87,0	≥ 89,5	≥ 90,1
11	< 88,4	≥ 88,4	≥ 90,5	≥ 91,0
15	< 89,4	≥ 89,4	≥ 91,3	≥ 91,8
18,5	< 90,0	≥ 90,0	≥ 91,8	≥ 92,2
22	< 90,5	≥ 90,5	≥ 92,2	≥ 92,6
30	< 91,4	≥ 91,4	≥ 92,9	≥ 93,2
37	< 92,0	≥ 92,0	≥ 93,3	≥ 93,6
45	< 92,5	≥ 92,5	≥ 93,7	≥ 93,9
55	< 93,0	≥ 93,0	≥ 94,0	≥ 94,2
75	< 93,6	≥ 93,6	≥ 94,6	≥ 94,7
90	< 93,9	≥ 93,9	≥ 95,0	≥ 95,0

• **Стандарти/съглашения:** доброволно съглашение между производителите на ЕД за постепенно свиване на производството на ЕД с ниско к.п.д., което действа от 1999 г.

• **Програмата “Предизвикателството на ЕД”**, която стартира 2003 г. Основната цел на програмата е да намали консумацията на електрическа енергия от системите с електрозадвижване или задвижващите системи. Заедно с това да се повиши надеждността, да се подобри качеството на обслужването им и да се намали цената. Участието в програмата е доброволно.

Участниците в програмата могат да бъдат:

Партньори – компаниите, които използват задвижващи системи.

Поръчители – организации, които са в контакт с потребителите: производители, конструктори, обслужващи организации, ЕСКО-фирми и др.

Партньорът съставя и изпълнява план за действие, с цел подобряване енергийната ефективност на своите задвижващи системи. Планът е доброволен, а задачите и тяхното изпълнение се формулират и отчитат съгласно разработените в програмата правила. Отговорностите на Партньора се състоят в изпълнение и

отчитане на дейностите в плана. В него се посочват отговорните лица за прилагане на набелязаните мерки, за изготвяне на отчетите пред вишестоящото ръководство и пред Европейската комисия.

Ползите за Партньорите се състоят в следното:

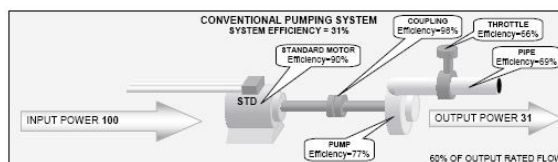
- повишаване на надеждността и качеството на продукцията;
- намаляване на разходите;
- придобиване на публично признание и имидж, които включват използване на логото на програмата и публичност на усилията за икономия на енергия, демонстрации на реализирана система, награди, включване в каталози.

Техническа помощ за Партньорите:

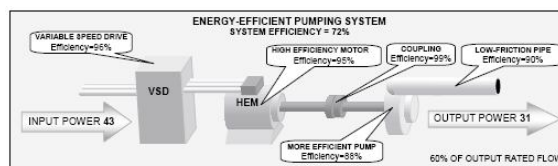
- може да бъде получена от националните енергийни агенции;
- може да се ползва софтуера EuroDEEM и ProMot за избор на двигатели;
- документация;
- подкрепа за технически и финансови решения;
- списък на Поръчителите и ЕСКО-фирмите.

3. АНАЛИЗ НА К.П.Д. НА ЗАДВИЖВАЩА СИСТЕМА

Преди да се предприемат определени действия за подобряване на енергийната ефективност на една задвижваща система, нека разгледаме елементите на такава система, техните к.п.д. и възможностите за подобряване к.п.д. на отделните елементи и на системата като цяло (фиг. 1)



Фиг. 1. Стандартна помпена система



Фиг. 2. Енергоефективна помпена система

Както се вижда от фиг. 1, к.п.д. на системата представлява произведение от к.п.д. на отделните елементи: стандартен ЕД, съединител, свързващ вала на двигателя с вала на помпата, помпа, дроселиращ вентил и тръбна система, към която се подава флуида, т.е.

$$\text{к.п.д.} = 0,9 \times 0,98 \times 0,77 \times 0,66 \times 0,69 = 0,31$$

или: 31%.

Най-важните фактори, от които зависи к.п.д. на системата, са:

- к.п.д. на ЕД,
- управление на честотата на въртене,

- точното оразмеряване,
- качеството на електрозахранването,
- загубите от разпределение,
- механичните предавки,
- начините за поддръжка,
- к.п.д. на крайния потребител (помпа, вентилатор, компресор и др.).

В общия случай мерките се свеждат до подобряване на показателите, отнасящи се до изредените фактори.

На фиг. 2 е показано същото задвижване, но с подобрени показатели – въведен е честотен регулатор, което позволява по-добро използване на помпата, ЕД има по-висок к.п.д. а тръбната система по-малко съпротивление. Това води до по-малка консумирана мощност от мрежата, при същата изходна мощност, и съответно по висок к.п.д. на системата. Ако изходната мощност остане 31 единици то за входната ще се получи:

$$\begin{aligned} \text{входна мощност} &= \text{изходна мощност} / \\ 0,9 \times 0,88 \times 0,99 \times 0,95 \times 0,96 &= \\ = 31 / 0,715 &= 43 \text{ ед,} \end{aligned}$$

при което к.п.д. на системата ще бъде

$$\text{к.п.д.} = 31 / 43 = 0,721 \text{ или } 72\%.$$

Това илюстрира възможността за значителна икономия на енергия чрез усъвършенстване на подобна помпена система.

4. ОТНОСНО ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА РЕАЛИЗАЦИЯ НА ЦЕЛИТЕ НА ПРОГРАМАТА

Програмата “Предизвикателството на електродвигателите (Motor challenge)” отразява действията на ЕС през последното десетилетие и донякъде следва аналогична програма на САЩ. В много случаи това е един естествен процес на усъвършенстване на задвижващите системи в стремежа да се направят те по-ефективни. Замърсяването на околната среда и парниковият ефект неизбежно оказват силен натиск върху този процес и той придобива в известна степен и политически характер.

Независимо от тези фактори най-важно значение има икономическата изгода от подобно усъвършенстване. По тази причина тук ще разгледаме някои основни моменти при оценката на инвестициите за постигане на желаните резултати.

При изследването на задвижващите системи важна задача представлява определянето на относителното натоварване на електродвигателя в системата, особено в случаите, когато това натоварване не е постоянно. Тази оценка може да се направи като се определи изходната мощност в работен режим P_2 се изчисли отношението $P_2 / P_{2\text{ном}}$, където $P_{2\text{ном}}$ е номинална мощност на ЕД.

В много случаи, особено в производствени условия, P_2 трудно може да се измери, затова се пред-

почитат приблизителни методи, които се свеждат до определяне на отношението на консумираната мощност в работен режим спрямо същата в номинален: $P_1 / P_{1\text{ном}}$, или се определя отношението на работния ток към номиналния: $I_1 / I_{1\text{ном}}$, или отношението на хлъзгането в работен към това в номинален режим: $s / s_{\text{ном}}$, посредством измерване на честотата на въртене n на ротора [3]. За предпочитане е първият метод поради това, че другите два имат по-малка точност. По такъв начин, при известни стойности на параметрите от табелката на ЕД и измерените на място P_1 , I_1 , напрежение U , коефициент на мощност $\cos \varphi$ и n , може да се изчисли относителното натоварване OH .

В зависимост от данните, с които разполагаме, за изчисляване на OH може да се използва един от изброените начини:

1) Чрез отношението на действителната консумирана мощност към тази в номинален режим:

$$OH(\%) = (P_1 / P_{1\text{ном}}) \cdot 100\% ,$$

където:

$$P_1 = \sqrt{3} U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cdot \cos \varphi / 1000, \text{ kW} ,$$

$$P_{1\text{ном}} = P_{2\text{ном}} / \eta_{\text{ном}}, \text{ kW} ,$$

където $U_{\text{л}}$ и $I_{\text{л}}$ са линейните напрежения и ток на трифазната система.

Ако $U_{\text{л}}$ и $I_{\text{л}}$ за различните фази са различни, се взема средната им стойност.

2) Чрез отношението на действителния и номиналния ток. При натоварване на двигателя в границите $(0,5 - 1,0)P_{2\text{ном}}$ може да се счита, че натоварването е право пропорционално на тока. В случай, че напрежението не е равно на номиналното, се извършва и корекция по напрежение:

$$OH(\%) = (I_{\text{л}} / I_{\text{лном}}) \cdot (U_{\text{л}} / U_{\text{лном}}) \cdot 100\% .$$

3) Чрез отношението на действителното хлъзгане към номиналното. Зависимостта на хлъзгането на асинхронния двигател s от натоварването е почти линейна, следователно

$$OH(\%) = (s / s_{\text{ном}}) \cdot 100\%$$

или

$$OH(\%) = (n_{\text{син}} - n) / (n_{\text{син}} - n_{\text{ном}}) \cdot 100\% ,$$

където $n_{\text{син}}$ е синхронна скорост на въртене в об/мин; n - действителна скорост на въртене в об/мин; $n_{\text{ном}}$ - номинална скорост на въртене в об/мин.

Поради това, че малката относителна грешка при измерването на n може да стане голяма при определяне на разликата $(n_{\text{син}} - n)$, грешката при този ме-

тод може да достигне 20%. Освен това, вследствие зависимостта на въртящия момент от квадрата на захранващото напрежение, би следвало да се въведе корекция и за този фактор. С нея формулата има вида

$$OH(\%) = s / \left[s_{ном} (U_{л ном} / U_{л})^2 \right] \cdot 100\% .$$

Освен дадените тук начини за определяне на OH , съществуват и други, аналитични методи и компютърни програми, но тяхното използване зависи от поставената задача.

От измерените данни може да се определи и к.п.д., с който работи ЕД:

$$h(\%) = P_{2ном} OH(\%) / P_1 .$$

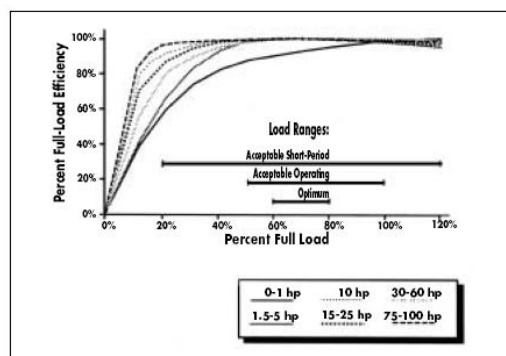
Измервания за определяне на относителното натоварване и к.п.д. на двигатели, задвижващи помпи и вентилатори, бяха направени в няколко предприятия във Варна, Русе и Разград. Бяха обследвани около 30 ЕД с мощност от 1,1 до 90 kW. В табл. 2 са дадени част от резултатите от измерванията на 19 ЕД, при натоварване, с каквото са работили в момента на измерването:

Таблица 2

№	$P_{2ном}$, kW	OH , %	P_1 , kW	η , %	Забележка
1.	55	51,5	31,4	90	ВВМУ
2.	22	63,5	15,6	89,5	-
3.	2,2	55,6	1,5	81,5	-
4.	2,2	51,8	1,4	81,4	-
5.	1,5	71,8	1,4	77	-
6.	45	39,2	19,2	92	Приста-Ойл
7.	11	87,8	11,1	87	-
8.	7,5	86,3	7,4	87	-
9.	7,5	61,5	5,3	87	-
10.	90	66	69	86	Топл.-Разград
11.	90	70,7	74	86	-
12.	45	38,7	20	87	-
13.	45	31,7	17	84	-
14.	45	36,7	19	87	-
15.	5,5	33,4	2,2	83,5	-
16.	0,75	52,2	0,45	87	-
17.	18,5	65,2	13,7	85	Спарки-Русе
18.	10	70,9	8,5	83,4	-
19.	1,5	50	1	75	-

Повечето ЕД са конструирани да работят с натоварване от 50 до 100% от номиналното. Максималният к.п.д. обикновено е при 75% от номиналното натоварване. Както може да се види от фиг. 4 [3], той започва да намалява, когато натоварването спадне под 50% и това намаляване при по-малките мощности е по-значително (кривите са дадени за мощности, изразени в конски сили (hp), като 1 hp = 0,746 kW). При това

положение за кратко време е приемливо ЕД да работи с натоварване от 20 до 120%; при продължително натоварване с 50 до 100%, а за оптимален се счита интервалът от 60 до 80% натоварване спрямо номиналното.



Фиг. 3. Зависимост на к.п.д. от натоварването за ЕД с мощности в диапазона 0 ÷ 0,75 kW; 1,1 ÷ 4 kW; 11 ÷ 18,5 kW, 22,5 ÷ 45 kW; 55 ÷ 75 kW

Направеното подробно сравнение с данните от Справочника [4] и тези за европейските двигатели EEF1, EEF2, EEF3 (съгласно EN 60034-2), показва, че почти всички изследвани двигатели съответстват на групата EEF3, т.е. на стандартните двигатели. Затова тези, които експлоатират системи от разглеждания тип би трябвало да проучат възможностите за замяна на стандартните двигатели с високоефективни.

Годишната икономия на енергия при такава замяна, в зависимост от поставената цел и финансовите възможности, може да се определи по един от начините, дадени в [2]:

$$\text{Годишна икономия (kWh)} = (\text{работни часове}) \times (P_{2ном}, kW) \times (OH) \times (1/h_{EEF3} - 1/h_{EEF1}).$$

Пример. Ако вместо стандартен двигател с мощност 45 kW и к.п.д. 87 %, при 4 000 работни часа годишно и $OH = 70\%$ се избере такъв от групата EEF1 с к.п.д. $\geq 93,9\%$ (четириполюсен двигател), се получава:

$$\text{Годишна икономия (kWh)} = (4\ 000) \times (45\ kW) \times (0,7) \times (1/0,87 - 1/0,939) = 10\ 642,3\ kWh .$$

За да се получи годишната икономия в лв., трябва този резултат да се умножи на цената на електроенергията. При отчитане с една скала цената е 0,144 лв./kWh, следователно стойността на икономисаната енергия ще бъде:

$$10\ 642,3\ kWh \times 0,144\ лв./kWh = 1\ 532,49\ лв.$$

Ако приемем, че цената на нов двигател е 3 860 лв., то срокът на възвращаемост на инвестираните средства е

$$3\ 860 / 1\ 532,49 = 2,52\ години.$$

Ако за една нова система вместо стандартен ЕД със стойност 3 150 лв. се вземе енергоефективен ЕД, ще трябва да се доплатят 710 лв., но тези средства ще се възстановят само за

$$710/1\,532,49 = 0,46 \text{ години,}$$

т.е. за по-малко от половин година.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На практика, обследването на една задвижваща система и вземането на решение за инвестиции в енергоспестяващи мерки е сложен процес, в който участват специалисти на различни нива и в този смисъл включването в програмата “Предизвикателството на електро-двигателите (Motor challenge)” представлява възможност, която позволява да се решат ред задачи на високо

технологично и организационно равнище с полза както за Партньорите, участници в програмата, така и за обществото.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. С п р а в о ч н и к “Асинхронные двигатели серии 4А”. М., Энергоиздат, 1982.

2. D e K e u l e n a e r, Hans, Ronnie Belmans, Edgar Blaustein, David Chapman, Anibal De Almeida, Bruno De Wachter, Peter Radgen. Energy Efficient Driven Systems, April 2004, <http://energyefficiency.jrc.cec.eu.int>

3. N a d e l Steven, R. Neal Elliot, Michael Shepard, Steve Greenberg, Gail Katz, Anibal T. de Almeida. Energy Efficient Motor Systems, A Handbook on Technology, Program and Policy Opportunities, Second Edition, ACE³, 2002.

