

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ КАТЕДРА „ТЕОРЕТИЧНА И ИЗМЕРВАТЕЛНА ЕЛЕКТРОТЕХНИКА“

маг. инж. Андрей Димитров Андреев

АНАЛИЗ НА ЕЛЕКТРОДИНАМИЧНИТЕ ПРОЦЕСИ В ПОЛЯРИЗАЦИОННИ РАЗХОДОМЕРИ

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за получаване на образователна
и научна степен „доктор“**

Научна специалност: „Теоретична електротехника“
шифър: 02.04.01

Научни ръководители: доц. д-р инж. Емил Иванов Панов
Проф. д.т.н. инж. Румена Димитрова Станчева

Рецензенти:

1.
2.

**Варна
2017 г.**

Дисертационният труд е обсъден на 20.06.2017 г. в катедра “Теоретична и измервателна електротехника” на разширен катед-рен съвет, съгласно заповед на ректора на ТУ-Варна № и насочен за защита.

Докторантът работи в катедра “Теоретична и измервателна електротехника”.

Автор: маг. инж. Андрей Димитров Андреев

Заглавие: Анализ на електродинамичните процеси
в поляризационни разходомери

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

**ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА „ТЕОРЕТИЧНА И ИЗМЕРВАТЕЛНА
ЕЛЕКТРОТЕХНИКА“**

маг. инж. Андрей Димитров Андреев

**АНАЛИЗ НА ЕЛЕКТРОДИНАМИЧНИТЕ
ПРОЦЕСИ В ПОЛЯРИЗАЦИОННИ
РАЗХОДОМЕРИ**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за получаване на образователна
и научна степен “ДОКТОР”**

Научна специалност: „Теоретична електротехника“
шифър: 02.04.01

**Варна
2017 г.**

Дисертационният труд съдържа 151 страници, включително 33 фигури и 3 таблици, оформени в 4 глави, изводи и резултати към всяка глава и списък на използваната литература от 119 заглавия, от които 30 на кирилица и 89 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на от ч. в на открито заседание на жури, сформирано със заповед на Ректора №/..... г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересувашите се във ФД “Докторанти”, стая 318 НУК.

ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема. Разходът е един от основните работни параметри, определящи както скоростта на технологичните процеси, така и ефективността при експерименталните изследвания. Контрол на разхода на течности и газове се провежда в различни отрасли на промишлеността. Известни са около двадесет метода за измерване на разход и въпреки това нуждите на производството все още не са напълно обезпечени. От една страна съвременните изисквания предявявани към уредите за измерване на разход, тяхното многообразие и сложност, се явяват причина за разработване на голямо количество нови методи и устройства за измерване на разход. От друга страна голямото разнообразие в процесите, физическите и химическите свойства на измерваните среди и широкия работен диапазон налагат използването на различни методи и уреди. Всеки от тях намира определена област на приложение. С развитието на автоматизацията все по-голямо значение придобива видът на изходния сигнал на преобразувателя на разход. Електромагнитните разходомери съчетават в себе си предимствата на електрическия изходен сигнал и липсата на контакт между преобразувателя и измервания флуид. Поради това, в момента те се считат за най-перспективни.

Понастоящем, един сериозен технически проблем е необходимостта да се разшири обсега на приложение на електромагнитните преобразуватели в изключително важната област на промишлено измерване разхода на диелектрични течности, по-специално на такива с голям вискозитет. Тази група включва по-голямата част от продуктите на нефтената, химическата, хранително-вкусовата промишленост и енергетиката. Научният интерес към този тип преобразуватели нараства все повече. В подкрепа на това твърдение е например фактът, че прегледът на техническата литература за последните 15 години в реномираното издателство Elsevier дава като резултат 864 броя публикации в тази област. Една много голяма част от тях с все по-увеличаващ се брой, особено през последните години, е ориентирана към изследвания и резултати, насочени към подобряване на функциите и оптимизация на поляризационни разходомери; нови модели разходомери с особености, включително отнасящи се до изясняване на нови ефекти; както и научни работи с конкретни оптимизационни изследвания и задачи за реконструкция в областта на електромагнитните преобразуватели.

Проблем. Основен проблем е точното определяне разхода на диелектричен флуид, преминаващ през преобразувателя. За съжаление, са налице съществени празноти, най-вече поради фирмени и патентни тайни, в областта на теоретичния и на числения анализ на поляризационните преобразуватели за измерване разхода на диелектрични течности, особено на такива с голям вискозитет. При решаването на този проблем трябва да се има пред вид, че всички изчислителни процедури, отнасящи се до подобряване функционалните характеристики на проектирания разходомер, са успешни само при наличието на достоверни аналитичен и числен модел.

Обект на изследването. Поляризационни преобразуватели за измерване разхода на диелектрични течности с голям вискозитет – магнитоелектрични и електромагнитни. Основният интерес и съществената група изследвания са ориентирани по-специално към електромагнитните преобразуватели за измерване на разход, тъй като тази група се счита за значително по-перспективна.

Предмет на изследването. Достоверни аналитични и числени модели на електромагнитните процеси в поляризационните преобразуватели и следваща стъпка – подобряване на работните условия и качеството на входно-изходните характеристики на тази група устройства.

Цел на изследването. ЦЕЛТА на дисертационната работа е свързана с *усъвършенстване на поляризационните преобразуватели за измерване разхода на диелектрични течности и може да се формулира, както следва:*

❖ ДА СЕ ИЗВЪРШИ ПРЕЦИЗЕН ТЕОРЕТИЧЕН АНАЛИЗ И ДА СЕ РАЗРАБОТЯТ ДОСТОВЕРНИ АНАЛИТИЧНИ И ЧИСЛЕНИ МЕТОДИ, КАКТО И ОПТИМИЗАЦИОННИ АЛГОРИТМИ ЗА ПОДОБРЯВАНЕ НА ВХОДНО-ИЗХОДНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ТОЗИ ТИП ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.

Необходимите предпоставки за постигане на тази цел са следните:

1. Сравняване на аналитични и числени резултати за един и същ обект, работещ при еднакви условия. Така проверената адекватност на моделите осигурява възможност за следващата стъпка-усъвършенстване с подобряване на технически показатели и изходни характеристики;
2. Качеството на получените аналитични и числени резултати да бъде на такова ниво, че да послужи като база за извършване на оптимизационни изследвания с цел да се повиши ефективността и точността на измерване разхода на диелектрични флуиди чрез повлияване чувствителността на уреда.

