



ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНАТА СЪВМЕСТИМОСТ НА АСИНХРОННИ ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯ СЪС СИНУСОИДАЛНИ ФИЛТРИ В МАТЛАБ СРЕДА

ИВАН КОСТОВ, ГЕОРГИ ИВАНОВ

Резюме: В статията са показани резултати от оценката на хармоничния състав на напрежението в изхода на преобразувателя на честота в асинхронни честотни електрозадвижвания. Получен и анализиран е хармоничният състав на напрежението на трифазен захранващ преобразувател на честота със синусоидална ШИМ и силов синусоидален филтър. Достоверността на получените резултати е потвърдена с помощта на симулационни процедури на верификация чрез синтез и по експериментален път. Получените по експериментален път резултати са сравнени с резултати от моделиране. Дадени са насоки на бъдещи изследвания.

Ключови думи: асинхронен двигател, синусоидален филтър, EMC.

STUDY ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF INDUCTION DRIVES WITH SINUSOIDAL FILTERS IN MATLAB ENVIRONMENT

IVAN KOSTOV, GEORGI IVANOV

Abstract: The article shows the results of the evaluation of the harmonic composition of the output voltage of the frequency converter in the frequency controlled induction motor drives. Obtained and analyzed the harmonic composition of the three-phase AC voltage frequency converter with sinusoidal PWM and power sine-wave filter. Accuracy of the results is confirmed with simulation verification procedures by synthesis and experimental way. Experimentally obtained results were compared with results from simulations. Here are directions for future research.

Key words: induction, motor, sine-wave filters, EMC.

1. Въведение

Асинхронните двигатели (АД), работещи с преобразуватели на честота (ПЧ) са поставени в условия на експлоатация, различни от тези при експлоатация с напрежението на захранващата мрежа [3,4,6]. Това води до отклонение в

качеството на преобразуване на енергията в двигателите [5]. ПЧ имат безспорни предимства, но и редица недостатъци, незабележими на пръв поглед. Сред тях са високата скорост на нарастване на напрежението и тока в изхода на преобразувателя. За да се осигурят оптимални

динамични характеристики и да се намали нивото на загубите, ПЧ работят с правоъгълни импулси със стръмни фронтове на нарастване - типично 15kV/ms и 2kA/ms. Колкото по-кратко е времето на превключване, толкова по-малко количество топлинна енергия ще разсейва силовият ключ. При по-добър температурен режим и по-малки габарити и тегло на ПЧ нараства нивото на електромагнитните смущения, възникващи при комутацията. До неотдавна синусоидални филтри се поставяха само на мощни и свръхмощни устройства с мотива, че не е изгодно маломощните устройства да се усложняват и оскъпяват излизащо. Към днешна дата ситуацията е променена. Нивото на хармониците, генерирани от ПЧ, е регламентирано с редица стандарти - IEEE519, EN55022, CISPR22. Прякото въздействие на модулираното напрежение се изразява в ускорено износване на изолацията и лагерите, намаляване на въртящия момент, увеличаване на вибрациите и нагряването на намотката на двигателите. Независимо че съвременните ПЧ имат вградени мрежови филтри и оптимизирана топология на сигналните и измерителните вериги, в редица приложения работата им не съответства на стандартизационните изисквания. Именно по тази причина се използват външни синусоидални филтри, които могат да бъдат от активен и пасивен тип. Те подобряват параметрите на ЕЗ защото притежават редица предимства:

- подтискат високочестотните компоненти;
- увеличават допустимата дължина на използвания захранващ кабел;
- допускат използването на неекраниран кабел;
- не излъчват вредни електрически и електромагнитни емисии;
- позволяват избягване на текущите пикове в напрежението;
- намаляват шума на двигателите;
- позволяват експлоатацията на стари двигатели;
- удължават живота на лагерите;
- подобрява се топлинният режим на машините.

Като недостатъци на филтрите може да бъде посочено, че:

- големите дросели, използвани във синусоидалните филтри, понякога се нуждаят от компенсация;
- ПЧ трябва да осигури по-високо напрежение на входа на филтъра, поради пада на напрежение (5-30%) в него;
- активните синусоидални филтри изискват отделно електрозахранване и софтуер.