4. D e t e r m i n i n g Electrical Motor Load and Efficiency, Program of the U.S. Department of Energy, www.motor.doe.gov

ИЗСЛЕДВАНЕ НА НАГРЯВАНЕТО И ДОПУСТИМОТО НАТОВАРВАНЕ НА АСИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ ПРИ ЧЕСТОТНО УПРАВЛЕНИЕ

Бохос Р. Апрахамян, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна
 Мелине О. Апрахамян, Технически университет, Варна
 Любомир Й. Дънков, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна

INVESTIGATION OF THE HEATING AND THE ADMISSIBLE LOAD OF VARIABLE FREQUENCY DRIVES

Bohos R. Arahamian, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna
 Meline O. Arahamian, Technical University, Varna
 Lyubomir J. Dankov, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna

Abstract: In this paper we investigate the means to provide optimal working conditions of 3-phase induction motors in variable frequency drives without exceeding the insulation permissible temperature.

Key words: 3-phase induction motor, heating, frequency control, variable frequency drive.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Регулирането на скоростта на асинхронните двигатели чрез изменение на честотата на захранващото напрежение е най-разпространеният и най-икономичният метод за регулиране на скоростта на асинхронните електрозадвижвания.

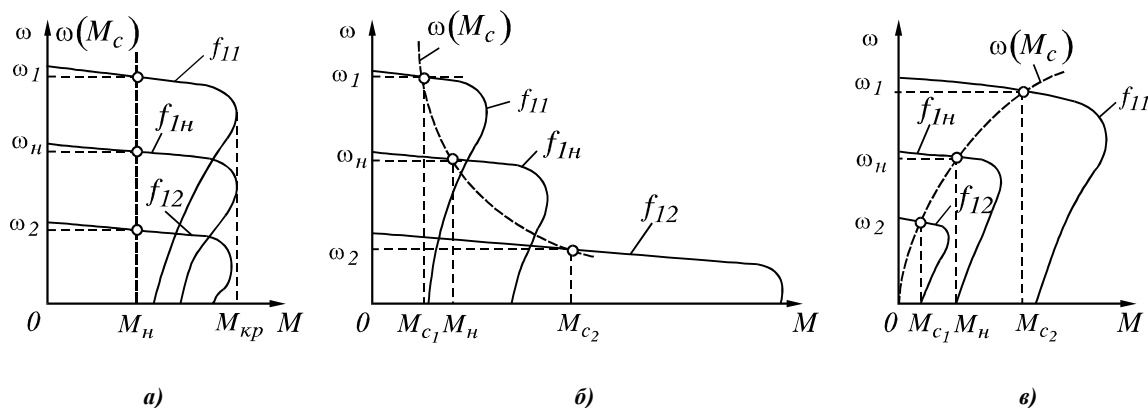
Синхронната скорост на асинхронните електродвигатели ω_c зависи от честотата на захранващото напрежение f_1 . При регулиране на честотата възниква необходимост и от регулиране на захранващото напрежение U . Критичният момент $M_{кр}$ може да се запази постоянен при изменение на честотата f_1 , само ако едновременно се изменя и напрежението U , така че $U/f_1 = const$. Законът на изменение на напрежението U при регулиране на честотата зависи от характера на натоварването на двигателя [4].

Тъй като критичното хлъзгане на двигателя $s_{кр}$

е обратнопропорционално на честотата f_1 , при регулиране на скоростта под основната (при честота f_{12}) твърдостта на механичните характеристики нараства. При регулиране на скоростта над основната поради механични ограничения честотата f_{11} обикновено не надвишава 2-2,5 пъти номиналната честота $f_{1н}$.

На фиг. 1 са показани механични характеристики на асинхронен двигател с накъсо съединен ротор при честотно регулиране при различно статично натоварване. При съпротивителен момент $M_c = const$ отношението $U/f_1 = const$ - фиг. 1а. При статична мощност $P_c = M_c \omega = const$ отношението $U/\sqrt{f_1} = const$ - фиг. 1б. При вентилаторна характеристика на съпротивителния момент отношението $U/f_1^2 = const$ - фиг. 1в.

Публикацията разглежда две противоречиви топ-



Фиг. 1. Механични характеристики на асинхронен двигател с накъсо съединен ротор при честотно управление:

а) $M_c = const, U/f_1 = const$; б) $P_c = M_c \cdot \omega = const, U/\sqrt{f_1} = const$; в) вентилаторна характеристика на съпротивителния момент, $U/f_1^2 = const$

линни явления, наблюдавани при честотното управление на асинхронни двигатели. От една страна при най-разпространените самовентилиращи се двигатели при намаляване на скоростта се намалява и топлоотдаването на машината, поради което, за да не се надвиши допустимата температура на изолацията трябва да се намали натоварването на двигателя. От друга страна при скорости под основната при номинален момент на двигателя се намаляват загубите в стоманата на машината, което позволява намаляването на натоварването да се ограничи.

2. УРАВНЕНИЕ НА ТОПЛИНИЯ БАЛАНС ПРИ ЧЕСТОТНО УПРАВЛЕНИЕ НА АСИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ

Известно е, че лимитиращата нагряването част на асинхронните двигатели с накъсо съединен ротор е изолацията на статорната намотка [1]. Средното установено прегряване на намотката на статора може да бъде определено по метода на еквивалентните загуби [2]. Съгласно този метод уравнението на топлиния баланс е следното:

$$(1) \quad \theta_{уст} \cdot A(\alpha) = \Delta p_{el1} + \kappa_p(\alpha) \cdot \Delta p_{el2} + \kappa_{cm}(\alpha) \cdot \Delta p_{cm} + \kappa_{mex} \cdot \Delta p_{mex} \quad ,$$

където $\theta_{уст}$ е установеното прегряване на двигателя, $A(\alpha)$ - топлоотдаването на двигателя, зависещо от ъгловата скорост, $\alpha = \frac{f}{f_{1n}}$ - относителна промяна на честотата на захранващото напрежение спрямо номиналната честота, Δp_{el1} - електрическите загуби в статорната намотка, Δp_{el2} - електрическите загуби в роторната намотка, Δp_{cm} - загуби в стоманата на двигателя, Δp_{mex} - механични загуби, коефициентите $\kappa_p(\alpha)$, $\kappa_{cm}(\alpha)$, κ_{mex} - коефициенти, отчитащи съответно влиянието на електрическите загуби в ротора, на загубите в стоманата и на механичните загуби върху нагряването на статорната намотка. Коефициентите $\kappa_p(\alpha)$ и $\kappa_{cm}(\alpha)$ зависят от ъгловата скорост, респективно от честотата на захранващото напрежение, защото ъгловата скорост $\omega = \frac{2\pi f}{p}$, където p са чифтовете полюси на машината.

Механичните загуби Δp_{mex} оказват слабо влияние върху повишението на температурата на статорната намотка [2] и могат да бъдат пренебрегнати, Тогава уравнение (1) може да бъде записано във вида:

$$(2) \quad \theta_{уст} \cdot A(\alpha) = \Delta p_{ном} \left[i^2 \cdot \rho_{el}(\alpha) + \varphi^2 \cdot \sigma_{cm} + a_{\mu} \cdot i_{\mu}^2 \right],$$

където $\rho_{el}(\alpha) = a_{el1} \cdot a_{el2} \cdot \kappa_p(\alpha)$ е коефициент на променливите загуби, $\sigma_{cm}(\alpha) = a_{cm} \cdot \kappa_{cm}(\alpha)$ - коефициент на загубите в стоманата, $\varphi = \frac{\Phi}{\Phi_n}$ - относителен магнитен поток на двигателя спрямо номиналния, i_{μ} - намагнитващ ток на машината, определящ загубите от хистерезис и токове на Фуко в машината, a_{el1} , a_{el2} , a_{cm} , a_{μ} - коефициенти, постоянни за дадена машина и характеризиращи относителния дял на различните видове загуби в номиналните загуби на двигателя $\Delta n_{ном}$.

Коефициентите $\kappa_p(\alpha)$ и $\kappa_{cm}(\alpha)$ се определят с изразите

$$\kappa_p(\alpha) = 1 - \frac{(1 - k_{pn}) \alpha^{0,6}}{k_{pn} + (1 - k_{pn}) \alpha^{0,6}} \quad ,$$

$$\kappa_{cm}(\alpha) = 1 - \frac{k_{cmn}}{k_{cmn} + (1 - k_{cmn}) \alpha^{0,6}} \quad ,$$

където k_{pn} и k_{cmn} са стойностите на коефициентите при номинална скорост на двигателя. Обикновено те са в границите $k_{pn} = 0,35 - 0,8$ и $k_{cmn} = 0,6 - 0,92$, като по-ниските значения съответстват на по-бързоходните двигатели (с по-малък брой полюси).

За номинален режим уравнението (2) приема вида:

$$(3) \quad \theta_{уст ном} \cdot A_{ном} = \sum \Delta p_i = \Delta p_{ном} \cdot h \quad ,$$

където h е относителната стойност на загубите в машината спрямо номиналните загуби:

$$h = \frac{\sum \Delta p_i}{\Delta p_{ном}} \quad .$$

Като се разделят почленно (2) и (3) се получава уравнение на топлиния баланс при честотно управление:

$$(4) \quad h \cdot \chi(\alpha) \cdot \frac{\theta_{уст}}{\theta_{уст ном}} = i^2 \cdot \rho_{el}(\alpha) + \varphi^2 \cdot \sigma_{cm}(\alpha) + a_{\mu} \cdot i_{\mu}^2 \quad ,$$

където $\chi(\alpha) = \frac{A(\alpha)}{A_{ном}}$ е коефициент на относително изменение на топлоотдаването при промяна на ско-

ростта (честотата).

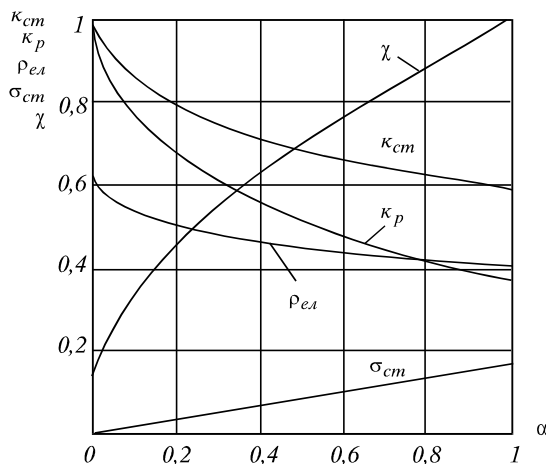
На практика обикновено коефициентът h е в границите $0,6 - 0,8$, като по-ниските стойности съответстват на бързоходни двигатели с голяма мощност, а по-високите - на бавноходни двигатели с малка мощност.

Зависимостта на коефициента $\chi(\alpha)$ от скоростта (честотата) на двигателя се определя с формулата

$$\chi(\alpha) = \chi_0 + (1 - \chi_0)\alpha^{0,6},$$

където χ_0 е коефициент на промяна на топлоотдаването при неподвижен двигател. Обикновено χ_0 е в границите $0,15 - 0,55$ [3].

Зависимостите на коефициентите $\rho_{ел}$, $\sigma_{см}$, k_p , $k_{см}$ и χ от относителния коефициент на честотата α за двигател с номинална мощност $P_H = 100 \text{ kW}$ и номинална синхронна честота на въртене $n_{сн} = 3000 \text{ min}^{-1}$ са представени на фиг. 2.



Фиг. 2. Зависимости на топлинните коефициенти от честотата за двигател с $P_H = 100 \text{ kW}$ и $n_{сн} = 3000 \text{ min}^{-1}$

От фиг. 2 се вижда, че коефициентът на загубите в стоманата $\sigma_{см}(\alpha)$ намалява с намаляване на честотата практически линейно, но коефициентът на относителния дял на загубите в стоманата върху нагряването на статорната намотка $k_{см}(\alpha)$ интензивно нараства с намаляване на честотата. В електротехническите стомани преобладават загубите от хистерезис. В нисколегираните стомани относителният дял на загубите от вихрови токове е по-висок и коефициентът $\sigma_{см}(\alpha)$ намалява по-бързо. Обратно, коефициентът на загубите в медта $\rho_{ел}(\alpha)$ нараства при намаляване на честотата заедно с коефициента $k_p(\alpha)$, което е

неблагоприятно за нагряването на машината и снижава положителния ефект от намаляването на коефициента i а $\sigma_{см}(\alpha)$.

Затова определящо влияние върху големината на максималния момент на двигателя, допустим от топлинна гледна точка, оказва коефициентът на топлоотдаване $\chi(\alpha)$.

3. МАКСИМАЛЕН МОМЕНТ НА ДВИГАТЕЛЯ, ДОПУСТИМ ОТ ТОПЛИННА ГЛЕДНА ТОЧКА, ПРИ ЧЕСТОТНО УПРАВЛЕНИЕ

Относителното значение на максимално допустимия ток на двигателя при честотно управление може да се получи като се реши спрямо тока уравнение (4):

$$(5) \quad i_{max}^2 = \frac{h \cdot \chi(\alpha) - \varphi^2 \cdot \sigma_{см}(\alpha) - a_{\mu} \cdot i_{\mu}^2}{\rho_{ел}(\alpha)}$$

Най-често натоварването на асинхронните двигатели се колебае в границите $M_c = (0,5 - 1,0)M_H$, където M_H е номиналният момент на двигателя:

$$M_H = c_M \cdot I_{2H}^2 \cdot \Phi_H \cdot \cos \varphi_{2H}, [1].$$

Моментът на двигателя в относителни единици при честота, различна от номиналната е:

$$\mu = \frac{M(\alpha)}{M_H} = i \cdot \frac{\cos \varphi_2(\alpha)}{\cos \varphi_{2H}}$$

При честотно управление хлъзгането на двигателя се променя слабо, а оттам и факторът на мощността се променя слабо. Затова се приема, че

$$\frac{\cos \varphi_2(\alpha)}{\cos \varphi_{2H}} \approx 1$$

или

$$(6) \quad \mu = i \cdot \varphi$$

Като се замести (6) в (5), се получава:

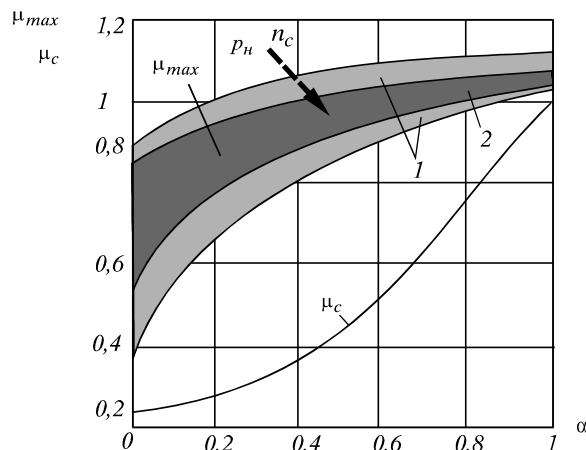
$$(7) \quad \mu_{max} = \varphi \cdot \sqrt{\frac{h \cdot \chi(\alpha) - \varphi^2 \cdot \sigma_{см}(\alpha) - a_{\mu} \cdot i_{\mu}^2}{\rho_{ел}(\alpha)}}$$

Формула (7) показва зависимостта на максималния момент на двигателя, допустим от топлинна гледна точка, от честотата и магнитния поток. В този си вид тя е валидна само при постоянен магнитен поток, т.е. при $\varphi = const$. При променлив магнитен поток уравнение (7) се усложнява и може да се реши аналитично само при линеен закон на промяна на потока [2].