Задачи на изследването: Набелязани за решаване са следните по-съществени *задачи*:

1. Да се формулират и разработят аналитични модели на електромагнитните процеси с цел получаването на работещи входно- изходни връзки в поляризационни разходомери, както с възбуждащо електрическо, така и с възбуждащо магнитно поле.
2. Да се формулира и реши обратна полева задача, чието решение води до подобряване хомогенността на електрическото поле на магнитоелектричните преобразуватели в областта на диелектрика.

3. Да се формулира и разработи числен модел на електромагнитните процеси в електромагнитните разходомери.
4. Да се провери достоверността на предложения аналитичен модел на процесите в електромагнитните преобразуватели чрез сравняване на получените по аналитичен и по числен път резултати за изходния сигнал;
5. Да се уточни влиянието на някои геометрични и електромагнитни параметри върху електромагнитните процеси, с оглед отчитане степента на тяхното въздействие върху точността на измервателните уреди.
6. Да се формулират и решат обратни полеви задачи за електромагнитните преобразуватели с цел получените решения да водят до увеличаване на изходния сигнал. Необходимата за това промяна в структурата на резултатното поле в диелектрика да се потърси при:
 - а) оптимално разпределение на външното възбудително магнитно поле на преобразувателя;
 - б) оптимална форма на напречното сечение на преобразувателя.

Място на изследването. Катедра „Теоретична и измервателна електро-техника“ на ТУ-Варна.

Методи на изследване. Голяма част от изследванията са от вида теоретично-аналитични, базиращи се на класическите методи за анализ на електромагнитното поле и механика на флуиди. Свързани са с изграждането на прецизни аналитични модели, които след проверка за достоверност са база за решаване на оптимизационни и обратни задачи. Анализът почива на основни уравнения на електромагнитното поле в бавнодвижещ се диелектричен флуид, отчитане на физическите характеристики на средата, използване възможностите на математическата физика за преобразуване и решаване на получените диференциални уравнения и определяне на голям брой интеграционни константи в зависимост от граничните условия и физиката на изследваните полета.

Численият анализ е извършен с помощта на метода с крайните елементи, МКЕ. Разработен е числен модел при специално модифицирано уравнение за анализ, уточнени гранични условия и хидродинамични особености.

Подготовката за решаване на оптимизационни и обратни задачи е свързана със свеждане на реалния физически проблем до неговото формално математизиране и алгоритмизация с използване на планиране на експеримента и методологията с повърхности на отклика. Оптимизационната задача се формулира математически като задача на нелинейното програмиране при наличие на ограничения. Обратните и оптимизационни задачи се решават като се използва числената процедура с гъвкав допуск.

Използваното програмно осигуряване се базира на комерсиалните софтуерни продукти: Quick Field Finite Element Analysis System, Version 5.6 и Matlab R2011b.

Научна новост на изследването. Аналитично са изведени входно-изходните връзки между външния възбудител и обусловената от него реакция на поляризационен преобразувател (магнитоелектричен, електромагнитен); Формулирана и решена е обратната полева задача за хомогенизиране на електрическото поле в диелектрика на магнитоелектричен преобразувател; Формулиран и разработен е числен модел на електромагнитен преобразувател на базата на: модифицирано уравнение, дефиниращо връзките между полетата в диелектрика при уточнени гранични условия и разработена числена процедура по МКЕ; Изследвано е влиянието на редица фактори, въздействащи върху нормалното функциониране на електромагнитните разходомери за диелектрични течности; При целева функция, водеща до получаването на изходен сигнал с екстремална стойност или увеличена чувствителност на устройството са предложени, разработени и приложени за изследване два оригинални алгоритъма за оптимизация:

- за определяне оптималното разпределение на възбудително магнитно или електрическо поле, което гарантира екстремална стойност на изходния сигнал на електромагнитното устройство;
- за определяне оптималната конфигурация на работната (или наблюдавана) област на изследвано електротехническо устройство.

Практическа ценност на изследването. Разработените достоверни аналитични и числени модели на поляризационни преобразуватели, може да послужат като база за допълнителни практически изследвания и анализи; Предложените оригинални алгоритми за решаване на обратни задачи в областта на електромагнитното поле може да бъдат приложени и при други физически полета от областта на: механиката (напр.обработка на инструменти), разпределението на температурни полета (напр.концентрация на зададена температура в определена област) и пр. Критерият за оптималност е свързан с повишаване чувствителността на устройството, подобряване на неговите изходни характеристики, синтез на електромагнитно поле с определена структура.

Дисертационният труд притежава същевременно и качествата на учебно-методичен материал, поради достъпното и методически последователно представяне на изследваните проблеми, детайлно описаните алгоритми и числени процедури, както и разгледаните конкретни примери за анализ и оптимизация. Посочените качества позволяват разработеният материал да бъде използван за обучението на инженерни кадри, притежаващи основна електротехническа и математическа подготовка.

Апробация на изследването. Основните теоретични и приложни резултати от дисертационния труд са представени в общо 9 публикации, от които:

- *Три броя самостоятелни доклада, представени в България:*
 - Third International Scientific Congress, on CD, Varna, Bulgaria, 2012;

- Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA, Bourgas, Bulgaria, 2014;
- ELMA-XIV-th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ISSN 1313-4965, Varna, Bulgaria, 2015;
- ***Пет доклада в съавторство, изнесени и публикувани извън страната:***
 - 54th Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Ilmenau University of Technology, (on CD), 2009;
 - ISEF 2013 – XVII International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, (on CD), Pilsen, Czech Republic, 2013;
 - World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index Vol:08 N:09 Part I, Switzerland, 2014;
 - ISEF 2015 – XVII International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Valencia, Spain, 2015 (on CD).
 - Materials Science Forum ISSN:0255-5476, Vol.856, pp157-162, doi: 10.4028/www.scientific.net/ MSF.856.157, © 2016 Trans Tech Publications, Switzerland;
- ***Един доклад в съавторство, изнесен в България и под печат***
 - **Andreev A., Panov E.,** Polarizing Converter with Rectangular Cross Section, International Scientific Symposium, Electrical Power Engineering, ISBN 978-954-20-0762-3, pp 134-137, 6-8 October, Varna, Bulgaria, 2016.