Целта на статията е да се получи количествена интегрална оценка на показатели

на захранващото напрежение на АД в електрозадвижвания с ПЧ. В статията са представени резултати от реализирани симулационни процедури и извършени експерименти за количествена оценка на хармоничния състав на напрежението на асинхронни двигатели, захранвани с преобразуватели на честота със синусоидална ШИМ. Модулационната честота на изследването е постоянна и равна на 5 kHz, изходното напрежение на ПЧ е неизменно, изходната честота на напрежението на двигателя е между 50 Hz и 120 Hz. Извършено е допълнително изследване за влиянието на пасивни силови филтриращи елементи върху хармоничния състав. Процедурите са осъществени чрез модели за интегрална оценка на хармоничния състав на модулирано напрежение и за синтез на захранващо напрежение. Моделите са разработени с математични методи на основата на класическата теория на хармоничния анализ [3], потвърдени със симулиращи програми и чрез експерименти. Крайните резултати са представени в графичен вид.

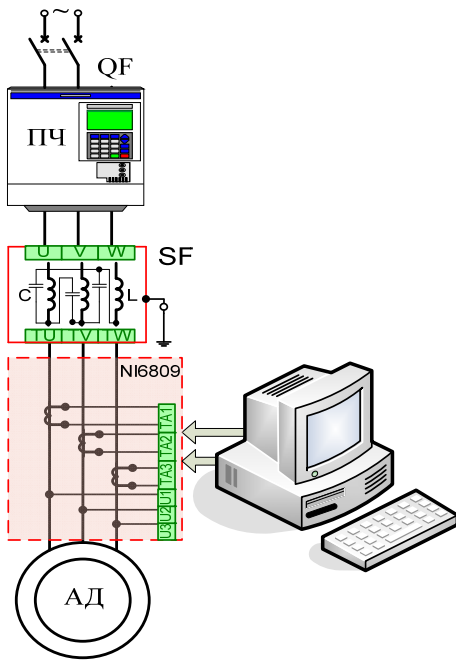
2. Синтез на модулирани периодични сигнали

За оценка на хармоничния състав на захранващото напрежение на двигателя са разработени симулационни модели на електрозадвижване (ЕЗ) и еквивалентна лабораторна установка – фиг. 1, състоящи се от трифазен захранващ източник на напрежение ПЧ със синусоидална ШИМ, трифазен синусоидален филтър SF, измервателна платка NI6809 и АД с номинални данни и параметри от [1].

Моделът на честотното асинхронно електрозадвижване се състои от идеализиран трифазен източник на модулирано променливо напрежение, силов синусоидален филтър и асинхронен двигател. Захранващият източник работи със синусоидална ШИМ, модулационна честота $f_c = 5 \text{ kHz}$ и максимална стойност на постоянното напрежение $U_{DC} = 310 \text{ V}$. Синусоидалният филтър е с параметри: $R_L = 0.15 \ \Omega$; $L = 30 \text{ mH}$; $C = 1 \ \mu\text{F}$. Ефективната стойност на фазното напрежение след филтъра е 124 V при 50 Hz. Моделът на АД с $P_N = 750 \text{ W}$; $U_N = 380 \text{ V}$; $f = 50 \text{ Hz}$; $Z_p=2$ е реализиран с помощта на Т-образна заместваща схема с постоянни параметри без отчитане на насищането: $R_s = 10.2 \ \Omega$; $L_s = 0.061 \text{ H}$; $R_r = 10.52 \ \Omega$; $L_r = 0.061 \text{ H}$; $L_m = 0.457 \text{ H}$.

Моделът на трансформацията на Фурие представлява подсистема в среда на

MATLAB/Simulink чрез която се анализира периодичния сигнал до 13^{-ия} хармоник. Синтезът



Фиг. 1. Схема на лабораторната установка

на периодичния сигнал се осъществява със синусоидални генератори. Максималното време на стъпката на квантоване в модела е ограничено на 10 μ s. Математичното преобразуване на Фурие за синтеза на синусоида се реализира с изразите [2]:

$$u(t) = \sum_{v=1}^{v=13} U_{vm} \sin(v\omega t + \Psi_v) \quad (1)$$

$$U_{vm} = \sqrt{U_{Avm}^2 + U_{Bvm}^2} \quad (2)$$

$$\Psi_v = \arctg(U_{Avm}/U_{Bvm}) \quad (3)$$

За оценка на качеството на модулираното напрежение в изхода на ПЧ се използват изразите [2] за нелинейните изкривявания (4) и за деформиране (5):

$$k_{THD} = U_1^{-1} \sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2} \quad (4)$$

$$k_{HVF} = U_1^{-1} \sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v}} \quad (5)$$