От уравнение (7) може да се направи извода, че допустимият относителен момент μ_{max} при намаляване на честотата се понижава в по-малка степен, отколкото топлоотдаването на двигателя ако коефициентът на загубите в стоманата $\sigma_{см}(\alpha)$ намалява

по-бързо от коефициента на промяна на топлоотдаването $\chi(\alpha)$. Това е валидно за всички видове честотно управляеми асинхронни двигатели.

На фиг. 3 са представени приблизителните граници на максималния момент на двигателя, допустим от топлинна гледна точка, при честотно управление на двигатели от две серии – 4А и 4АО. На фигурата със стрелка е показана посоката на нарастване на номиналната мощност P_n и на синхронната скорост n_c на машината. С μ_c е означена характеристиката на относителното статично натоварване. Прието е, че съпротивителният момент е от вентилаторен тип.



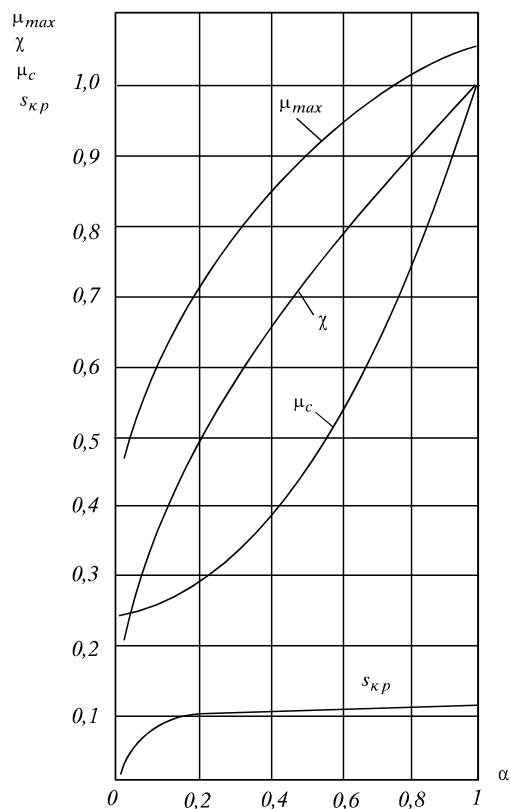
Фиг. 3. Ориентировъчни граници на максималния момент на двигателя, допустим от топлинна гледна точка, при честотно управление с постоянен магнитен поток $\Phi = const$; зона 1 се отнася за асинхронни двигатели от серия 4А, а зона 2 - за асинхронни двигатели от серия 4АО

4. ОБОБЩЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самовентилиращите се асинхронни двигатели са най-разпространените асинхронни машини. Целесъобразно е те да се използват при статично натоварване с характеристика от вентилаторен тип [5]. Характерът на изменението на момента в зависимост от скоростта при вентилаторен тип натоварване на двигателя съответства на тенденцията на промяна на топлоотдаването. Даже моментът по вентилаторната характеристика намалява по-бързо, отколкото намаляват топлоотдаването и максималният момент, допустим от топлинна гледна точка - фиг. 4. Експериментално е установено [2], че за всички самовентилиращи се асинхронни двигатели с номинална мощност от 0,6 kW до 100 kW при всяка честота на захранващото напрежение статичният вентилаторен момент е по-малък от максимално допустимия момент на двигателя от топлинна гледна точка.

Следователно при вентилаторен тип натоварване могат да се използват самовентилиращи се двигатели без повишаване на необходимата мощност при всеки

диапазон на честотно регулиране на ъгловата скорост на машината. При това удовлетворителни механични характеристики, съответстващи на вентилаторния тип натоварване се постигат и при най-простия закон на честотно управление $U/f_1 = const$. Честотното управление на самовентилиращи се асинхронни двигатели е най-рационално при електрозадвигвания, имащи вентилаторен тип натоварване.



Фиг. 4. Зависимости на максималния момент, допустим от топлинна гледна точка μ_{max} ; относителният коефициент на топлоотдаване $\chi(\alpha)$ и критичното хлъзгане s_{kp} от относителната честота $\alpha = \frac{f}{f_{1n}}$ при номинална мощност $P_n = 100 kW$ и номинална синхронна скорост $n_{сн} = 3000 min^{-1}$; с μ_c е означена характеристиката на относителното статично натоварване от вентилаторен тип

ЛИТЕРАТУРА

1. В о л д е к, А. Електрически машини. М., "Енергия", 1978.
2. С а н д л е р, А., Р. Сарбатов. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М., "Енергия", 1974.
3. К о п ы л о в, И. Проектирование электрических машин. М., "Высшая школа", 2002.
4. Й о р д а н о в, Д. Основи на електрозадвигването. С., "Техника", 1978.
5. К о п ы л о в, И. Електрически машини. М., "Энергоатомиздат", 1986.

МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ДИЗЕЛГЕНЕРАТОРНА ЧАСТ НА ИНТЕГРИРАНА КОРАБНА ЕЛЕКТРОСТАНЦИЯ

Георги П. Стоилов, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна
Момчил Г. Манов, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна

MATHEMATICAL MODELLING OF DIESEL - ELECTRIC POWER GENERATION PART OF SHIP INTEGRATED ELECTRIC POWER STATION

Georgi P. Stoilov, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna
Momchil G. Manov, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna

Abstract: This article presents a mathematical model of diesel - electric power generation part as unit of ship integrated electrical power system. The model is written in a state - space form suitable for the purpose of simulation and control design. The load is specified with an aggregated active and reactive power load demand.

Key words: mathematical modelling, power generation part, ship integrated electric power station.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Електропропусивните системи намират все по-широко приложение на съвременните кораби. Те са особено актуални за кораби, чиято специфика предполага работа в различни скоростни режими и висока маневреност.

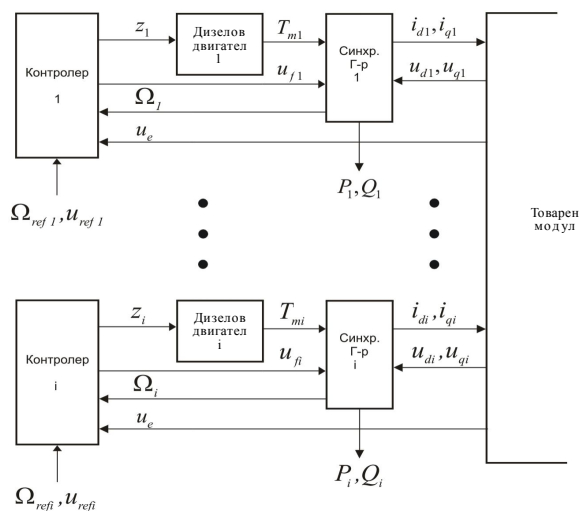
Основната идея в използването на такива системи е да се заменят главните корабни дизелови двигатели с електродвигатели и да се разпредели производството на консумираната електроенергия в няколко дизел-генератора.

Електрическите двигатели се характеризират със много висока ефективност по отношение на скоростните характеристики и изходната мощност в целия им работен диапазон, докато при дизеловите двигатели тя се концентрира само в една малка област около номиналната им работна точка. Това определя необходимостта от използването на интегрирана корабна електроенергетична система /ИКЕС/ на кораби, които плават при честа смяна на скоростния режим. При използване на традиционна пропусивна система с дизелови двигатели ефективността ще се понижи значително при работа извън номиналната им област.

Като основен мотив за моделирането на дизел-генераторната част в състава на ИКЕС можем да определим използването на модела в симулации за представяне режимите и стабилността на работа на електростанцията и нейните елементи, както и подобряване ефективността на работа на системата за енергийно управление по отношение понижаване разхода на гориво и повишаване безопасността. Това налага при моделирането да се използват алгоритми за намиране на оптималния брой дизелгенератори, които да разпределят товара по между си и използването на нелинеен математичен модел в компактна векторна форма в пространството на състоянията.

2. СТРУКТУРА НА МАТЕМАТИЧЕН МОДЕЛ

Дизелгенераторната част от състава на ИКЕС се състои от среднооборотни дизелови двигатели, синхронни генератори, регулатори на оборотите и напрежението /обикновено контролери от ПИД тип/ и товарен модул. Тя представя взаимната връзка между генераторите, скоростния регулатор и автоматичните стабилизатори на напрежението. За всеки от елементите са използвани известни модели, като е обърнато специално внимание на взаимната връзка между синхронните генератори в товарния модул. На фиг. 1 е показана схематично дизелгенераторната част от състава на ИКЕС с входните и изходните величини.



Фиг. 1

Интегрираните корабните електроенергетични системи са изолирани и за представения модел ъгловата скорост на ротора на единия генератор е избрана за базова а силовите ъгли на останалите генератори са изчислени към базовия. Силовият ъгъл между съответния генератор и напрежението на шината е изчислен по товарния модул като функция на токовете

на генераторите.

Математичния модел е представен в относителни единици по номиналните стойности на най-големия синхронен генератор като еталон. Това има отношение, ако различни по параметри генератори се използват в един модел, защото това налага да се изчислят параметрите на останалите генератори.

- Фазно напрежение $U_{ref}, V; U_{ref} = \sqrt{2/3}U_N$,

където U_N е номиналното напрежение на шината, V .

- Фазов ток $I_{ref}, A; I_{ref} = \sqrt{2}I_N$, където I_N е номиналният ток, A .

- Пълна мощност $S_{ref}, VA; S_{ref} = 3/2U_{ref} \cdot I_{ref}$.

- Електрическа ъглова честота, $rad/s: \omega_N = 2\pi f_N$,

където f_N е номиналната честота на шината, $1/s$.

- Механична ъглова честота, $rad/s:$

$$\Omega_{ref} = \omega_N / (p / 2),$$

където p е броят на полюсите на генератора.

- Въртящ момент, $Nm: T_{ref} = S_{ref} / \Omega_{ref}$.

2.1. Дизелови двигатели

Като приближение на динамичните характеристики на среднооборотния дизелов двигател е използван модел от първи ред.

$$(1) \quad \dot{T} = \frac{1}{T_{DE}}(-T_m + z) \quad ,$$

където T_m е механичният въртящ момент, pu ; T_{DE} - дизеловата динамична константа, s , а z е индексът на горивната помпа, pu . Уравнение (1) е написано така, че индексът на горивната помпа се изменя от 0 до 1 (от 0 до 100% от капацитета на горивната помпа).

Допълнително опростена нелинейна функция описва специфичния разход на гориво:

$$(2) \quad \rho = f(z), g / kWh \quad .$$

Функция f в уравнение (2) е приета за конвексна за $z \in [0, 1]$ с минимум от мощността на дизеловия двигател, обикновено около 90% от максималната.

Математичният модел на дизеловия двигател е адекватен, тъй като е разгледана работата основно на електрическата част. За това не са отчетени работните условия на дизеловия двигател като температура на околната среда, температурата на свежия заряд и изходящите газове.

2.2. Синхронни генератори

За описанието на всеки синхронен генератор е използвана $d-q$ координатна система. Включени са диференциалните уравнения, описващи динамиката на навивките на ротора, статора и успокоителната намотка. Пренебрегнати са магнитното насищане,

хистерезиса и вихровите токове. Те са сумирани за да имат минимално въздействие върху динамичната работа на системата.

За съставяне на математичния модел на всеки генератор са използвани следните променливи величини и параметри:

Механични:

$\Delta\delta$: Относителен ъгъл на натоварването. Това е ъгълът между q оста на дадения генератор и q оста на съответния генератор.

Ω : Ъглова скорост на вала на двигателя, pu .

Електрически:

- Ψ_d : Потокосцепление на статорната намотка по ос d , pu .

- Ψ_q : Потокосцепление на статорната намотка по ос q , pu .

- Ψ_D : Потокосцепление на успокоителната намотка по ос d , pu .

- Ψ_Q : Потокосцепление на успокоителната намотка по ос q , pu .

- Ψ_f : Потокосцепление на възбудителната намотка, pu .

Входни:

- u_d : Напрежение на клемите на генератора по ос d , pu .

- u_q : Напрежение на клемите на генератора по ос q , pu .

- Ω_1 : Ъглова скорост на вала на двигателя за съответния генератор, pu .

- T_m : Механичен въртящ момент, pu .

- u_f : Напрежение на възбудителната намотка, pu .

Изходни:

- i_d : Съставна на статорния ток по ос d , pu .

- i_q : Съставна на статорния ток по ос q , pu .

- Ω : Ъглова скорост на вала на двигателя, pu .

- $\Delta\delta$: Относителен ъгъл на натоварването, rad .

- P : Активна мощност, pu .

- Q : Реактивна мощност, pu .

Параметри:

- ω_N : Номинална електрическа ъглова честота, rad/s .

- T_a : Механична константа, $s; T_a = \Omega_{ref} \frac{J}{T_{ref}}$, където J е инерционният момент.

- r_s : Активно съпротивление, pu .

- x_d : Реактивно съпротивление по ос d , pu .

- x_q : Реактивно съпротивление по ос q , pu .

T_D : Времекопстанта на успокоителната намотка по ос d , s .

T_Q : Времекопстанта на успокоителната намотка по ос q , s .

T_f : Времекопстанта на възбудителната намотка, s .

σ_D : Коефициент на разсейването (успокоителна/статорна намотка) по ос d , *безразмерен*.

σ_Q : Коефициент на разсейването (успокоителна/статорна намотка) по ос q , *безразмерен*.

σ_f : Коефициент на разсейването (възбудителна/статорна намотка), *безразмерен*.

μ_D : Коефициент на връзката (успокоителна/възбудителна намотка), *безразмерен*.

μ_f : Коефициент на връзката (възбудителна/успокоителна намотка), *безразмерен*.

Уравненията на електрическото състояние (баланс на напреженията във всяка намотка) са:

$$(3a) \quad \dot{\Psi}_d = \omega_N (\Omega \Psi_q + i_d r_s + u_d) ,$$

$$(3b) \quad \dot{\Psi}_q = \omega_N (-\Omega \Psi_d + i_q r_s + u_q) ,$$

$$(3c) \quad \dot{\Psi}_D = -\frac{1}{T_D} i_D ,$$

$$(3d) \quad \dot{\Psi}_Q = -\frac{1}{T_Q} i_Q ,$$

$$(3e) \quad \dot{\Psi}_f = \frac{1}{T_f} (-i_f + u_f) ,$$

където потокосцепленията са:

$$(4a) \quad \Psi_d = -x_d i_d + i_D + i_f ,$$

$$(4b) \quad \Psi_q = -x_q i_q + i_Q ,$$

$$(4c) \quad \Psi_D = -(1 - \sigma_D) x_d i_d + i_D + \mu_D i_f ,$$

$$(4d) \quad \Psi_Q = -(1 - \sigma_Q) x_q i_q + i_Q ,$$

$$(4e) \quad \Psi_f = -(1 - \sigma_f) x_d i_d + \mu_f i_D + i_f .$$

Уравненията на механичното състояние са:

$$(5) \quad \dot{\Omega} = \frac{1}{T_a} (T_m - T_e) ,$$

$$(6) \quad \Delta \dot{\delta} = \omega_N (\Omega - \Omega_l) ,$$

където електромагнитният въртящ момент е

$$(7) \quad T_e = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d .$$

За разглеждания генератор (генератор 1), от тук намираме $\Delta \dot{\delta} = 0$.