Структура и обем на дисертационния труд: Дисертационният труд съдържа 151 страници, включително 33 фигури и 3 таблици, оформени в 4 глави, изводи и резултати към всяка глава и списък на използваната литература от 119 заглавия, от които 30 на кирилица и 89 на латиница. Основният текст е изложен на 138 страници и се състои от съдържание, увод-въведение, четири глави, заключение, списък на приносите, списък на публикациите по темата на дисертационния труд, списък на използваната литература.

В автореферата е приета номерация на фигурите и формулите, съответстваща на тази от дисертацията.

ИНФОРМАЦИЯ ЗА СЪДЪРЖАНИЕТО НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Увод. Кратка информация, въвеждаща в актуалността и необходимостта от решаване на проблемите за измерване разхода на диелектрични течности, насочва вниманието към основния обект на изследване и към формулиране на целта и задачите на дисертационния труд.

ГЛАВА I. СЪВРЕМЕНО СЪСТОЯНИЕ НА ПОЗНАНИЯТА, АНАЛИЗА И КОНЦЕПЦИЯТА ЗА ПРОЦЕСИТЕ В РАЗХОДОМЕР

I.1. Общи понятия и класификация на уредите за измерване на разход

I.1.1. Терминология и единици за измерване

I.1.2. Значение и съвременни изисквания към уредите за измерване на разход

I.1.3. Класификация на уредите за измерване на разход и количество

I.2. Елементи от теорията на електромагнитното поле в движещи се среди

I.3. Съвременно ниво на изследванията в областта на разходомерите с най-голяма приложимост

I.3.1. Електромагнитни (индуктивни) разходомери

I.3.2. Ядрено-магнитни резонансни разходомери

I.3.3. Кондензаторни разходомери

I.3.4. Поляризационни разходомери

I.4. Изводи

I.5. Цел и задачи на дисертационния труд

Обобщение. Материалът в тази глава е обзорец. Ориентиран е в следните основни направления:

- Първата част е посветена на кръга от познания, представляващи необходимата научна база за задълбочено и ценностно навлизане в областта на принципите на работа и физическата същност на процесите в разходомерите за измерване на разхода на диелектрици:
 - Терминологични уточнения, уреди за измерване на разход и съвременни изисквания към тях;
 - Кратък преглед на уравненията на електромагнитното поле в движещи се среди, с особен акцент на доказателството, че движението на поляризирана среда се възприема в неподвижната координатна система, като поява на допълнителна намагнитеност, а движението на намагнитена среда – като поява на допълнителна поляризация.
- Втората част от тази глава представлява проучване, относно състоянието и развитието на електрическите методи за измерване на разход, както и обзорец материал отразяващ съвременното ниво на изследванията в областта на разходомерите с най-голяма приложимост. Достъпната информация дава възможност да се направят **следните съществени изводи:**
 1. Проблемът за измерване на скорост или разход чрез електромагнитни разходомери при проводящи течности (за γ от 10^{-3} до 10^{-5} S/m) е много добре изследван в теоретичен и практически аспект. Съществуват

доста голям брой разработки по тази тема, представени в голям брой научни статии;

2. Ядрено-магнитно-резонансният метод намира приложение при измерване разхода на диелектрични течности, но преобразувателите имат по-сложно устройство и висока цена.
3. В последните години се работи усилено по разработката на подходящи математически модели и методи за обработка на измерваните изходни сигнали на кондензаторните преобразуватели, особено на тези за постоянен ток. Но проучванията показват, че това не е групата разходомери на диелектрични течности, към която се проявява най-голям технически интерес, т.е. тя не се счита за най-перспективна;
4. Литературният обзор показва, че най-перспективни в момента са поляризационните преобразуватели с възбуждащо магнитно поле (електромагнитните разходомери). Съществуват редица теоретични анализи и голям брой научни публикации, посветени на измерване на разхода на електропроводящи течности посредством подобни преобразуватели. Незадоволителна обаче е информацията за получени аналитични резултати и технически данни относно практическата приложимост и параметрите на този вид преобразуватели при измерване разхода на диелектрични течности. Недостатъчната представителност на резултатите от научните изследвания до голяма степен се дължи на необходимостта от фирмени и патентни тайни. Известно е, че всяко едно сериозно проектиране на такива разходомери следва да бъде предшествано от разработката на достоверен теоретичен модел.
5. Съществува и обща тенденция, насочена към по-нататъшното усъвършенстване на всички електрически преобразуватели на разход, както и към подобряване на техническите им показатели с цел повишаване на точността.

ГЛАВА II. ПОЛЯРИЗАЦИОНЕН ПРЕОБРАЗУВАТЕЛ С ВЪЗБУЖДАЩО ЕЛЕКТРИЧЕСКО ПОЛЕ

По материали от следните собствени и в съавторство публикации: 1, 4.

II.1. Входно-изходни връзки в магнитоелектричен разходомер

II.2. Условия за създаване на еднородно възбудително електрическо поле в магнитоелектричен преобразувател. Аналитични изводи, числен експеримент

II.3. Изводи

Предимствата на поляризационните преобразуватели с възбудително електрическо поле са, че имат:

Устойчиви параметри; проста конструкция, създаваща равномерно електрическо поле; използват директни източници на енергия. Няма движещи се части и позволява безпрепятствено преминаване на течността през него. Не предизвиква пад в налягането на диелектричния флуид. Входно-изходната характеристика е линейна и има голяма чувствителност.

За съжаление, недостатъците са много съществени: малък изходен сигнал, наличие на разсейване на магнитния поток, т.е. на изходния сигнал и затруднена количествена оценка на сигнала.

Основни резултати.

По точка II.1. Практически интерес представлява задачата, при която като се изследва електромагнитното поле в разходомера, се намира функционалната връзка между големината на магнитния поток и скоростта на движение на диелектричната течност през дадено тръбно устройство. Това дава възможност да се определи разходът на течността. След анализ и преобразувания, се достига до уравнения (II.1.44) и (II.1.45), които дават търсената функционална зависимост за поляризационен преобразувател с възбуждащо електрическо поле.