В изразите:

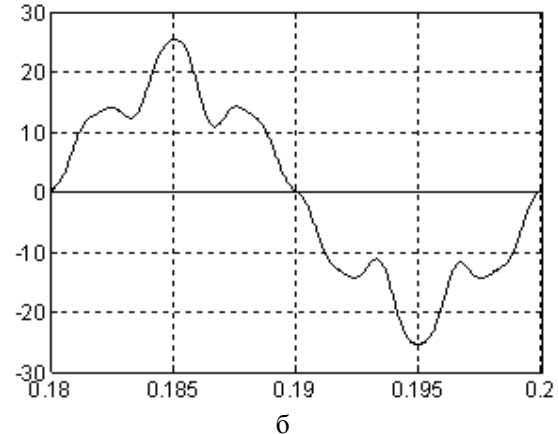
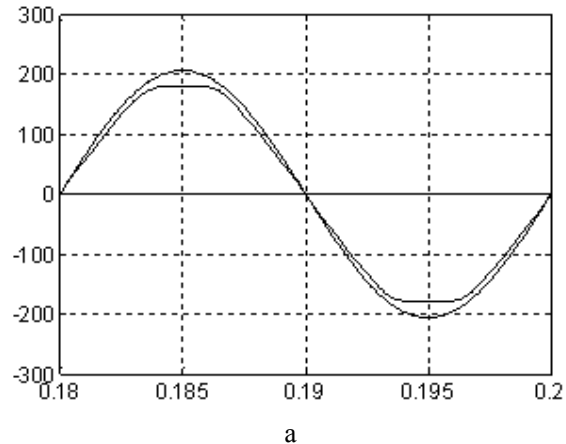
- U_{Avm}, U_{Bvm} - коефициенти на Фурие [1];
- U_{vm} - амплитуда на v -ия хармоник; Ψ_v - ъгъл на v -ия хармоник; $\omega = 2\pi f$ - ъглова скорост на основната честота; U - ефективна стойност на напрежението; U_1 - ефективна стойност на първия хармоник на напрежението.

3. Проверка

Проверката има две страни – симулационна и експериментална. Симулационната проверка цели установяване на съответствие между измерени и синтезирани напрежения в модела. Поради ограниченото бързодействие на измервателната платка (250 μ s стъпка на дискретизация) оценките на ШИМ сигнала са осъществени само за симулираните величини и са ограничени до 13^{-ия} хармоник. Експерименталната проверка е осъществена при честота $f = 50$ Hz на изходното напрежение на преобразувателя. Чрез измервателната платка напрежението след филтъра SF се въвежда в компютъра и се обработва в съответствие с (1) ÷ (3), като числените стойности на хармоничните съставлящи преди това са получени чрез процедурите, предложени в [1].

3.1. Симулационна проверка

На фиг.2а са показани зависимостта на напрежението на ПЧ и сумата от хармоничните на ШИМ-модулираното напрежение на ПЧ от времето. На фиг.2б е показана разликата между двете напрежения.

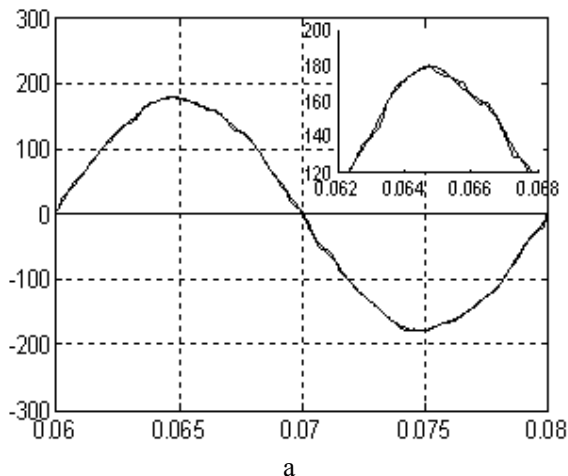


Фиг. 2. Напрежение на зададената синусоида и на синусоида на изхода на модела на ПЧ (а); грешка между двете (б). $U, V; t, s$