Изходните уравнения по отношение на изходния

ток (i_d, i_q) и механичните величини $(\Omega, \Delta \delta)$ са:

$$(8) \quad P = u_d i_d + u_q i_q ,$$

$$(9) \quad P = u_q i_d - u_d i_q .$$

Уравнения (3) и (4) могат да бъдат записани в компактна форма в пространството на състоянията.

Определяме векторите

$$\Psi = [\Psi_d, \Psi_q, \Psi_D, \Psi_Q, \Psi_f]^T ; i = [i_d, i_q, i_D, i_Q, i_f]^T ;$$

$$u_g = [u_d, u_q]^T .$$

$$(10) \quad \dot{\Psi} = K(\Omega) \Psi + R i + E u_g + b u_f ,$$

$$(11) \quad \Psi = X i \Rightarrow i = X^{-1} \Psi ,$$

където:

$$K(\Omega) = \begin{bmatrix} 0 & \omega_N \Omega & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_N \Omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} ,$$

$$R = \begin{bmatrix} \omega_N r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_N r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_D} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_Q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_f} \end{bmatrix} ,$$

$$E = \begin{bmatrix} \omega_N & 0 \\ 0 & \omega_N \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} ,$$

$$X = \begin{bmatrix} -x_d & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -x_q & 0 & 1 & 0 \\ -(1 - \sigma_D) x_d & 0 & 1 & 0 & \mu_D \\ 0 & -(1 - \sigma_Q) x_q & 0 & 1 & 0 \\ -(1 - \sigma_f) x_d & 0 & \mu_f & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_f} \end{bmatrix}.$$

За $\dot{\psi}$ имаме:

$$(12a) \quad \dot{\psi} = (K(\Omega) + RX^{-1})\psi + Eu_g + bu_f,$$

$$(12b) \quad \dot{\Omega} = \frac{1}{T_a}(T_m - h(\psi)),$$

$$(12c) \quad \Delta \dot{\delta} = \omega_N(\Omega - \Omega_1),$$

където $h(\psi)$ е функция, дадена от (7). По-нататък оп-

ределяме векторите $\psi_s = [\psi_d, \psi_q]^T$ и $i_s = [i_d, i_q]^T$, които съдържат само статорните стойности на потокосцепленията и токовете вектори.

Тогава:

$$(13) \quad h(\psi) = \psi_s^T H i_s = \psi^T (G^T H G) X^{-1} \psi,$$

където:

$$(14) \quad H = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -I & 0 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

$$(15) \quad G^T H G = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

За изходните величини i_s, P, Q следват изразите:

$$(16) \quad i_s = GX^{-1}\psi,$$

$$(17) \quad P = u_g^T i_s = u_g^T GX^{-1}\psi,$$

$$(18) \quad Q = -u_g^T H i_s = -u_g^T H G X^{-1}\psi.$$

За да обобщим математичния модел в пространството на състоянията за един генератор, записваме:

$$(19a) \quad \dot{\psi} = (K(\Omega) + RX^{-1})\psi + Eu_g + bu_f,$$

$$(20b) \quad \dot{\Omega} = \frac{1}{T_a}(T_m - h(\psi)),$$

$$(21c) \quad \Delta \dot{\delta} = \omega_N(\Omega - \Omega_1).$$

2.3. Симулации с математичния модел

Полученият математичен модел е въведен в Matlab-Simulink с цел провеждане на различни симулации за да придобием представа за поведението му при различни режими на работа. Изследваните генератори са с еднакви параметри /60 Hz, 6MW/, като за изследване на динамичното им поведение са симулирани

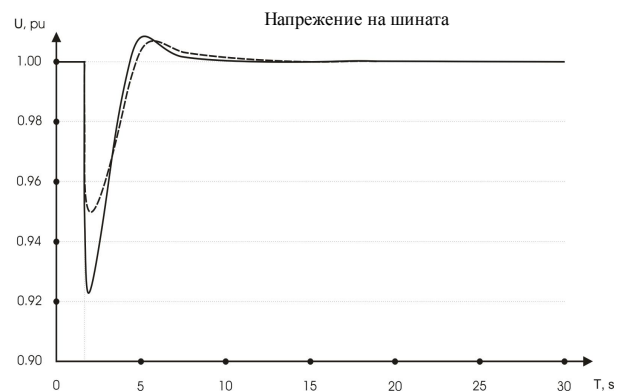
различни типове товари (работа при постоянен импеданс и приблизително постоянна мощност).

Началната изходна мощност при направената симулация е 0,5 pu (50% от пълната) с активна и реактивна съставна.

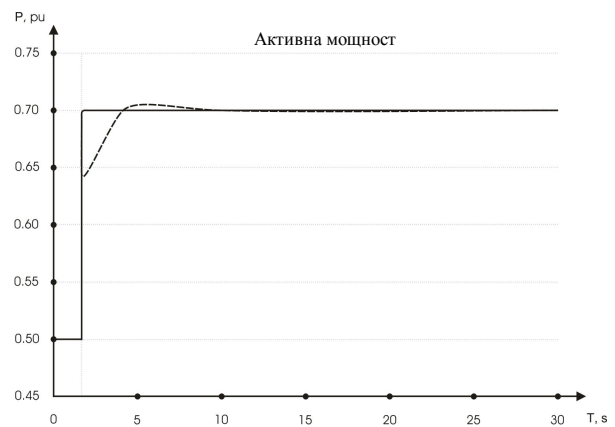
На фиг. 2, фиг. 3 и фиг. 4 са показани резултатите от сравнение с различни товари. С пунктирна линия е показана симулацията с товар с постоянен импеданс а с пълтна линия симулация с товар с приблизително постоянна мощност. Настройката на ПИД контролерите е осъществена опитно и чрез симулиране на грешка в изследвания модел. Избрани са параметри осигуряващи задоволителна работа на системата по отношение на претоварване и устойчивост при преходни процеси.



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

3. ИЗВОДИ

Интегрираните корабни електростанции навлизат с все по-големи темпове на съвременните кораби. Това определя въпросът за разработването и изследването на математични модели на ИКЕС и елементите и като особено актуален. Дизел-генераторната част от състава на ИКЕС е съществен момент от моделирането на електростанцията. Създаването и изследването на такива модели дава възможности за разработване на нови начини за управление на мощностите, изследване и подобряване работата на уредбата за генериране на електроенергия, икономия на гориво и снижаване на експлоатационните разходи. Това от своя страна дава възможност за окриване на нови направления за изследване и оптимизация на интегрираната корабна електростанция.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. A l l E l e c t r i c Ship, Evolving Benefits for Maritime Applications. Institute of Marine Engineers /IMarE/, 1998.

2. D o e r r y, N.H., J. C. Davis. Integrated power system for marine application. Naval Engineering, 2003.

3. H i l l, W. A., G. F. Creelman, L. M. Misschke. Control strategy for an icebreaker propulsion system. IEEE, 2002.

4. O r d y s, A.W., A. W. Pike, M. A. Johnson, R. M. Katebi, M. J. Grimble. Modelling and simulation of power generation plants. Advances in industrial control. Springer-Verlag, 1999.

5. P a r k e r, D.S. and C.G. Hodge. The electric warship. Power Engineering, 2006.

6. R a y a n, M. S., M. J. Sterling, M. R.I rving. Real time power system simulation. IEE, 2001.

7. S a l l a b a n k, P. H., A. J. Whitehead. The practical application of modern simulation tools throughout the design and trials of a diesel electric propulsion system. IMarE, 1997.

8. S c h r i e k, D. M., J. W. de Nijs. Royal Netherlands Navy M Class Frigate. Integrated monitoring and control system and electrical installation. IMarE, 2005.

9. S e c o n d International Conference on Diesel Electric Propulsion. Norwegian Society of Chartered Engineers, 1999.

10. W a n g, Y. D., D. J. Hill. Robust nonlinear coordinated control of power systems. Automatica, 1999.

11. W e t t e r h u s, T. M. Comparison of fuel consumption in electric propulsion systems with fixed speed and variable speed thruster motors. Norwegian Institute Of Technology, 1999.

БЕЛЕЖКИ ВЪРХУ АСИМПТОТИЧНОТО ПОВЕДЕНИЕ НА ДИФЕРЕНЦИРУЕМИ ФУНКЦИИ: СЪЩЕСТВУВАНЕ НА ПСЕВДОАСИМПТОТИЧНИ ПАРАБОЛИ

Анна В. Томова, ВВМУ „Н. Й. Вапцаров“, Варна

REMARKS ON THE BEHAVIOURS OF SOME FUNCTIONS WITH PSEUDOASYMPTOTIC PARABOLAS

Anna V. Tomova, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna

Abstract: We have defined the idea for pseudo asymptotes of differentiable functions. In this paper we restrict the attention over the behaviors of some functions with pseudoasymptotic parabolas. Using the system for computer algebra MATHEMATICA 4.0 we draw the graphics of some functions with pseudoasymptotic parabolas.

Key words: Definitions for pseudo asymptotic parabolas for differentiable functions one criterion for existence of pseudo asymptotic parabolas for differentiable functions, formulae and graphics of some functions with pseudo asymptotic parabolas.

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Нека функцията $f(x)$, $x > x_0$ е дефинирана при $x > x_0$. Както е добре известно [1], необходимото и достатъчно условие да съществува асимптота за кривата $y = f(x)$ при $x \rightarrow \infty$ е да съществува границата:

$$(1) \quad n = \lim_{x \rightarrow \infty} [f(x) - kx] \quad ,$$

при фиксирано k . Известно е също така, че при доказване на необходимостта на условието k се намира по единствен начин:

$$(2) \quad k = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{x} \quad .$$

В [2] и [3] сме въвели следната дефиниция:

Дефиниция 1. Нека функцията $f(x)$ е дефинирана при $x > x_0$. Предполагаме, че втората граница (2) съществува, а първата граница (1) не съществува (в смисъл на крайна стойност). Тогава правата a с уравнение $y(x) = kx$ ще наречем псевдоасимптота за функцията $f(x)$ при $x \rightarrow \infty$.

Забележка 1. Аналогично може да се дефинира псевдоасимптота при $x \rightarrow -\infty$.

Забележка 2. Лесно се доказва фактът, че две функции: $f_1(x)$ и $f_2(x) = f_1(x) + ax + b$, които се различават само в линейните си части, имат един и същ характер спрямо своите наклонени асимптоти, т. е. или имат такива, или нямат. Същото се отнася и по отношение на по-горе дефинираните псевдоасимптоти. Не се изключва случаят, когато едната функция има хоризонтална асимптота или псевдоасимптота.

Забележка 3. Примери за функции с псевдоасимптоти са функциите $\ln x$, $\ln(1+x)$ (псевдоасимптотите им са абсцисната ос и др.).

В [3] сме доказали

• **Критерий (достатъчно условие) за съществуване на псевдоасимптоти и асимптоти на диферен-**

цируеми функции.

Теорема. Нека $f: R \rightarrow R$ е два пъти непрекъснато диференцируема функция. Тогава:

$$1) \text{ Ако } f''(x) \geq \frac{1}{1+x}, x \geq 0, \text{ функцията } f(x) \text{ няма}$$

псевдоасимптоти, а, следователно и асимптоти при $x \rightarrow \infty$;

$$2) \text{ Ако } \frac{1}{1+x^{1+l}} \geq f''(x) \geq \frac{1}{1+x^2}, x \geq 1, 0 < l < 1$$

$f(x)$ има псевдоасимптота, но няма асимптота;

$$3) \text{ Ако } 0 < f''(x) \leq \frac{1}{1+x^{2+l}}, l > 0, x \geq 0, f(x)$$

има асимптота при $x \rightarrow \infty$.

Забележка. Аналогично можем да формулираме и да докажем теорема за критерий (достатъчно условие) за съществуване на псевдоасимптоти и асимптоти на диференцируеми функции при $x \rightarrow -\infty$;

Предвид съществената роля, която играе този критерий (той разделя диференцируемите функции на 3 класа, а не както е досега - на 2 класа по отношение на поведението им при $x \rightarrow -\infty$), тук ще скицираме още един път неговото доказателство.

Доказателство на теоремата:

1) От условието следват неравенствата (след двукратно интегриране):

$$\int_0^x f''(t) dt = f'(x) - f'(0) \geq \int_0^x \frac{dt}{1+t} = \ln(1+x), x > 0,$$

$$\int_0^x (f'(t) - f'(0)) dt = f(x) - f(0) - f'(0)x \geq \int_0^x \ln(1+t) dt = \\ = x \ln(1+x) - x + \ln(1+x), x > 0 \quad .$$

Тогава:

$$\frac{f(x)}{x} \geq \frac{f(0)}{x} + f'(0) + \frac{\ln(1+x)}{x} + \ln(1+x) - 1 \rightarrow \infty$$

при $x \rightarrow \infty$ и, следователно, функцията $f(x)$ няма

асимптоти при $x \rightarrow \infty$.

$$2) \text{ Нека } \frac{1}{1+x^{l+1}} \geq f''(x) \geq \frac{1}{1+x^2}, \quad x \geq 1,$$

$0 < l < 1$. Интегрираме тези неравенства:

$$\begin{aligned} \arctg x - \frac{\pi}{4} &\leq \int_1^x f''(t) dt \leq f'(x) - f'(1) \leq \\ &\leq \int_1^x \frac{dt}{1+t^{l+1}} < \int_1^x \frac{dt}{t^{l+1}} = \frac{1}{l} \left(1 - \frac{1}{x^l} \right), \quad x \geq 1. \end{aligned}$$

От получените неравенства правим извода, че съществува $\lim_{x \rightarrow \infty} f'(x)$, тъй като $f'(x)$ е монотонно растяща ($f''(x) > 0$) и ограничена. Записваме $f(x)$ с формула на Тейлор от нулев ред:

$$f(x) = f(0) + f'(\theta(x))x < f(0) + f'(x)x, \quad 0 < \theta(x) < 1,$$

$$\text{откъдето имаме: } \frac{f(x)}{x} \leq \frac{f(0)}{x} + f'(x) \leq \lim_{x \rightarrow \infty} f'(x).$$

$$\text{Разглеждаме производната } \left(\frac{f(x)}{x} \right)' = \frac{f'(x)x - f(x)}{x^2}.$$

Имаме $f(x) < f(0) + f'(x)x$. Без ограничение на общността, можем да приемем, че $f(0) = 0$. Тогава:

$$f(x) < f'(x)x, \quad f'(x)x - f(x) > 0, \text{ производната на}$$

функцията $\frac{f(x)}{x}$ е положителна, тя е монотонно растяща и ограничена отгоре, т. е. съществува границата

$$k = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{x}, \text{ т. е. } f(x) \text{ има псевдоасимптота при}$$

$x \rightarrow \infty$ [1 ÷ 4]. От друга страна,

$$\frac{f(x)}{x} = \frac{f'(\theta(x))x}{x} = f'(\theta(x)) \leq k,$$

$$\frac{f(x)}{x} \leq \frac{f(0)}{x} + f'(x) \leq \lim_{x \rightarrow \infty} f'(x).$$

С други думи, функцията $\frac{f(x)}{x}$ е монотонно растяща

като функция на x и монотонно растяща като функция на аргумента $\theta(x)x$, следователно $\lim_{x \rightarrow \infty} \theta(x)x = \infty$.

От тези неравенства правим още един извод за числото

$$k: k = \lim_{x \rightarrow \infty} f'(x).$$

Сега ще докажем, че функцията няма асимптота. Като вземем предвид **Забележка 3**, без нарушение

на общността ще приемем, че дадената в условието на задачата функция удовлетворява условията:

$$f(0) = f'(0) = 0.$$

Тогава, след двукратно интегриране на дясното неравенство получаваме:

$$(3) \quad f(x) > x \arctg(x) - \frac{\ln(1+x^2)}{2}.$$

Означаваме лявата страна на неравенство (3) като $\phi(x)$ и разглеждаме функцията $g(x) = f(x) - \phi(x)$.