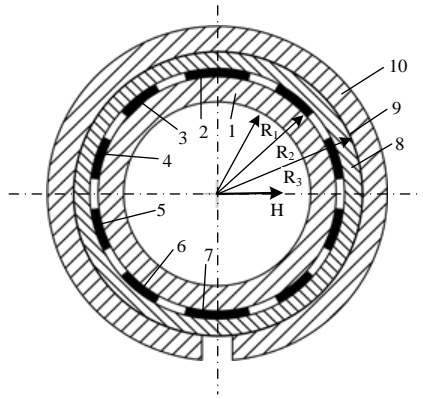
$$\Phi = \frac{-2\ell_0\mu_0\varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)EQ}{\pi R} \quad (\text{II.1.44})$$

и съответно

$$\Phi = -2\ell_0\mu_0\varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)REv_{cp}. \quad (\text{II.1.45})$$

В тези изрази: R е радиусът, а l_0 – дължината на тръбата, по оста на която със средна скорост v_{cp} се движи течността, E е електрическият интензитет на възбудителното електрическо поле, а Q е разходът на флуида. От изведените зависимости се вижда, че възбуденият магнитен поток Φ е пропорционален на разхода или на средната скорост на движеща се в тръбопровода диелектрична течност. Изменението на разхода води до промяна в изходния сигнал на преобразувателя – магнитния поток Φ . Уравнения (II.1.44) и (II.1.45) дават количествена връзка между входния и изходния сигнал. Вижда се, че тя зависи от геометричните размери на преобразувателя и от диелектричните свойства на течността.

По точка II.2. На фиг. II.2 е показан напречен разрез на една опростена система за създаване на еднородно електрическо поле. Тук са въведени следните означения: 1 – тръба на преобразувателя, направена от диелектричен материал с диелектрична проникваемост ε ; 2, 3, 4 – електроди с потенциали съответно V_1, V_2, V_3 ; 5, 6, 7 – електроди с потенциали $-V_1, -V_2, -V_3$; 8 – диелектричен пръстен, направен от същия материал, като тръбата 1; 9 – заземен екран; 10 – магнитна тръба. С R_1 е означен вътрешният радиус на тръбата.



Фиг. II.2. Напречен разрез на опростена система за създаване на еднородно електрическо поле

От съображения, свързани с вида на използваната изолация се приема потенциалната разлика между съседните електроди да бъде една и съща. При това допускане потенциалната разлика се определя от следната зависимост:

$$V_{i+1} - V_i = \frac{V_k}{k} = \frac{CER_1}{k} \quad (\text{II.2.22})$$

Оптимално разположение на електродите и въздушните междини между тях се постига, когато центровете на въздушните междини са разположени в точките от повърхността, където идеалната потенциална стойност би била равна на средноаритметичното от потенциалите на два съседни електрода.

$$CER_1 \theta_{ei} = \frac{V_i + V_{i+1}}{2} = \frac{CER_1}{k} \frac{(2i+1)}{2} = \frac{V_k}{k} \frac{2i+1}{2}, \quad (\text{II.2.26})$$

където V_k е потенциалът на k -ти електрод, i е номерът на текущия електрод.

От (II.2.26) само за θ_{ei} след преобразуване се намира

$$\theta_{ei} = \arcsin \frac{2i+1}{2k}. \quad (\text{II.2.27})$$

Големините на въздушните междини между електродите и големината на потенциала на k -тия електрод V_k , се определят в зависимост от съответните пробивни интензитети. Като пример за изчисляване на такава електрическа система за създаване на еднородно електрическо поле в цилиндрична тръба, се разглежда система с пет ($k=5$) електрода в един квадрант и потенциал на k -тия електрод (петия) спрямо нулевия потенциал (земя) $V_5 = 250, V$.

Потенциалната разлика между отделните електроди се получава от (II.2.22).

$$V_{i+1} - V_i = \frac{V_5}{5} = \frac{250}{5} = 50V.$$

След това се определят потенциалът на първия електрод, полярната координатата θ_i на централната му част и θ_{6i} . За първия електрод ($i = 1$) се намира

$$V_1 = \frac{V_5}{5} = 50V$$

$$\theta_1 = \arcsin \frac{1}{5} = 11,54^\circ$$

$$\theta_{61} = \arcsin(3/10) = 17,46^\circ$$

Следователно първия електрод трябва да има потенциал $V_1 = 50, V$, централната му част да бъде разположена на ъгъл $\theta_1 = 11^\circ 54'$, а средата на въздушната междина между първи и втори електрод да бъде разположена на ъгъл $\theta_{61} = 17,46^\circ$.

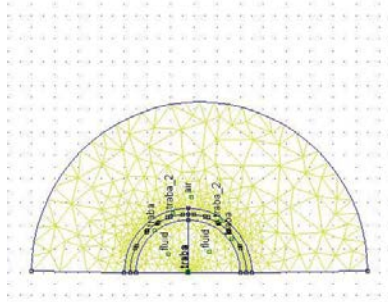
$$\text{За } i = 2 \quad V_2 = 100V; \theta_2 = 23,58^\circ; \theta_{62} = 30^\circ.$$

$$i = 3 \quad V_3 = 150V; \theta_3 = 36,87^\circ; \theta_{63} = 44,43^\circ.$$

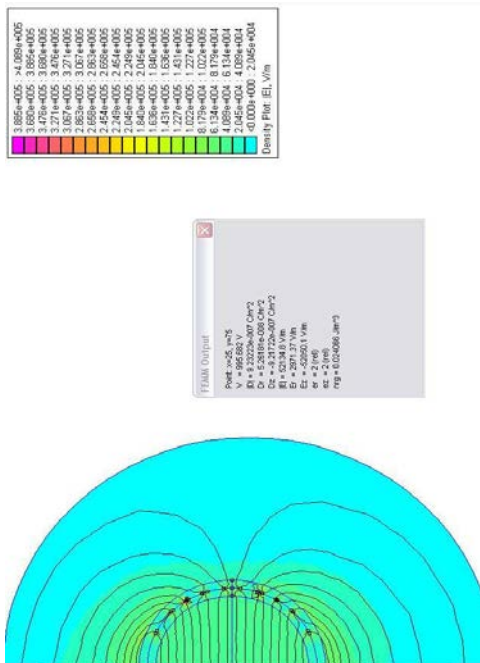
$$i = 4 \quad V_4 = 200V; \theta_4 = 53,13^\circ; \theta_{64} = 64,16^\circ.$$

$$i = 5 \quad V_5 = 250V; \theta_5 = 90^\circ.$$

На Фиг. II.3а е показано разположението на електродите, съответстващо на получените числени стойности. С помощта на числен метод [52, 61, 90] (МКЕ, Фиг. II.3б) е определено разпределението на електрическото поле във вътрешността на тръбата и извън нея. Показани са и екипотенциалните линии (Фиг. II.3б). Установява се, че при така конструирани електроди електрическото поле в работната кухня на разходомера наистина е равномерно разпределено.