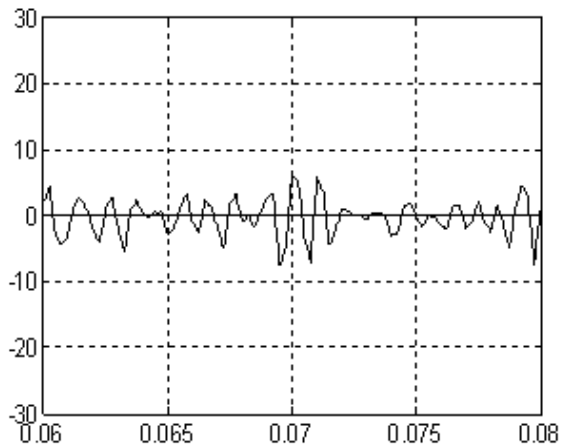
Получени резултати от измерването на напрежението на изхода на модела: $K_{THD} = 0.0236$ и $K_{HVF} = 0.0099$.

3.2. Експериментална проверка.

На фиг.3а,б е показана зависимостта на измереното и синтезираното напрежение на опитната постановка, и грешката им от времето.



а



б

Фиг. 3. Напрежение на измерената и на синтезираната синусоиди на напрежението от опитната постановка след SF (а); грешка между двете (б). $U, V; t, s$

Получени резултати от измерването на напрежението след SF: $K_{THD} = 0.022021$; $K_{HVF} = 0.008861$.

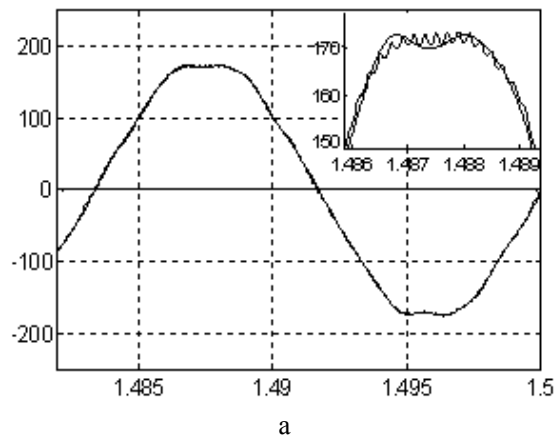
4. Експериментална част

В този раздел са показани резултати от синтеза на захранващо напрежение на двигателя при различни честоти и постоянна големина на изходното напрежение на ПЧ чрез симулиране на експерименти с модела на ЕЗ.

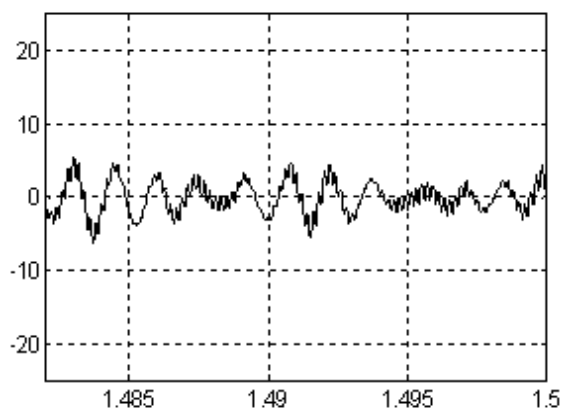
4.1. При честота на изходното напрежение $f = 60$ Hz.

На фиг.4а,б е показана зависимостта на измереното и синтезираното напрежение на

синусоидите на модела, и тяхната грешка от времето при $f = 60$ Hz.