Очевидно тя е изпъкнала: $g''(x) > 0$ и следователно удовлетворява неравенството

$$(4) \quad 2g(2x) < g(x) + g(3x),$$

от което следва:

(5)

$$\begin{aligned} f(x) + f(3x) - 2f(2x) &> x \arctg(x) - \frac{\ln(1+x^2)}{2} + \\ &+ 3x \arctg(3x) - \frac{\ln(1+9x^2)}{2} - 4x \arctg(2x) + \ln(1+4x^2). \end{aligned}$$

Преобразуваме лявата част на (5), като допускаме, че $f(x)$ има наклонена асимптота $ax + b$ при $x \rightarrow \infty$:

$$\begin{aligned} f(x) + f(3x) - 2f(2x) &= f(x) - ax - b + \\ &+ f(3x) - a3x - b - 2f(2x) + 2a2x + 2b. \end{aligned}$$

Тогава границата на лявата част на (5) при $x \rightarrow \infty$ ще бъде равна на 0. Намираме границата на дясната част на (5):

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow \infty} \left[x \arctg(x) - \frac{\ln(1+x^2)}{2} + 3x \arctg(3x) - \frac{\ln(1+9x^2)}{2} - \right. \\ \left. - 4x \arctg(2x) + \ln(1+4x^2) \right] \geq \ln \frac{4}{3}. \end{aligned}$$

Стигнахме до очевидно невъзможното неравенство: $0 \geq \ln \frac{4}{3}$, което доказва, че $f(x)$ няма асимптоти

при $x \rightarrow \infty$. Аналогично се доказва, че $f(x)$ няма асимптоти и при $x \rightarrow -\infty$. С това доказателството е завършено.

$$3) \text{ Нека } 0 < f''(x) \leq \frac{1}{1+x^{2+l}}, \quad l > 0, \quad x \geq 1. \text{ Интегрираме тези неравенства два пъти и получаваме при}$$

$x \geq 1$:

(6)

$$0 \leq f'(x) - f'(1) \leq \int_1^x \frac{dt}{1+t^{2+l}} \leq \int_1^x \frac{dt}{t^{2+l}} = \frac{1}{l+1} \left(1 - \frac{1}{x^{l+1}} \right),$$

$$0 \leq f(x) - f(1) - f'(1)x + f'(1) \leq \int_1^x \frac{1}{l+1} \left(1 - \frac{1}{t^{l+1}}\right) dt =$$

$$= \frac{x-1}{l+1} + \frac{1}{l(l+1)} \left(1 - \frac{1}{x^l}\right).$$

Тогава, от посоченото по-горе доказателство в **случай 2)** следва, че функцията има псевдоасимптота, т.е. съществува $k = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow \infty} f'(x)$. Остава да докажем, че съществува границата

$$\lim_{x \rightarrow \infty} [f(x) - kx].$$

Функцията $f(x) - kx$ е монотонно намаляваща:

$(f(x) - kx)' = f'(x) - k \leq 0$. Следователно, трябва да докажем, че тя е ограничена отдолу. Имаме следните съотношения:

$$f(x) - kx = \frac{xf'(\theta(x)x) - k}{\frac{1}{x}} = \frac{f'(\theta(x)x) - k}{\frac{1}{x}} \xrightarrow{x \rightarrow \infty} \left[\frac{0}{0} \right].$$

Последната неопределеност е близка по стойност до неопределеността $\frac{f'(x) - k}{\frac{1}{x}} \xrightarrow{x \rightarrow \infty} \left[\frac{0}{0} \right]$, тъй като

$$k = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow \infty} f'(\theta(x)x) = \lim_{x \rightarrow \infty} f'(x). \text{ Имаме:}$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f'(x) - k}{\frac{1}{x}} = \left[\frac{0}{0} \right] = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f''(x)}{-\frac{1}{x^2}}. \text{ От условията на}$$

разглеждания случай следва, че

$$\left| \frac{f''(x)}{-\frac{1}{x^2}} \right| = \left| \frac{f''(x)}{\frac{1}{x^2}} \right| \leq \frac{x^2}{(1+x^{2+l})} \xrightarrow{x \rightarrow \infty} 0.$$

Следователно, $f(x) - kx$ е ограничена и границата

$\lim_{x \rightarrow \infty} [f(x) - kx]$ съществува. С това доказателството е завършено.

2. ОСНОВНИ РЕЗУЛТАТИ

Дефиниция 2 (Дефиниция за псевдоасимптотични параболы): Нека функцията $f(x)$ е дефинирана при $x > x_0$. Предполагаме, че границата

$$k = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{x^m}, \quad m > 1$$

съществува. Тогава параболата с уравнение $y(x) = kx^m$ ще наречем псевдоасимптотична параболата за функцията $f(x)$ при $x \rightarrow \infty$.

Забележка 4. Аналогично може да се дефинират псевдоасимптотични параболы при $x \rightarrow -\infty$.

Забележка 5. Лесно се доказва фактът, че две функции: $f_1(x)$ и $f_2(x) = f_1(x) + P_{m-1}(x)$, които се различават само с полином от $m-1$ степен, имат един и същ характер спрямо своите псевдоасимптотични параболы, т.е. или имат такива, или нямат.

Забележка 6. Примери за функции с псевдоасимптоти, разглеждани като параболы от първи ред, са функциите $\ln x$, $\ln(1+x)$ (псевдоасимптотите или псевдоасимптотичните им параболы от първи ред са абсцисната оси др.).

• Критерий (достатъчно условие) за съществуване на псевдоасимптотични параболы на диференцируеми функции.

Теорема. Нека $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ е $m+1$ -пъти непрекъсната диференцируема функция. Тогава:

1) Ако

$$f^{(m+1)}(x) \geq \frac{x^{m-1}}{(1+x)^m}, \quad m > 1, x \geq 0, \text{ функцията } f(x)$$

няма псевдоасимптотични параболы при $x \rightarrow \infty$;

2) Ако

$$0 < f^{(m+1)}(x) \leq \frac{x^{m-1}}{(1+x^{l+1})^m}, \quad x \geq 1, 0 < l < 1, \text{ функцията}$$

$f(x)$ има псевдоасимптотична параболата при $x \rightarrow \infty$.

Забележка. Аналогично можем да формулираме и да докажем теорема за критерий (достатъчно условие) за съществуване на псевдоасимптотични параболы за диференцируеми функции при $x \rightarrow -\infty$;

Доказателство:

1) Интегрираме неравенството

$$f^{(m+1)}(x) \geq \frac{x^{m-1}}{(1+x)^m}, \quad m > 1, x \geq 0$$

и получаваме:

$$\int_0^x f^{(m+1)}(t) dt = f^{(m)}(x) - f^{(m)}(0) \geq \int_0^x \frac{t^{m-1}}{(1+t)^m} dt = \frac{1}{m} \int_0^x \frac{1}{(1+t)^m} dt =$$

$$\frac{1}{m} \frac{x^m}{(1+x)^m} + \int_0^x \frac{t^m}{(1+t)^{m+1}} dt = \frac{1}{m} \frac{x^m}{(1+x)^m} + \frac{1}{(m+1)} \frac{x^{m+1}}{(1+x)^{m+1}} +$$

$$+ \int_0^x \frac{t^{m+1}}{(1+t)^{m+2}} dt = \frac{1}{m} \frac{x^m}{(1+x)^m} + \frac{1}{(m+1)} \frac{x^{m+1}}{(1+x)^{m+1}} + \frac{1}{(m+2)} \frac{x^{m+2}}{(1+x)^{m+2}} +$$

$$+ \frac{1}{(m+3)} \frac{x^{m+3}}{(1+x)^{m+3}} + \frac{1}{(m+4)} \frac{x^{m+4}}{(1+x)^{m+4}} + \frac{1}{(m+5)} \frac{x^{m+5}}{(1+x)^{m+5}} + \dots$$

$$+ \int_0^x \frac{t^{m+k}}{(1+t)^{m+k+1}} dt, \quad m > 1, x \geq 0.$$

Оттук правим извода, че не съществува границата $\lim_{x \rightarrow \infty} f^{(m)}(x)$, като правим връзка с хармоничния ред $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$, който, както добре знаем, е разходящ. Записваме $f(x)$ с формула на Тейлор от m -ред в околността на 0 :

$$f(x) = f(0) + \frac{f'(0)}{1!}x + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \dots + \frac{f^{(m)}(0)}{m!}x^m + \frac{f^{(m+1)}(\theta(x)x)}{(m+1)!}x^{m+1}, \quad 0 < \theta(x) < 1$$

Производната от m -ред е растяща функция, тъй като нейната първа производна ($m+1$ -производна на функцията) е положителна. Имаме

$$\frac{f^{(m+1)}(\theta(x)x)}{(m+1)!}x^{m+1} \geq \frac{\theta^{m-1}(x)x^{m-1}}{(1+\theta(x)x)^m(m+1)!}x^{m+1} \geq \frac{\theta^{m-1}(x)}{(1+x)^m(m+1)!}x^{2m}$$

От неравенствата в началото на разглеждания случай, изчислени при променлива вместо x - $\theta(x)x$, следва, че редицата $\theta(x)x$ при $x \rightarrow \infty$ е неограничена, т. е. $\lim_{x \rightarrow \infty} \theta(x)x = \infty$. Тогава от горните неравенства

получаваме, че границата $k = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{x^m}$, $m > 1$ не съществува.

2) Интегрираме неравенството:

$$0 < f^{(m+1)}(x) \leq \frac{x^{m-1}}{(1+x^{l+1})^m}, \quad x \geq 1, \quad 0 < l < 1$$

$$0 < \int_1^x f^{(m+1)}(t) dt \leq f^{(m)}(x) - f^{(m)}(1) \leq \int_1^x \frac{t^{m-1} dt}{(1+t^{l+1})^m} <$$

$$< \int_1^x \frac{t^{m-1} dt}{t^{(l+1)m}} = \int_1^x t^{m-1-m-lm} dt = \frac{1}{lm} \left(1 - \frac{1}{x^{lm}} \right), \quad x \geq 1.$$

Следователно, съществува $\lim_{x \rightarrow \infty} f^{(m)}(x)$, тъй като $f^{(m)}(x)$ е монотонно растяща ($f^{(m+1)}(x)$ е положителна), а от горните неравенства следва, че тя е ограничена при $x \rightarrow \infty$.

Записваме $f(x)$ с формула на Тейлор от m -ред в околността на 0 :

$$f(x) = f(0) + \frac{f'(0)}{1!}x + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \dots + \frac{f^{(m-1)}(0)}{(m-1)!}x^{m-1} + \frac{f^{(m)}(\theta(x)x)}{m!}x^m, \quad 0 < \theta(x) < 1$$

От този запис и от лявото неравенство следва, че функцията наистина има псевдоасимптотична парабола, тъй като съществува границата: $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{x^m} = k$.

Тази граница очевидно е:

$$k = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{x^m} =$$

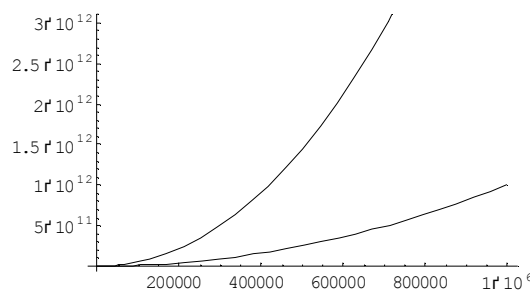
$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(0) + \frac{f'(0)}{1!}x + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \dots + \frac{f^{(m-1)}(0)}{(m-1)!}x^{m-1} + \frac{f^{(m)}(\theta(x)x)}{m!}x^m}{x^m}$$

$0 < \theta(x) < 1$

3. ГРАФИКИ НА ФУНКЦИИ БЕЗ И С ПСЕВДОАСИМПТОТИЧНИ ПАРАБОЛИ

Пример 3.1. Нека: $f'''(x) = \frac{x}{(1+x)^2}$, т. е. $m = 2$,

според критерия функцията няма псевдоасимптотична парабола. На фиг. 1.1 е показана графиката й, заедно с графиката на параболата $y = x^2$.



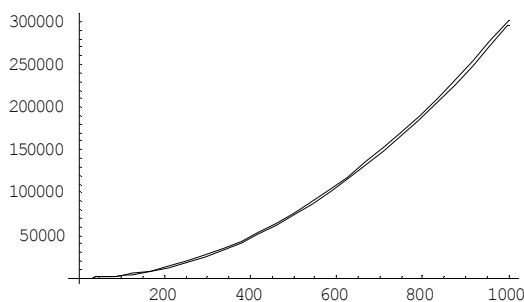
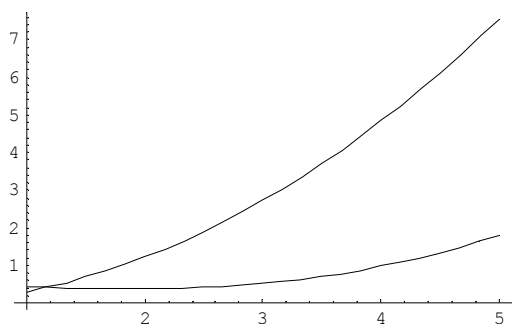
Фиг. 1.1

Пример 3.2. Нека: $f'''(x) = \frac{x}{\left(1+x^{\frac{3}{2}}\right)^2}$, т. е.

отново $m = 2$. Намираме с помощта на системата за компютърна алгебра МАТНЕМАТИСА 4. 0. :

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{x^2} = \frac{\pi}{6\sqrt{3}}$$

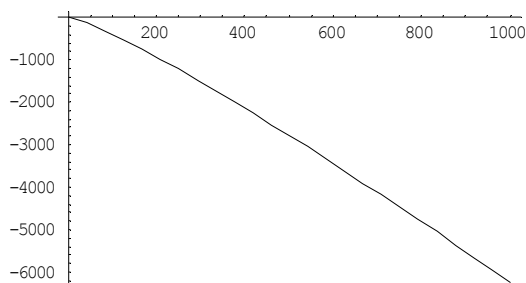
На фиг. 1.2 са показани графиките на функцията и на нейната псевдоасимптотична парабола в различни по дължина интервали за изменение на x .



Фиг. 1.2

На фиг. 1.3 е показана графиката на разликата

$$f(x) - \frac{\pi}{6\sqrt{3}}x^2$$



Фиг. 1.3

4. ПЛАН ЗА ПРОВЕЖДАНЕ НА ПРАКТИЧЕСКО ЗАНЯТИЕ ПО МАТЕМАТИЧЕСКИ АНАЛИЗ НА ТЕМА "ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПОВЕДЕНИЕТО И ПОСТРОЯВАНЕ НА ГРАФИКИ НА ФУНКЦИИ С ПСЕВДОАСИМПТОТИЧНИ ПАРАБОЛИ С ПОМОЩТА НА СИСТЕМА ЗА КОМПЮТЪРНА АЛГЕБРА"

4.1. Теоретична част: обучаемите предварително са присъствували на лекция и са се запознали със съдържанието на темата и доказателството на критерия за отсъствие и съществуване на псевдоасимптотични асимптоти. Преподавателят обръща вни-

мание на основните идеи и посочва съществуването на твърде широк клас елементарни и специални функции с псевдоасимптотични параболи. Подчертава се сложността на пресмятанията и практическата полза за намирането на формулите с помощта на системи за компютърна алгебра, а също така и възможността с тези системи да се начертаят графиките на получените функции и да се проследи поведението им спрямо техните псевдоасимптотични параболи.