Фиг. II.3а. Мрежа от крайни елементи в напречното сечение на проектираната система



Фиг. 11.36. Картина на електрическото поле в напречното сечение на изоляционната тръба

По точка II.3. Изводи.

1. Съществуват редица недостатъци при електромагнитните преобразуватели: слаб изходен сигнал, т.е. малък магнитен поток. В резултат, на това *точността на количествените оценки е намалена, преобразувателите нямат добри метрологични характеристики и към тях не се проявява голям интерес.*
2. *Поради това изследванията в дисертационния труд са ограничени само до разработката на теоретичния модел с извеждането на съответната входно-изходна характеристика и до получаването на частични оптимизационни резултати.*
3. Определена е аналитичната зависимост на възбудения магнитен поток от средната скорост на движещия се флуид, от неговите диелектрични характеристики и геометричните параметри на устройството уравнение (II.1.46) и (II.1.45).
4. Предложен е алгоритъм, чрез който по зададен брой на електродите в един квадрант и потенциала на първия от тях, да може да се определят координатите на центрoвете на останалите електроди и на въздушните

междина. Аналитично изведените условия гарантират генерирането на необходимото еднородно възбудително електрическо поле в работната област на разходомера.

- Представеният числен пример с МКЕ за очакваното оптимално разпределение на полето потвърждава получените, съгласно уравнения (II.2.21) и (II.2.27), аналитични резултати.

Глава III. АНАЛИЗ НА ПОЛЯРИЗАЦИОНЕН ПРЕОБРАЗОВАТЕЛ С ВЪНШНО ВЪЗБУЖДАЩО МАГНИТНО ПОЛЕ

По материали от следните собствени и в съавторство публикации: 2, 6, 9

III.1. Движение на твърд диелектрик във външно магнитно поле

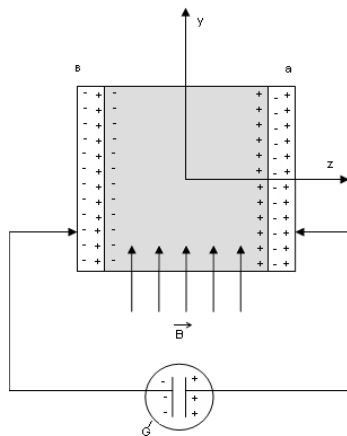
III.2. Анализ на поляризационен преобразувател с кръгло напречно сечение

III.3. Анализ на поляризационен преобразувател с правоъгълно напречно сечение

III.4. Необходимост от проверка на аналитичното решение

Основни резултати.

По точка 1. За по-доброто изясняване на физикалните процеси по аналитичен път в настоящата глава първо се разглеждат случаи на движение на твърд диелектрик в хомогенно външно магнитно поле. Разгледани са два случая. Теоретичен анализ на първия от тях-движение на твърд диелектрик между плочите на плосък кондензатор, при приложено към диелектрика, перпендикулярно на посоката на движение, хомогенно външно магнитно поле (фиг. III.1).



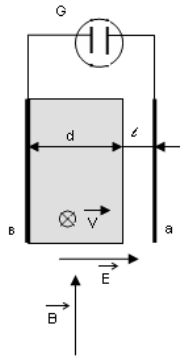
Фиг. III.1. Диелектрик, движещ се със скорост $\vec{v} = v\vec{i}$ във външно магнитно поле \vec{B} , между плочите на кондензатор

Посоката на движение на диелектрика със скорост $\vec{v} = v\vec{i}$ между металните пластини a и b е перпендикулярна на равнината на чертежа (по посока на оста x). Векторът на магнитното поле \vec{B} в диелектрика е насочен по оста y . Показанието на електрометъра G е пропорционално на разликата между потенциалите на неговите изводи. След анализ и преобразувания за напрежението на електрометъра се намира изразът

$$U = \frac{(\varepsilon - \varepsilon_0)}{\varepsilon} v B \frac{C}{C + C_e} d \cdot \quad (\text{III.1.7})$$

В този израз d е означено разстоянието между металните плочи, със C_e е означен капацитетът между външните страни на металните пластини заедно с проводниците и пластините на електрометъра, а C е капацитетът на кондензатора, образуван от вътрешните страни на металните пластини и диелектрика.

Подобен израз се получава и във втория случай (фиг. III.2), където металните пластини са неподвижни и между диелектрика и една от тях има въздушна междина.



Фиг. III.2. Двуслоен кондензатор. Слой d е движещият се твърд диелектрик, а слой l е зает от въздух

$$U = \varphi_a - \varphi_b = \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r} B v d \frac{C}{C + C_e} \quad (\text{III.1.14})$$

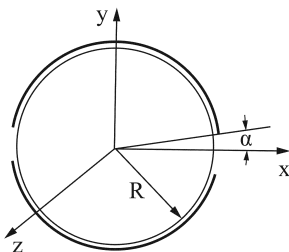
Изразът съвпада с този от уравнение (III.1.7), независимо че пластините a и b са неподвижни. Тук въздушната междина оказва влияние на стойността на капацитета C .

По точка 2. Анализ на поляризационен преобразувател с кръгло напречно сечение:

- **Без отчитане дебелината на диелектричната тръба**

Предполага се, че е известно разпределението на скоростта на потока в напречното сечение, а също и че дължината ℓ_0 на преобразувателя е доста-

тъчно голяма в сравнение с напречните му размери, за да се създадат условия за установен режим на скоростта. Дебелината на тръбата се приема пренебрежимо малка и нейното влияние се пренебрегва. Двата електрода (фиг. III.3) са направени от проводящ (немагнитен) материал и имат формата на полуцилиндрични повърхнини, плътно закрепени към тръбата на преобразувателя, направена от диелектричен материал. Електродите отстоят един от друг на ъгъл 2α . Течността се приема за немагнитна.



Фиг. III.3. Напречен разрез на поляризационен преобразувател с кръгло напречно сечение и тънкостенна тръба

При теоретичния анализ на поляризационния преобразувател се правят следните ограничения [30]:

1. Средата се движи постъпателно и равномерно и не се отчитат ефектите, възникващи вследствие на ускоряването на нейното движение;
2. Всички протичащи процеси са независими функции на времето (стационарни);
3. Магнитното поле е равномерно (еднородно) в обема на преобразувателя;
4. Пренебрегват се токовете на проводимостта;
5. Коефициентите на средата ϵ , μ , и γ са константни;
6. Тръбата на преобразувателя е направена от диелектричен материал, следователно не се натрупва повърхностен заряд по стените му.