а



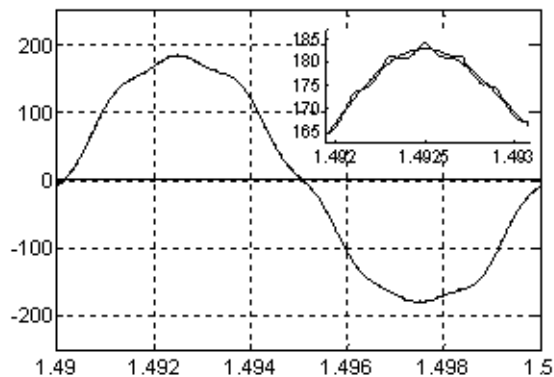
б

Фиг. 4. Напрежение на измерената и на синтезираната синусоиди на модела след SF (а); грешка между двете (б). $U, V; t, s$

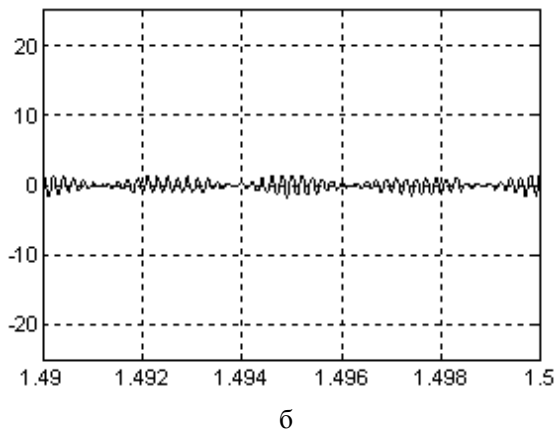
Получени резултати от измерването на напрежението след SF: $K_{THD} = 0.02796$; $K_{HVF} = 0.011283$.

4.2. При честота на изходното напрежение $f = 100$ Hz.

На фиг.5а,б е показана зависимостта на измереното и синтезираното напрежение на синусоидите на модела, и тяхната грешка от времето при $f = 100$ Hz.

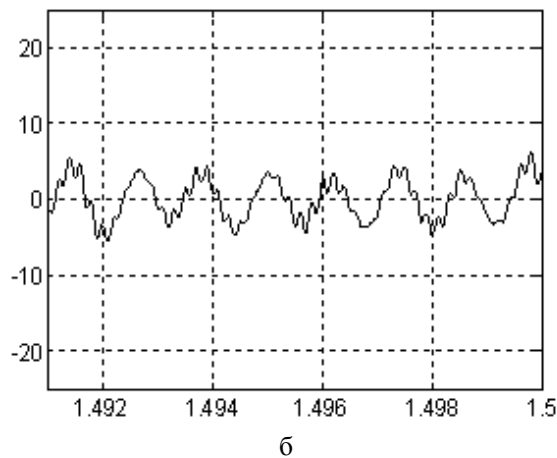
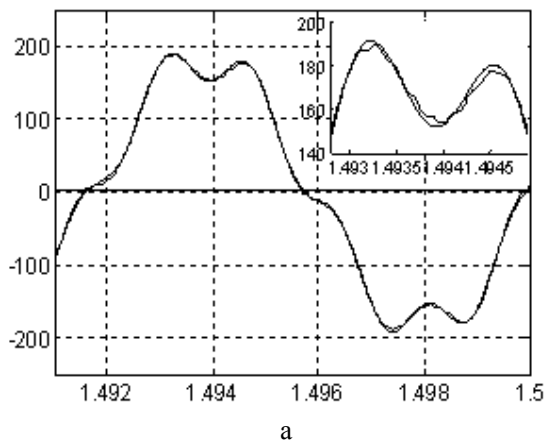


а



Фиг. 5. Напрежение на измерената и на синтезираната синусоида на модела след SF (а); грешка между двете (б). $U, V; t, s$
Получени резултати от измерването на напрежението след SF: $K_{\text{THD}} = 0.056453$; $K_{\text{HVF}} = 0.023466$.

4.3. При честота на изходното напрежение $f = 120 \text{ Hz}$.



Фиг. 6. Напрежение на измерената и на синтезираната синусоида на модела след SF (а); грешка между двете (б). $U, V; t, s$
На фиг.6а,б е показана зависимостта на измереното и синтезираното напрежение на

синусоидите на модела, и тяхната грешка от времето при $f = 120 \text{ Hz}$.
Получени резултати от измерването на напрежението след SF: $K_{\text{THD}} = 0.158529$; $K_{\text{HVF}} = 0.070854$.