4.2. Предлага се на обучаемите сами да намерят формули за функции без и с псевдоасимптотични параболи.

4.3. Обучаемите построяват графики за получените функции в т. 3.2.

4.4. Правят се сравнения между графиките на функциите и се обясняват разликите в поведението им спрямо техните псевдоасимптотични параболи.

4.5. Ако се разполага с няколко системи за компютърна алгебра, правят се сравнения между резултатите, получени с тях при едни и същи задания.

4.5. Изводи: разсъждава се върху възможността за допускане на грешки и неточности при работа със системи за компютърна алгебра, констатирането и отстраняването им. Изтъкват се предимствата на работа със системи за компютърна алгебра за получаване и илюстриране на сериозни математически резултати.

5. ИЗВОДИ

Сравняваме поведението на двете функции, разгледани в примери 3.1. и 3.2. Както и очаквахме, едва при значителни стойности на аргумента графиката на функцията с псевдоасимптотична парабола и тази на нейната псевдоасимптотична парабола са почти неразличими. Разликата обаче между стойностите им е неограничена, когато аргументът расте неограничено.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т о м о в а, А. Бележки върху поведението на някои функции с псевдоасимптоти. Математически форум, брой 2, март - април, 2003 г., ISSN 1311-297, Том 5, стр. 55- 57.
2. Т о м о в а, А. Един критерий за съществуване на псевдоасимптоти и асимптоти на диференцируеми функции. Бележки върху поведението на някои класове функции с псевдоасимптоти и асимптоти (под печат).
3. Т о м о в а, А. В., М. П. Николова. УЧЕБЕН САЙТ НА ТЕМА "ИЗСЛЕДВАНЕ ПОВЕДЕНИЕТО НА ФУНКЦИИ С ПСЕВДОАСИМПТОТИ И АСИМПТОТИ" с адрес в Интернет: <http://free.bol.bg/annalidia>
4. Ф и х т е н г о л ь ц, Г. М. Курс дифференциалного и интегралного исчисления. Москва, 1975.

ЗА КОНТАКТИ:

1. А. В. Томова: e-mail: anna_bg_2000@yahoo.com.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА МИКРОСТРУКТУРАТА И СВОЙСТВАТА НА ПОВЪРХНОСТЕН СЛОЙ, ФОРМИРАН ЧРЕЗ ПЛАЗМЕНО НАПЛАСТЯВАНЕ

Христо Скулев, Технически университет, Варна
Георги Люцканов, ВВМУ "Н. Й. Вапцаров", Варна

EXPERIMENTAL STUDY OF THE MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF SURFACE COATINGS FORMED BY PLASMA SPRAYING

Hristo Skulev, Technical University, Varna
Georgi Lyutskanov, Naval Academy „N. Y. Vaptsarov“, Varna

Abstract: *A study was performed to examine the characterization of the microstructure and properties of nickel plasma coatings obtained at different plasma conditions.*

The study was designed to assess the properties of Nickel Plasma Coatings based on the use of microscopic images, X-ray results, hardness measurements and Differential Scanning Calorimetry. The relationships between of the coating microstructures and properties were examined.

The phase composition of the nickel coatings is dependent on the plasma spraying regime apply during the formation of the plasma coatings. Different compositions of light and dark layers were present at different regimes. Amorphous state can be observed at room temperature but then changes to a homogenous structure when secondary heating was applied. The hardness of the coating increased after secondary heating up to 700°C but then decreased rapidly as it reached 1200°C. At different heating rates of 5-50°C/min only one exothermic peak can be seen on each sample. In addition, the increase of heating rate correspondingly increases the area of the DSC exothermic peaks. A relationship was established between the power (kW) of the spraying conditions with the ratio of the amorphous state in the coating. The results show that there are no effect on the ratio of amorphous state and the width of the peaks on the amorphous state (FWHM, °2Th) with the increase of power.

Key words: *Thermal spraying, Amorphous, Phase transitions, X-ray diffraction, Plasma spraying, Nickel alloy.*

1. INTRODUCTION

Thermal spraying is a generic term to describe a collection of coating processes involving material transport at high speeds and elevated temperature. Particles or droplets (of coating materials) are accelerated at high speeds, heated and are made to impact an object (i.e. the substrate). Successive particles thus reach a surface where the high energy causes the particles to deform and form a mechanical bond with the underlying surface. These particles vary depending upon the process, but can cover a range of 1 to 200 microns [1].

Plasma powder spraying method allows a large number of technological parameters to be varied. From previous research, it shows that a number of phase transformation occur takes place with the use of different parameters [2]. During secondary heating, the properties of the coating changes in microstructure and hardness. Therefore the aim of this project is to investigate the microstructure and properties of surface coating under different heating conditions.

New industrial applications and more demanding requirements of existing applications have pushed the thermal spray industry to produce even better coatings. This has become realized with greater control in the processing of materials with thermal spray. The processing conditions within each of the thermal spray technologies play a major role in the formation of the microstructure, phase composition and ultimately, the properties of the deposit. Continued efforts to further

understand and improve upon the properties of the thermal spray deposit involve research in areas such as process and processing diagnostics, flame-particle interactions, splat formation, solidification dynamics and microstructure development [3].

This application is advanced new technology for surface treatment of materials. The idea of this technology is to use cheap materials as a based material and to apply plasma coatings with unique properties on the surface. As a result wear resistance, corrosion resistance, fatigue life, hardness the materials are significantly improved.

The project aims at characterization of the microstructure and properties of coatings obtained at different plasma conditions. The sample characterization includes hardness/microhardness measurements, X-ray analysis and microscopic study and the results from this experimental study will be very important for further extension of the application of this technology.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

2.1. Composition of Plasma Powder and Regimes for Plasma Spraying

The chemical composition in atomic percent of the powder used for plasma spraying is given in Table 1. The coatings were sprayed on the 10mm diameter with 60mm length substrate, which were attached onto the rotating cylinder during plasma spraying process. The regimes for the plasma spraying are shown in Table 2.

Specimen with dimensions of 3.5mmx3.5mm were cut and used in the experimental study. The samples then mounted to hold and keep the specimens surface area flat during grinding and polishing. Thickness of the mount should be sufficient to enable of holding the mount firmly during grinding and polishing and thereby to prevent a rocking motion and to maintain a flat surface. After polishing, etching was done to optically enhance microstructural features such as grain size and phase features.

The sample the will be ready for to be experimented by using;

1) Differential Scanning Calorimetry (DSC) which measures the temperatures and heat flow associated with transitions in materials as a function of time and temperature.

2) Nikon Eclipse ME600 Metallurgical optical microscope used to get the microstructure images on a surface finish polished samples.

3) Mitutoyo HM-124 Hardness Machine to measure

the hardness of the coating results.

4) X-Ray Diffraction to discover information about the structure of crystalline materials.

The integrated intensities of the phases (amorphous nickel) were calculated from the corresponding reflections in the XRD diffraction patterns of the deposit using the X'Pert Plus computer program.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. As Sprayed Coatings

3.1.1. Microstructure

From the studies of plasma spraying, it shows that the parameters of spraying regime have direct relationship with the microstructural characteristics of the coating. The regimes of the plasma coatings are shown in Table 2.

The cross-section analysis for microscopic images were prepared and subsequently polished.

The microstructure shows the variety of layering and stacking of coatings.

Table 1

Chemical composition in atomic percent of the powder

Element	Ni	Cr	C	Al	Si	Cu	W
%	73,1	12,8	5,1	2,0	6,5	0,3	0,2

Table 2

Regimes for Plasma Spraying

Sample No	Base Material (Substrate)	Gas flow l/min		Particle Size μm	Current A	Voltage V	Power kW
		Ar	N				
1	Steel	20	2	60	350	52	18,2
2	Steel	30	6	60	350	70	24,5
3	Steel	20	2	60	550	51	28,1
4	Steel	30	6	60	550	70	38,5
5	Steel	25	4	60	550	61	33,6
6	Steel	30	6	60	450	69	31,1
7	Steel	25	4	60	450	60	27,0
N1	Steel	20	2	45	350	52	18,2
N2	Steel	30	6	45	350	70	24,5
N3	Steel	20	2	45	550	51	28,1
N4	Steel	30	6	45	550	70	38,5
N5	Steel	25	4	45	550	61	33,6
N6	Steel	30	6	45	450	69	31,1
N7	Steel	25	4	45	450	60	27,0
N8	Iron	20	2	45	350	52	18,2
N10	Iron	25	4	45	450	60	27,0
N11	Iron	30	6	45	550	70	38,5

As the power increased from 18.2kW to 38.5kW (Table 1), the deposition of layers increases as shown in Figure 1. The boundaries starts to disappear and the coatings approach homogenous layers with thickness of about 1-3 μ m. The melted powder forming new elements is deposited in the form of layering with light and dark colours and the non-melted and partly melted particles have the round spherical shape (Figure 1 and 2). Sample 1 and 4 has more dark layers than light layers compare to sample N1 and N4. With the same regime for both samples, the only reason for this is that due to different powder particle size. Sample 1 and 4 has the larger powder particle (60 μ m) than sample N1 and N4 (45 μ m).

Plasma sprayed coatings with finer powders have finer and denser microstructures with less oxide inclusions. Coarse powders produce coarser and more open structured coatings with more oxidation than fine powders. This is mainly due to the differences in surface area of the powder particles exposed in the flame during spraying.

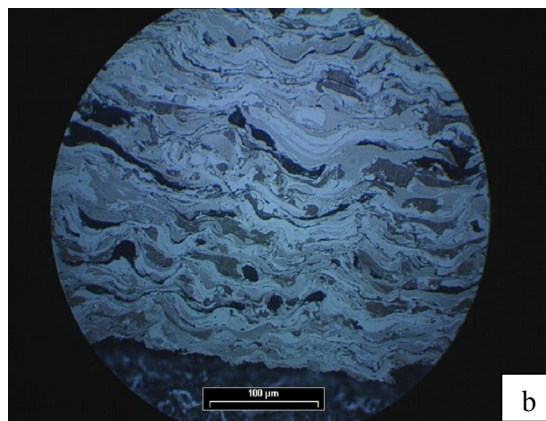
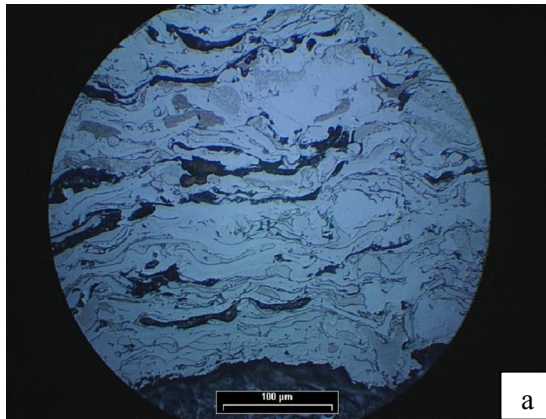


Figure 1. Microstructures of different sprayed conditions:
a) Sample 1 at 18.2 kW; b) Sample 4 at 38.5 kW

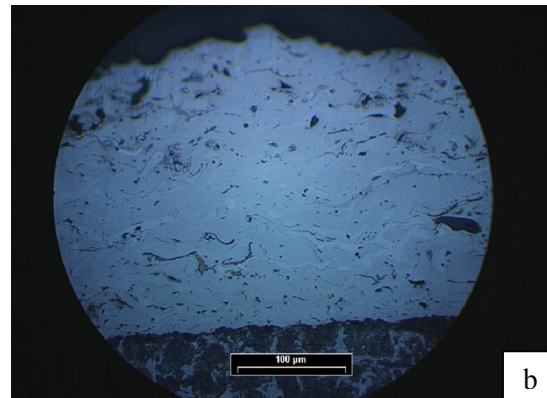
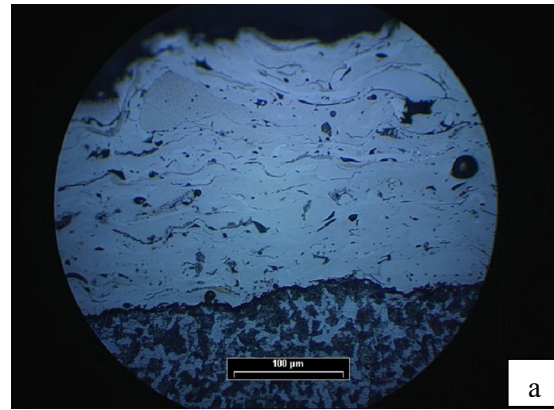


Figure 2. Microstructures of different sprayed conditions:
a) Sample N1 at 18.2 kW; b) Sample N4 at 38.5 kW

The results from this analysis of the microstructure show that during all regimes spraying conditions, the bonding between the steel substrate and coating is very good, without any cracks and other defects.

3.1.2. Microhardness

Many factors such as chemical composition, spraying parameters and heat treatment have influence on the microhardness [4]. Microhardness across the cross-section of sample N5 and N7 was done for the measurements. Knoop indenter was used with load of 0.05 kg for 10 second.

Figure 3 illustrates the microhardness distribution of the coatings at room temperature. The tendency of the curve is not clear (Figure 3) and smoothing was done using the Matlab programme to get the clear tendency of the curve (Figure 4).

A variation of hardness can be observed throughout the cross-sections ranging from 250 to 1284 HK0.05. Near the surface of the coating, the hardness value is low but then rises as the measurement reaches to the middle and decreases towards the substrate.