В първо приближение при изследването се счита, че поляризационният преобразувател включва несвиваема диелектрична течност, т.е. изменението на плътността от температурата не се отчита. Изменението на плътността на средата от налягането също не се взема предвид, тъй като свиваемостта е много малка.

Граничните физикални условия за решаването на уравненията са:

1. Скоростта в канала на преобразувателя е ограничена, следователно и електрическият потенциал има крайни стойности;
2. Хидродинамичното гранично условие за неподвижност на течността до стените на тръбата е $v=0$ при $r=R$ (R е вътрешния радиус на тръбата на преобразувателя);

3. При $r = R$ и $\alpha \leq \theta \leq \pi - \alpha$ потенциалът е постоянен $\varphi = \varphi_0$, а при $r = R$ и $\alpha + \pi \leq \theta \leq 2\pi - \alpha$, $\varphi = -\varphi_0$;
4. При $r = R$ производната на потенциала по координатата θ е равна на нула $\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = 0$, ако θ се изменя в границите на условие 3.

Характеристиките на полетата в разходомера са, както следва:

- Магнитното поле е еднородно и насочено по оста z :

$$\vec{B} = B_x \vec{i} = (B_x, 0, 0). \quad (\text{III.2.4})$$

- Векторът на скоростта \vec{v} е насочен по положителната посока на оста z , перпендикулярно на чертежа, към наблюдателя:

$$\vec{v} = v_z \vec{k} = (0, 0, v_z) = v \vec{k}$$

- Електрическото поле в поляризираната течност е следното:

$$\vec{E} = f(x, y) \vec{j}, \quad (\text{III.2.6})$$

и няма компонента по оста z (т.е. то е плоскопаралелно).

При теоретичните изследвания се разглежда поляризационен преобразувател с еднородно външно магнитно поле. Условието за решаване на основното уравнение са:

1. Потокът на течността е осевосиметричен, при което в цилиндрични координати скоростта зависи само от радиус – вектора r и е насочена по оста z :

$$\vec{v} = \vec{v}(r). \quad (\text{III.2.10})$$

2. Нито една от участващите в уравнение (III.2.9) величини не е функция на z (т.е. става дума за плоско паралелно поле).

За да се определи напрежението, което ще се измери между двата метални електрода, трябва да се определи свободният електрически заряд на външната повърхност на всеки електрод ($q_{\text{вън}} = -q_{\text{вътр}}$). След съответни преобразувания се получава търсената зависимост

$$q_{\text{вън}} = \int_{(S)} (-\sigma) dS = (\varepsilon - \varepsilon_0) B v_{cp} 2R \cos \alpha L$$

Ако зарядът на единица дължина се представи с израза $\frac{q_{\text{вън}}}{L}$ от горния резултат се достига до определящия израз

$$\frac{q_{\text{вън}}}{L} = (\varepsilon - \varepsilon_0) B v_{cp} d \cos \alpha, \quad d = 2R \quad (\text{III.2.30})$$

Заклучението е, че изменението на скоростта (разхода) на потока води до промяна на повърхностния заряд, а от там и на напрежението между електродите, определено от зависимостта

$$U = \frac{\int (-\sigma) ds}{C} = \frac{q_{в\ddot{u}н1}}{LC_\ell}, \quad (\text{III.2.31})$$

където C_ℓ е геометричният капацитет за единица дължина на образувания от електродите и течността кондензатор, а S е площта на електродите. Електрическото поле в обема на разходомера очевидно ще бъде неравномерно при големи ъгли α . За създаване на възможно най-равномерно електрическо поле в преобразувателя и увеличаване заряда на електродите ъгълът α трябва да бъде сравнително малък. Този проблем може да се реши пълноценно при числено изследване на електромагнитните процеси в преобразувателя.

Капацитетът на кондензатор с полуцилиндрични електроди при малки ъгли за единица дължина се представя с израз

$$C_\ell \approx \frac{4\varepsilon}{\pi} \ln 4/\alpha. \quad (\text{III.2.32})$$

При тази предпоставка като се замести (III.2.30) и (III.2.32) в (III.2.31) за изходния сигнал се получава

$$U = \frac{\pi}{4 \ln 4/\alpha} \cdot \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon} B v_{cp} d \cos \alpha, \quad (\text{III.2.33})$$

където $d = 2R$ е диаметърът на тръбопровода. Ако се раздели числителя и знаменателя на (III.2.33) на абсолютната диелектрична проницаемост на пустотата ε_0 за напрежението U се получава израз чрез относителната диелектрична проницаемост на течността

$$U = \frac{\pi}{4 \ln 4/\alpha} \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r} B v_{cp} d \cos \alpha. \quad (\text{III.2.34})$$

• **С отчитане дебелината на диелектричната тръба**

За заряда на външната повърхност на електрода се получава изразът

$$q_{в\ddot{u}н1} = (\varepsilon - \varepsilon_0) \frac{(1-k)}{R_1^2 + R_2^2} R_1^2 B v_{cp} 2R_2 \cos \alpha, \quad (\text{III.2.51})$$

където е положено

$$k = \frac{\varepsilon_r k_1 - \varepsilon_{гм}}{\varepsilon_r k_1 + \varepsilon_{гм}} \quad \text{и} \quad k_1 = \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_1^2 + R_2^2}$$

От (III.2.31) и (III.2.32) окончателно за напрежението между електродите на поляризационния преобразувател, при вземане предвид дебелината на тръбата на разходомера, се намира

$$U_m = \frac{\pi}{4 \ln 4/\alpha} \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r} \frac{(1-k)}{R_1^2 + R_2^2} R_1^2 2R_2 Bv_{cp} \cos \alpha. \quad (\text{III.2.52})$$

Влияние на дебелината на стената на диелектричната тръба и на нейната диелектрична константа върху изходното поляризационно напрежение.