5. Заключение

Претенции

Синтезирани са изчислителни процедури за оценка на хармоничните, потвърдени чрез синтез на сигнали и чрез експерименти.
Създаден е модел и лабораторна установка на честотно електрозадвигване с АД и синусоидален филтър.
Потвърдена е адекватността на създадения модел на ЕЗ със синусоидален филтър и са проведени експериментални изследвания с лабораторната установка.

Изводи

Процедурите са приложими за оценка на хармоничния състав на изходното напрежение на ПЧ за целите на експлоатацията и за изпитване на АД.

Разработените модели могат да работят както с данни от експерименти, така и с данни от симулации.

От гледна точка на експлоатацията с дълги захранващи проводници и на изпитването на двигателите, работата със синусоидални филтри е за предпочитане, защото това намалява условията за развитие на пренапрежения на клемите на двигателя и подобрява условията за измерване на токовете и напреженията.

Получените експериментални резултати след синусоидалния филтър обаче показват, че във връзка с ограниченията в [1], се налага ограничаване на изходната мощност на двигателя, особено при честоти над 100 Hz .

Оценката на прякото въздействие на синусоидалната ШИМ върху изходната мощност на двигателя също се нуждае от допълнителни изследвания, особено при честоти по-високи от 100 Hz .

Подходът за понижаване на шумовете в ЕЗ с ПЧ с помощта на синусоидални филтри, включени преди и след ЧИ е стандартен, но това води до увеличаване на габарита на цялото устройство и съществено нарастване на цената му. Въпреки това подходът е с доказана ефективност – счита се, че е по-добре да бъдат предприети превантивни мероприятия с цел изходното напрежение се доближи максимално до синусоида.

Насоки на бъдещи изследвания

Работата по тази задача е основа за по-задълбочени изследвания в тази посока, по-важните от които са:

- провеждане на допълнителни експерименти с цел оценка на въздействието на високите честоти и натоварването на двигателя върху показателите на хармоничния състав на напрежението и тока;

- разработване на инженерни методи за проектиране на синусоидални филтри и изследване на тяхната работа в несъгласуван режим. Проверка на възможността за използване на маломощни филтри от първи ред (апериодични звена) за измерване на хармоничните на периодичния сигнал;

- създаване на имитационни модели на ПЧ (със захранваща мрежа, изправител и междинно звено за постоянен ток, инвертор на напрежение);

- анализ и на други ШИМ – трапецовидни, триъгълни, векторни;

- оценка на влиянието на свързването на двигателя към ПЧ и на несиметрията на мрежовото напрежение върху показателите на хармоничния състав на напрежението и тока.

Благодарности

Статията е осъществена с финансовата подкрепа на НИС на ТУ-София чрез проект № 122ПД0031-19 от 09.05.2012 г. на тема *Развойна платформа за цифрово управление на асинхронно електрозадвижване*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костов И., Ш. Узунов, Т. Ангелова, Е. Мустафа, Теоретичен анализ и моделиране на хармоничния състав на напрежението в асинхронни честотни електрозадвижвания, *Съюз на учените в България, Научни трудове серия В - Техника и технологии, т.9*, Пловдив, 2012 г., стр. 136-140.

2. Костов И., Г. Иванов, Изследване на електромагнитната съвместимост на асинхронни електрозадвижвания със синусоидална ШИМ в МАТЛАБ среда, *Международна конференция Автоматика 2012, ФА, 1-4 юни, 2012, Созопол, България*, Годишник на ТУ-София, том 62, книга 2, 2012 номер 48, страници 429-437, ISSN 1311-0829.

3. Das J., M. Dekker, Power System Analysis: Short – Circuit Analysis and Harmonics, New York, 2002.

4. Lundquist J., On Harmonic Distortion in Power Systems, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden, 2001.

5. Oraee H., S. Filizadeh, The Impact of Harmonic Order on Insulation Aging in Electric Motors, *36th Universities Power Engineering Conference, UPEC – 2001*, UK, Sept. 2001.

6. Watson N. R., B. C. Smith, J. Arrillaga, A. R. Wood, Power System Harmonic Analysis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, John Wiley & Sons, New York, 2000, ISBN 0 471 97548 6.

Control Systems Department
Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
25 Tsanko Dyustabanov St.
4000 Plovdiv
BULGARIA
E-mail: ijk@tu-plovdiv.bg
E-mail: georgi.iwanow@gmail.com

Постъпила на

Рецензент