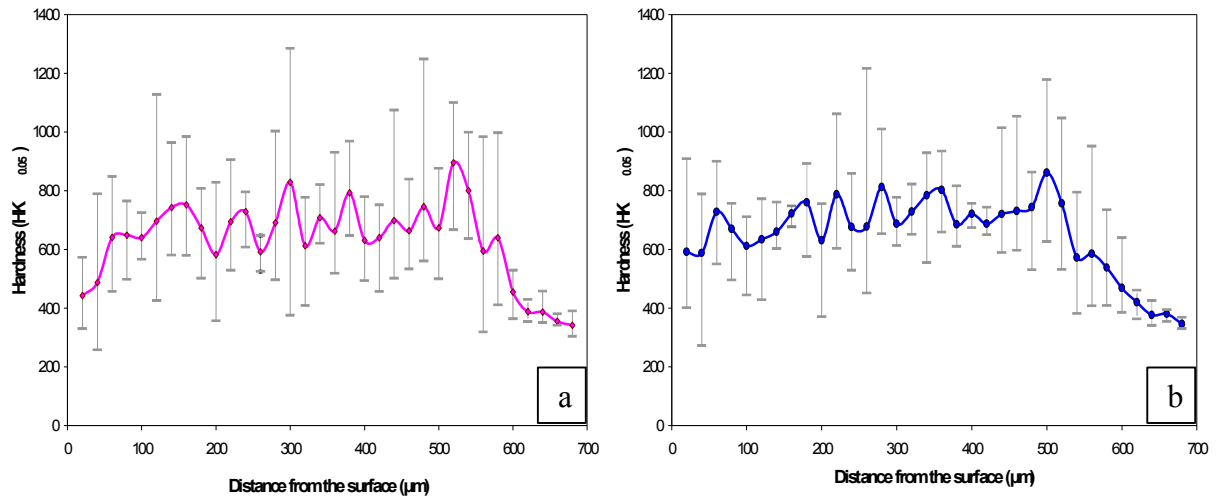


Figure 3. Microhardness profile for sprayed coating: a) Sample N5; b) Sample N7

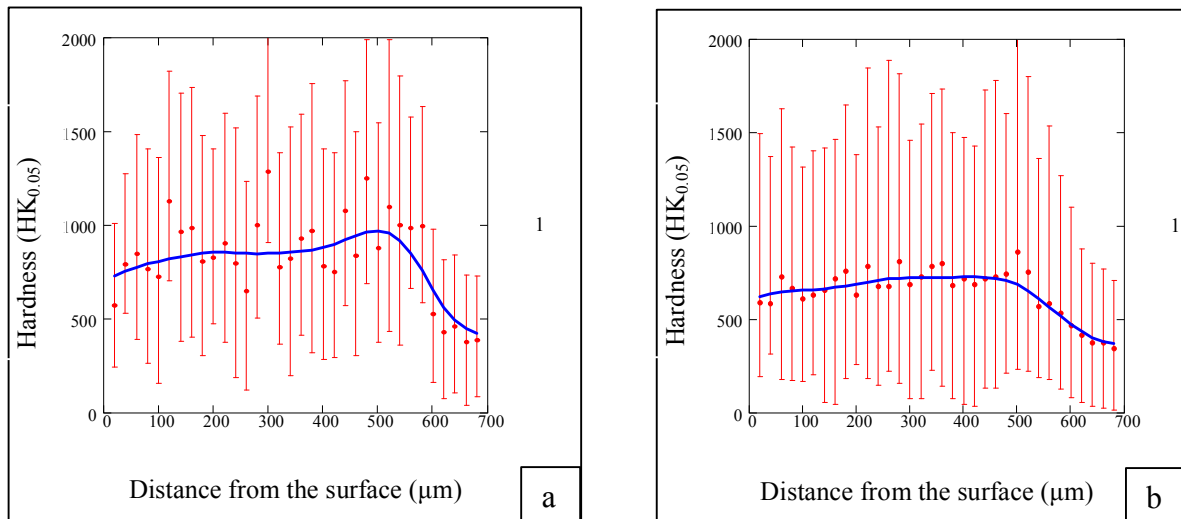


Figure 4. Microhardness profile for sprayed coating after smoothing: a) Sample N5; b) Sample N7

Observation was made during the measurement where the dark/black amorphous layers gave a low microhardness values in HK compared to the light layers. This illustrates that the variation of hardness is due to the different phases and chemical composition present at different position in the coating.

3.1.3. Differential Scanning Calorimetry

The effects of continuous heating process on the Nickel coating were investigated by using the DSC. The

microstructural properties and phase transformation behaviour of the deposit were found to be associated with the effects of the heating rate and temperature.

Figure 5 shows the DSC curves of the sample at heating rates of 5-50°C/min. Only one exothermic peak can be seen in each of the DSC curves on each sample and the peak temperature for crystallisation to take place were determined. Based on the relationship in equation (1), a linear regression line could be obtained from the plot $\ln(Tm^2/\phi)$ versus $(1000/RTm)$.

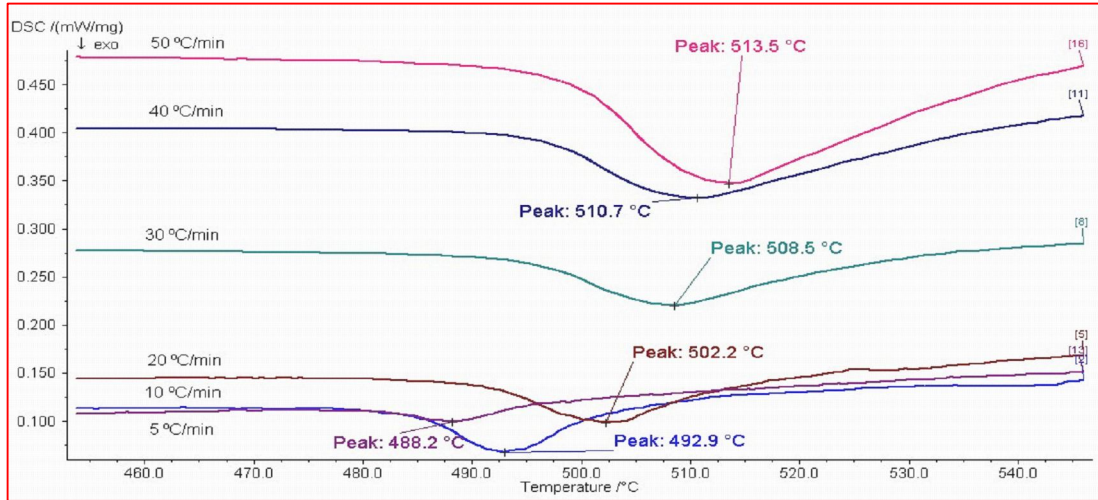


Figure 5. DSC curves of sample N7 at heating rates of 5-50°C/min

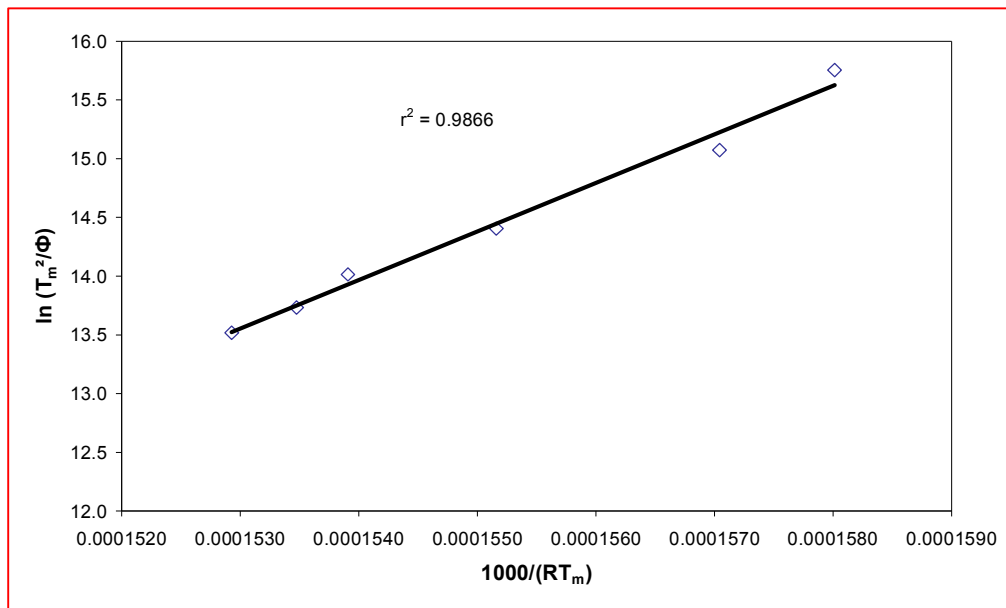


Figure 6. Slope of the plot $\ln(T_m^2/\phi)$ versus $(1000/RT_m)$ yielding the activation energy of sample N7 at maximum temperature of the DSC curves

The slope of this line yields the activation energy (Q) of the samples (Figure 6) [5].

$$(1) \quad \ln\left(\frac{T_m^2}{\phi}\right) = \frac{Q}{RT_m} + \ln\left(\frac{Q}{RK_0}\right) + \ln(\beta) ,$$

where ϕ is the heating rate in °C/sec, T_m is the maximum temperature (crystallisation temperature in °C, R is the gas constant 8.314 J/mol.K and K_0 and β are constants.

The activation energy (Q) of the nickel coating calculated from the slope is 414.3kJ/mol.

In addition, the increase of heating rate correspondingly increases the area of the DSC exothermic peaks. It should be mention that the area of the DSC exothermic peak is equivalent to the total amount of heat flow during crystallisation process.

From the area of the exothermic peaks, a new rela-

tionship can be established by finding the degree of transformation of amorphous phase to crystal phase. This can be done by calculating the ratio of integrated intensity of the area (S_1) to the total area of the exothermic peaks (S_0) (Figure 7).

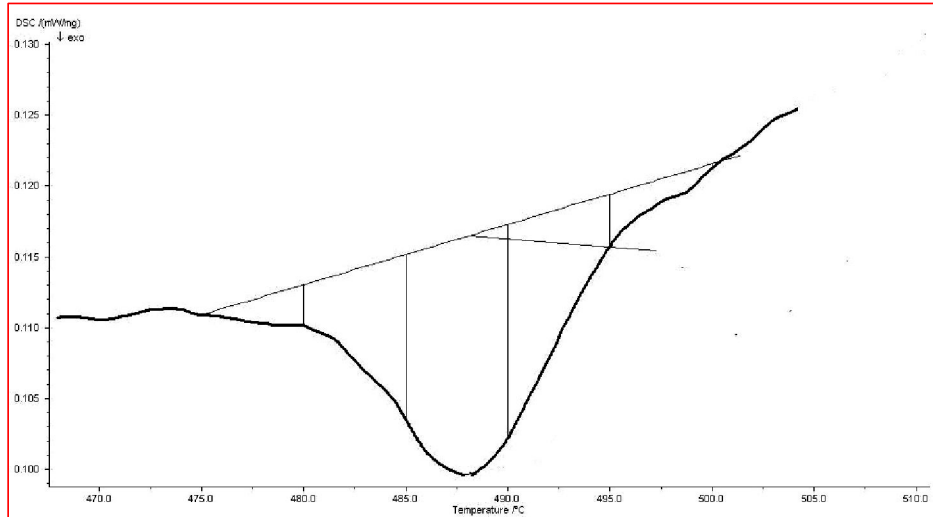


Figure 7. Graph of S_1 / S_0 (%) against temperature ($^{\circ}\text{C}$)

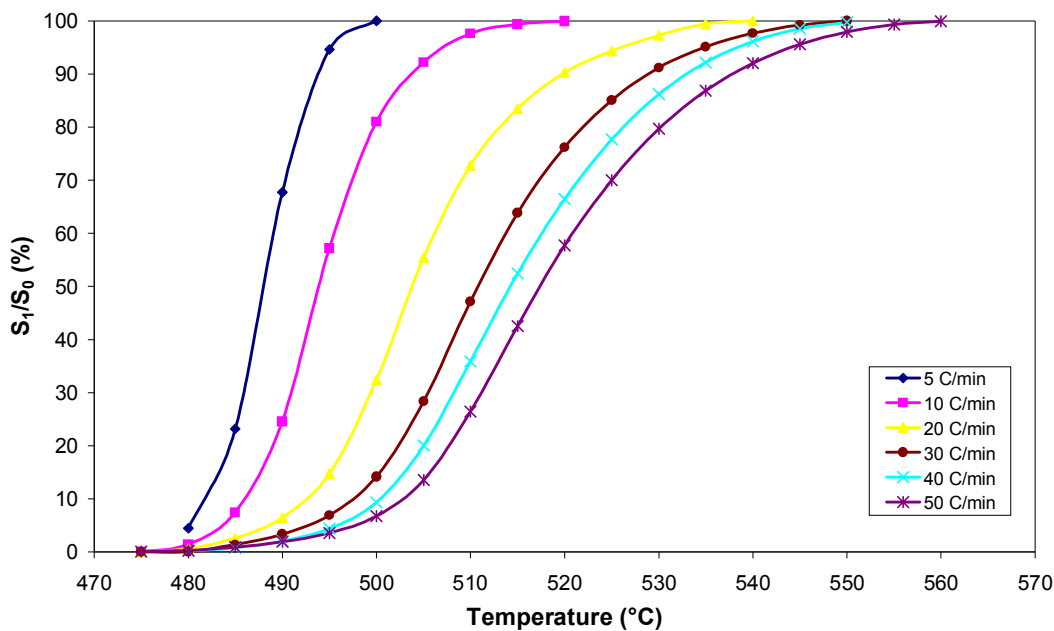


Figure 8. Variation of integrated intensity ratio (S_1 / S_0) over heating temperature

A graph of S_1/S_0 (%) against temperature ($^{\circ}\text{C}$) was derived from this relationship (Figure 8). The graph shows that the temperature required forming a required percentage of amorphous and crystal in the coatings can be controlled. For example, to get the percentage of 50% amorphous and crystal present at a heating rate of $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, a heating temperature up to $489^{\circ}\text{C}/\text{min}$ is needed.

This will applies to all the heating rates up to $50^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Modification was done by using the temperature of each heating rates at 50% phase transformation (Figure 8) producing new graph (Figure 9). A better and more reliable result is established. The activation energy (Q) of the nickel coating after modification from the slope (Figure 9) is $362.3\text{kJ}/\text{mol}$ which is more accurate than $414.3\text{kJ}/\text{mol}$.

3.1.4. X-ray Analysis

XRD were studied for sample N1-N7 to see whether the power used during the spraying process has any effect on the composition of the amorphous state in the coating. Figure 10 shows the XRD pattern of the as-coated nickel sample with a broad angular range amorphous profile, located at the 2θ position 40 - 50°. One high peak can be observed at the 2θ position located at 44 - 46°, four small peaks at 51- 53°, 76 - 78°, 91- 94° and 97- 98° approximately for all the samples. The presence of these broad-peak deflections and small-peaks indicates the coexistence of amorphous and crystalline nickel phases in the coating.

The crystalline phase is face centered cubic (fcc) structure. Apparently it is based on the fcc crystal structure of the Ni that is the major element in the powder used for spraying [6-9].

A relationship was established between the power of the spray condition with the ratio of the amorphous state in the coating. It shows that there is no effect on the ratio of amorphous state with the increase of power (Figure 11). This also applies to the width of the peaks on the amorphous state (d-spacing, Å) where it shows no effect with the increase in power (Figure 12).