За да се изследва влиянието на ε_{rM} – относителната диелектрична проницаемост на материала от който е изготвена тръбата на разходомера и съотношението между радиусите на преобразувателя R_1 и R_2 , напрежението U_m се записва в относителни единици при базисно напрежение U в съответствие с (III.2.34)

$$\frac{U_m}{U} = \frac{(1-k)R_1R_2}{R_1^2 + R_2^2}. \quad (\text{III.2.53})$$

Полага се $g = \frac{R_1}{R_2}$ и $b = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_{rM}}$ и като се използва равенството (III.2.46) във вида

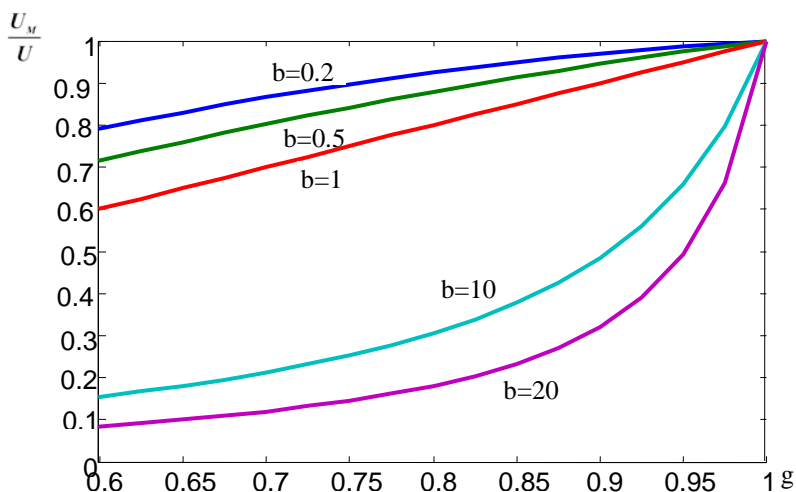
$$\frac{1-k}{R_1^2 + R_2^2} = \frac{2\varepsilon_{rM}}{\varepsilon_{rM}(R_1^2 + R_2^2) + \varepsilon_r(R_2^2 - R_1^2)}, \text{ се доказва, че:}$$

$$\frac{U_m}{U} = \frac{2g}{b(1-g^2) + (1+g^2)}. \quad (\text{III.2.54})$$

Зависимостта $U_m/U = f(g)$ при $b = \varepsilon_r / \varepsilon_{rM} = const$ е показана на фиг. III.7. Стойностите на b са съобразени с практически възможните, при условие, че диелектричната проницаемост на пластмасите, от които се изготвят тръбите на преобразувателите, е $\varepsilon_{rM} = (4 \div 7)$, а на диелектричните течности от $\varepsilon_r \approx 2$ (примерно за продукти от нефт) до $\varepsilon_r = 80$ (за дестилирана вода).

Оказва се, че ако вътрешността на тръбата има по-голяма диелектрична проницаемост от стената на тръбата, дебелината на стената оказва няколкократно по-голямо влияние върху съотношението $\frac{U_m}{U}$. Скоростта, с която се променя това съотношение е значителна при по-тънкостенни тръби.

Интересно е да се отбележи, че при $R_1 \neq R_2$ няма стойности на b , при които $U_m/U \geq 1$. Това показва, че колкото и тънкостенна да е тръбата нейната стена винаги намалява чувствителността на преобразувателя, тъй като намалява изходния сигнал.



Фиг. III.7. Графична зависимост на напрежението от дебелината на тръбата

Уточнени са границите на валидност на използвания от литературата аналитичен израз за капацитета на системата-полуцилиндрични електроди – диелектричен флуид. Установено е, че изразът е в сила само за ъгли на раздалечаване на електродите, при стойности на α приблизително до 18 deg с точност до 0,3 %. За целта числените резултати са сравнени с точните резултати от аналитична зависимост с елиптични интеграли, известна в литературата, (фиг. III.5). Дадена е и относителната грешка δ при база C_l (фиг. III.6).

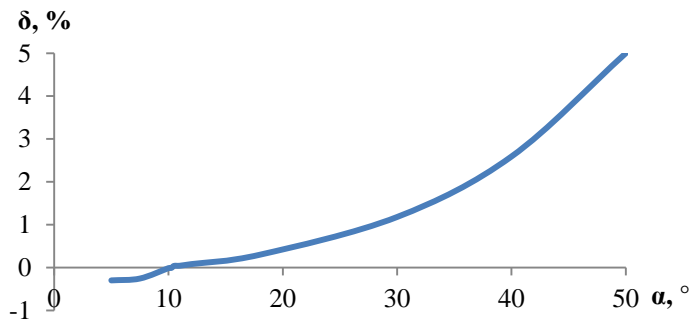
В техническата литература е посочено, че аналитичният израз за капацитета на кондензатора на единица дължина (III.2.32) е валиден за ъгли $\alpha \leq \pi/10$ [13]. Пак там се дава точният израз за капацитет на кондензатор с полуцилиндрични електроди, получен по метода на конформното преобразование:

$$C_{le} = \varepsilon \frac{K'(k)}{K(k)}.$$

Тук $k = tg^2 \alpha / 2$ е модулът на пълните елиптични интеграли от първи род K и K' .

В таблица III.2 са дадени стойностите на елиптичните интеграли и на капацитетите C_l и C_{le} , получени съответно по аналитичния израз (III.2.32) и за сравнение, по-точния израз с елиптичните интеграли за различни стойности на ъгъла α . Дадена е и относителната грешка δ при база C_l . С цел оценяване прецизността на аналитичните резултати, най-добре е ъгълът α да бъде избран равен на 10 градуса (фиг. III.6). Тогава приблизителният израз (III.2.32) дава точен изчислителен резултат и получената аналитично стойност за U по

(Ш.2.34) може адекватно да се съпостави с резултата за U , получен с използване на числен метод (МКЕ), което е направено в следващата глава на дисертационния труд.

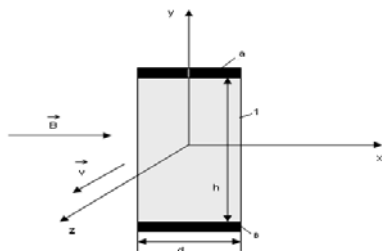


Фиг. Ш.6. Процентно отклонение между стойностите на C_i и C_{ie} в зависимост от ъгъла на раздалчаване α между електродите

По точка 3. Анализ на поляризационен преобразувател с правоъгълно напречно сечение

Понякога намират приложение и преобразувателите с правоъгълно напречно сечение [16, 43, 44]. Електродите са правоъгълни метални пластини, равни по ширина на стената на канала, разположени паралелно на магнитните силови линии и намиращи се между полюсите на магнитната система.