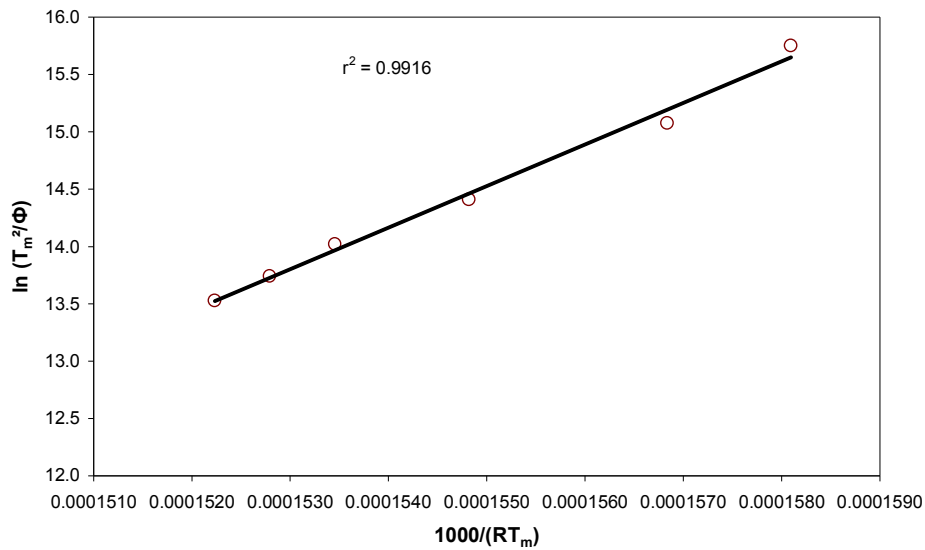


Figure 9. Modification of plot $\ln(T_m^2/\phi)$ versus $(1000/RT_m)$ yielding the activation energy of sample N7 at temperature of 50% of the phase transformation

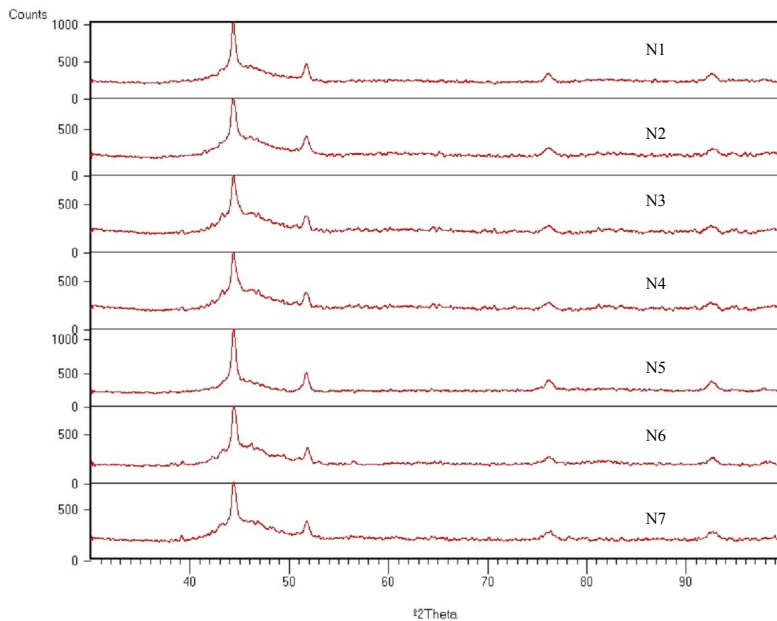


Figure 10. X-ray diffraction pattern for sample N1 ÷ N7 in as-coated conditions

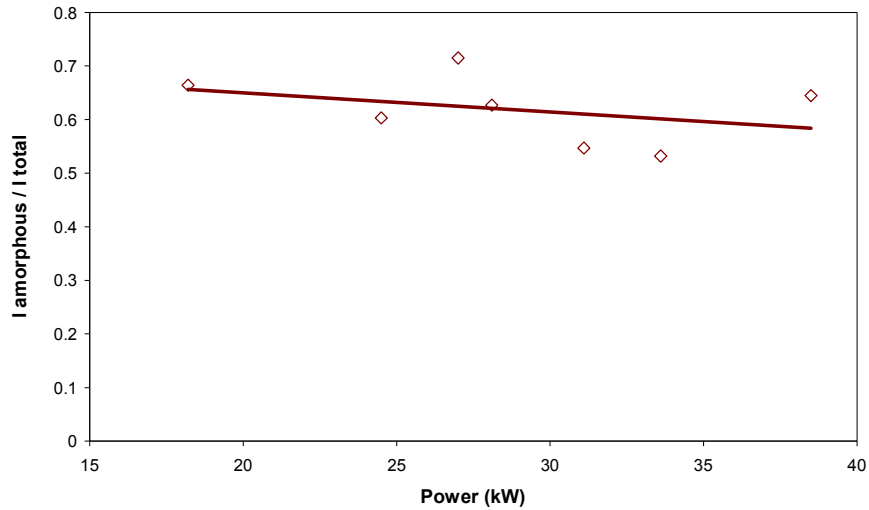


Figure 11. Relationship between ratio of amorphous state and power in as-coated conditions

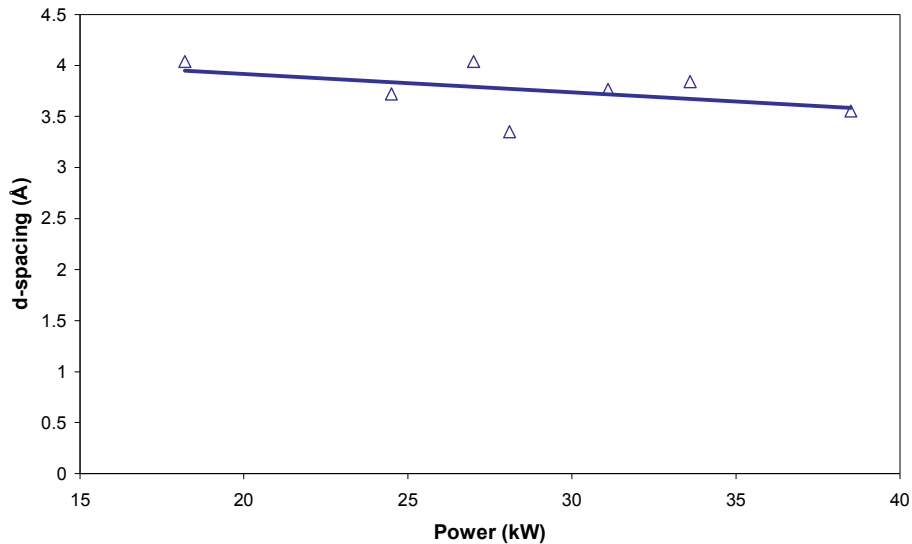


Figure 12. Relationship between d-spacing (Å) and power in as-coated conditions

3.2. After secondary heating

3.2.1. Microstructure

This study will be based on the formation of new phases when five samples from N7 were heated at a different temperature up to 565, 765, 965, 1035 and 1200°C.

Microstructure images were taken from the Nickel coatings at room temperature after the heating process. The samples were etched chemically before capturing the images.

The microstructures were studied and it shows that the microstructure of the coating does not change with

the increase of temperature up to 700°C (Figure 13a, 13b, 13c). The images can be considered to have the lamellar microstructure although changes can be seen from lighter to dark layers at temperature up to 700°C. However, with the further increase of temperature to 1200°C led to the formation from lamellar to homogenous structures (Figure 13d, 13e, 13f). The layers start to disappear and the rounded spherical shapes of non-melted particles are dissolved. With further heating up to 1200°C, the initial compound present in the layers gained enough energy to form a new compound having a new homogenous light grains with no lamellar layers. Pores are not visible.

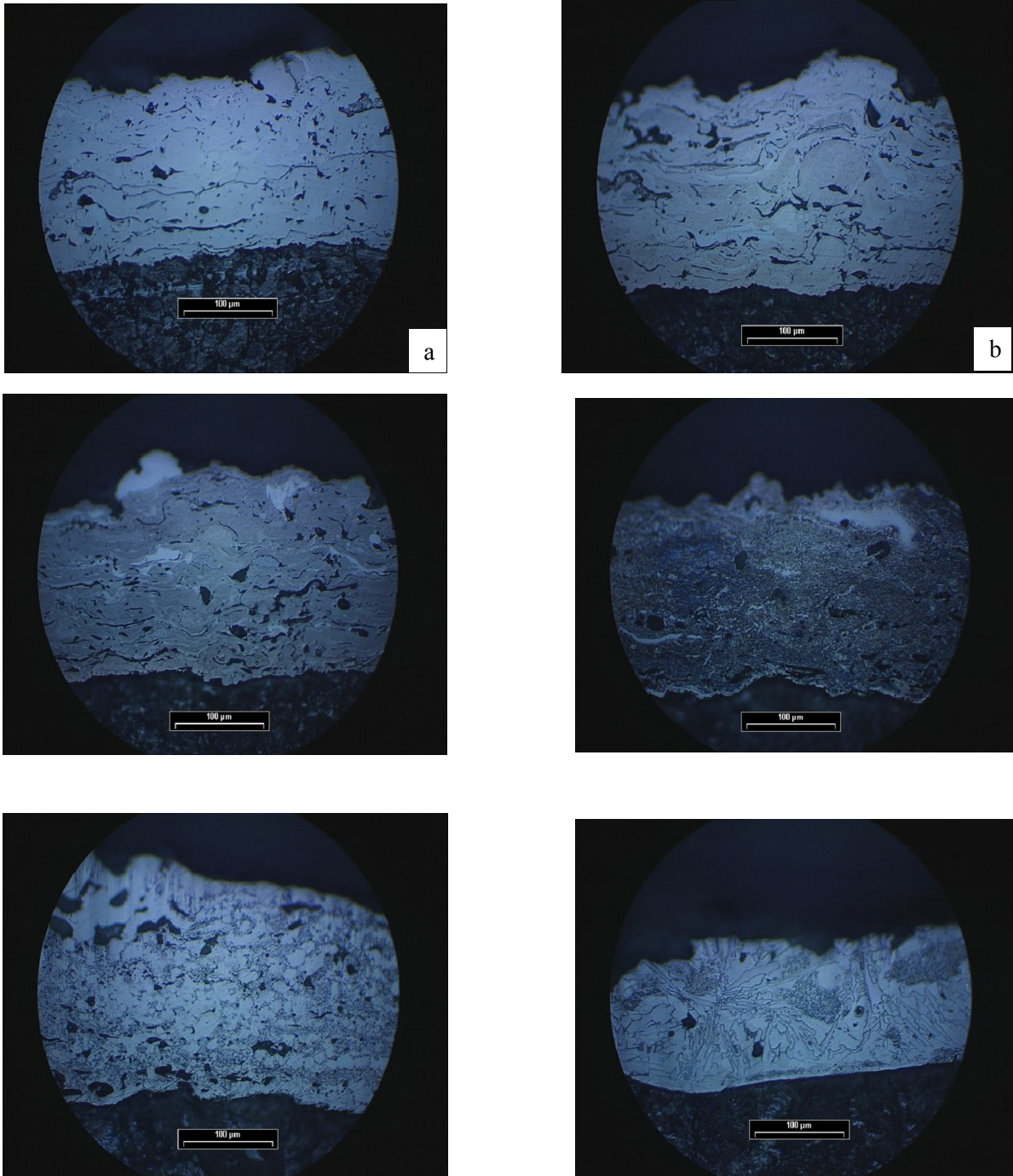


Figure 13. Microstructure of sample N7 after different heat treatments at magnification of x50: a) room temperature; b) 565°C; c) 700°C; d) 965°C; e) 1035°C; f) 1200°C

3.2.2. Microhardness

Vickers indenter was used with load of 1.0 kg for 5 seconds. The microhardness at the middle of the coatings was measured after the secondary heating. The heat treatment of sample N7 led to the improvement of the mechanical properties of the coating. A linear increase in microhardness can be observed after heating was carried out to a temperature of 700°C. The microhardness then

decreases after continuation of heat treatment to 1200°C (Figure 14). The measurement confirms that the homogenous structure formed after heat treatment from 700-1200°C has low microhardness (average 290 HV1.0) compare to the lamellar structure at room temperature (average 545 HV1.0) and lamellar structure heated to 700°C (685 HV1.0).

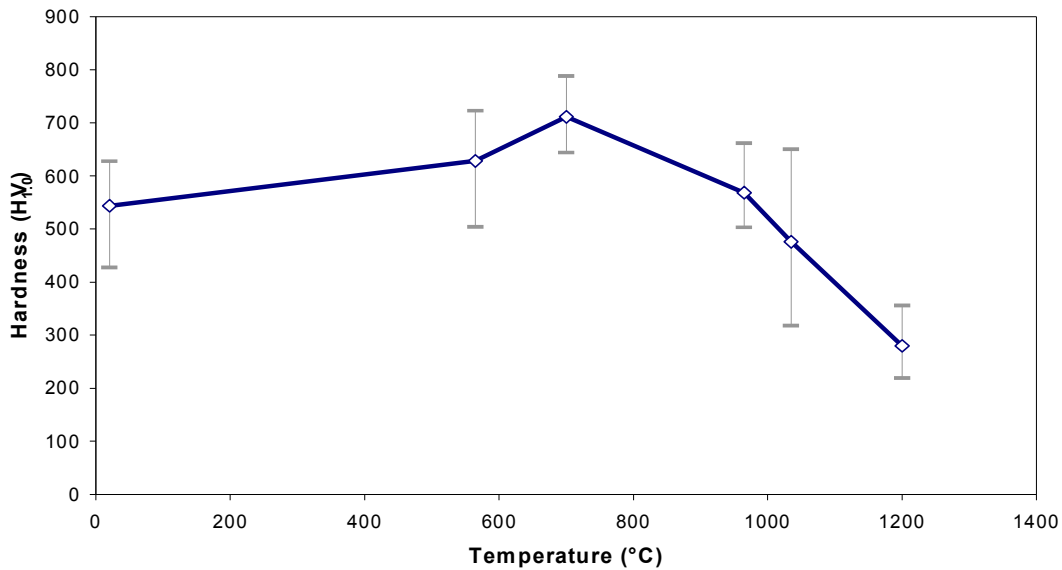


Figure 14. Microhardness of sample N7 after different heat

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The microstructure shows the heterogeneous nature typical for the plasma where layering and stacking of the coating can be seen. With the increase of power, different microstructure was observed. The boundaries start to disappear and the coatings approach homogenous layers. After secondary heating from 700-1200°C, led to the formation from lamellar to homogenous structures where the layers start to disappear and the rounded spherical shapes of non-melted particles are dissolved.

The hardness as-sprayed is low near the coating, and then increases at the middle but decreases rapidly as it reached the substrate. After secondary heating, the hardness increases up to 700°C but then decreases on further heating to 1200°C. The change of the phase composition and microstructure after secondary heating led to the change of the hardness.

One exothermic peak were observed in each of the DSC curves at different heating rates of 5-50°C/min. From the relationship of equation (1), activation energy of the nickel is 414.3 kJ/mol when the maximum temperature of each heating rates value was used. However, a more accurate activation energy value of 363.2 kJ/mol was calculated when the temperature for 50% of the phase transformation on each heating rates was used.

One high peak and broad peak with 3 small peaks was observed for all samples N1-N7 after x-ray analysis. The broad-peak and small-peaks deflection indicates the coexistence of the amorphous and crystalline nickel phase

in the coating. There are no relationship observed on the ratio of the amorphous and the width of the peaks of the amorphous state with the increase in power (kW).

REFERENCES

1. Н и к о в, Н. Влияние на електрода върху структурата на защитната струя. НК - 25 годишнина на ВМЕИ-Габрово, 1989, 125-127.
2. C h e n, W. L. T., E. Pfender, R. Spores, 'Power Metal Technologies and Application', ASM International, Materials Park, 1990, pp. 1065-1082.
3. D a v i s (ed.), J. R. Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics, ASM International, Materials Park, OH, 2002.
4. K e o n g, KG; W. Sha, S. Malinov. 'Crystallisation kinetics and phase transformation behaviour of electroless nickel-phosphorus deposit with 6-9wt% phosphorus content' Acta Metallurgica Sinica (English Letters) (China), vol. 14, no. 6, pp. 419-424, Dec. 2001.
5. N i c o v, N., V. Gencheva. An Analytic model for gas atmosphere composition round the arc in underwater welding, Inter ocean technology 1990, Poland -Szechen, 249-254.
6. N i c o v, N., V. Gencheva. Simulation of gas of shelled zone in semi-automatic underwater welding, Inter ocean technology 1990, Poland -Szechen, 271-280.
7. K u l u, P., S. Zimakov. Surf Coat tech 130 (2000) 46.
8. S k u l e v, H., S. Malinov, W. Sha, P.A.M. Basheer. Microstructural and Mechanical Properties of Nickel-base Plasma Sprayed Coatings on Steel and Cast Iron Substrates, Surface & Coatings Technology, Vol. 197, n. 2-3, (2005), pp. 177-184.
9. S k u l e v, H., S. Malinov, P. A. M. Basheer, W. Sha. Modifications of Phases, Microstructure and Hardness of Ni-based Alloy Plasma Coatings due to Thermal Treatment, Surface & Coatings Technology, Vol. 185, n. 1, (2004), pp. 18-29.