Като поляризационни преобразуватели с правоъгълно напречно сечение могат да се разглеждат и случаите на движение на твърд диелектрик във външно магнитно поле раздел (Ш.1). Тези преобразуватели намират ограничено приложение. Те имат преимущество пред преобразувателите с кръгло напречно сечение при получаването на хомогенно магнитно поле в обема на преобразувателя, по-голяма магнитна индукция при равни други условия и по-лесно определяне на капацитета на преобразувателя. Схематично, напречен разрез на такъв преобразувател е представен на фиг. Ш.8.



Фиг. Ш.8. Поляризационен преобразувател с правоъгълно напречно сечение

На фиг. III.8 са въведени следните означения: a , b са метални пластини с правоъгълна форма с дължина ℓ_0 , с ширина d и са разположени успоредно на вектора на магнитната индукция \vec{B} на разстояние h една от друга; 1 е тръбата на преобразувателя с правоъгълно сечение, изработена от диелектричен материал.

Като поляризационни преобразуватели с правоъгълно напречно сечение могат да се разглеждат случаите на движение на твърд диелектрик във външно магнитно поле (III.1). Тези преобразуватели намират ограничено приложение, тъй като повечето тръбопроводи са с кръгло напречно сечение. Имат преимущество при прилагането на хомогенно магнитно поле в обема на преобразувателя, по-голяма магнитна индукция при равни други условия и по-лесно определяне на капацитета на преобразувателя

При допускане, че диелектричната течност се движи равномерно, разпределението на скоростта по сечението е симетрично и ел. поле от поляризационните заряди е насочено по оста y , за напрежението между металните електроди се получава :

$$U = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon} h B v_p \frac{C}{C + C_c}, \quad (\text{III.3.15})$$

C и C_l са съответно капацитетите на поляризационния преобразувател с правоъгълно напречно сечение и този на измервателната верига.

Правоъгълната форма на канала дава възможност, (в сравнение с канал с кръгло сечение), при равни площи на сеченията да се получи по-голямо поляризационно напрежение при една и съща големина на магнитодвижещото напрежение на електромагнита, което се при увеличаване на отношението между страните на правоъгълното сечение на канала h/d (фиг. III.6). Така се намалява въздушната междина на магнитната система и се увеличава индукцията на магнитното поле. При проводящи течности тези преобразуватели намират ограничено приложение въпреки отбелязаните предимства. Те могат да изпълняват функциите на опитни и лабораторни образци на разходомери и дори в качеството на образцови или контролни уреди, от които се изисква повишена точност на измерването.

Недостатъци на тези преобразуватели са по-сложната конструкция за създаване на хомогенно магнитно поле и по-малката устойчивост на параметрите на полето.

III.4. Необходимост от проверка на аналитичното решение

Сериозен научен интерес, наложен от необходимостта изследванията да се доближат до реално изпълними конструкции и от разкриващата се възможност за подобряване ефективността на конкретни преобразуватели, представява допълнителното задълбочаване на анализа на електромагнитните преобразуватели с отпадане на ред ограничения и допускания като се прилага числен метод за анализ на електромагнитните процеси. По този начин се из-

числяват конфигурации, значително по-близки до реалните, включително при наличието на различни нееднородности, (в случая) и при възможно несиметрично разпределение на потока на флуида в напречното сечение на тръбата. *Прилагането на числен метод за анализ на процесите в наблюдаван разходомер дава възможност да бъдат съпоставени количествените резултати за изходния сигнал на устройството, получени с използването на два различни метода-аналитичен и числен-използван подход в изследователската практика. Подобна проверка за достоверност на аналитичните модели и получените аналитични резултати е представена в следващата глава на дисертационния труд.*

III.5. Изводи

1. В практиката приложение намират главно устройства, работещи с възбудително магнитно поле. Това зависи от материалите, с които разполага съвременната електротехника. За сега няма създадени такива електрически материали, които могат да допускат в единица обем електрическата плътност на енергията W_e' , да бъде равна на магнитната енергия W_m' , съсредоточена в единица обем от магнитен материал. Стойностите на W_e' и W_m' се определят от материалните константи ϵ и μ :

$$W_e' = \frac{1}{2} \epsilon E^2; W_m' = \frac{1}{2} \mu H^2.$$

Съвременните електрически материали имат диелектрична константа ϵ приблизително равна на $10^{-11} F/m$, докато магнитната константа е приблизително $10^{-6} H/m$. При еднакви големина на интензитетите на електрическото поле E и на магнитното поле H , следва че $W_m' \gg W_e'$. Това голямо предимство на магнитното поле се проявява и при поляризационните преобразуватели. *Изходният сигнал на поляризационен преобразувател с възбуждащо магнитно поле е много по-голям в сравнение с поляризационния преобразувател с възбуждащо електрическо поле, при равни интензитети на двете полета. Този факт е определящ при ориентацията на автора към електромагнитните преобразуватели, като основен обект на изследване.*

2. Изследва се поляризационен електромагнитен преобразувател, с промишлено приложение при измерване разхода на диелектрични течности с голям вискозитет, а именно: продукти на нефтената, химическата, хранително-вкусовата промишленост и енергетиката.

3. Теоретично са изведени входно-изходните връзки между външното възбудително магнитно поле и породеното поляризационно напрежение в електромагнитен разходомер с кръгло и с правоъгълно напречно сечение на тръбата. Зависимостите отчитат динамиката и диелектричните качества на движещия се флуид, както и геометрията на устройството. За разходомерите с

кръгло напречно сечение, които имат значително по-голямо практическо приложение, аналитичните изрази са два: без и с отчитане дебелината на диелектричната тръба;

4. На базата на получените оригинални аналитични изводи е решен числен пример за електромагнитен преобразувател със зададени геометрия, електромагнитни константи и дефиниращи параметри на диелектричния флуид. В следващата глава на дисертационния труд резултатът се проверява за достоверност с прилагането на числен метод (МКЕ).

5. Изследвана е границата на валидност на опростен аналитичен израз от литературата за капацитета на система от полуцилиндрични електроди – диелектричен флуид, чрез който се изчислява поляризацияното напрежение. За целта числените резултати от този израз са сравнени с точните резултати от аналитична зависимост с елиптични интеграли, известна в литературата. Установена е приложимост на опростения вариант с точност до 0,3 % при $\alpha \approx 18\text{deg}$.

Глава IV. ДОСТОВЕРНОСТ НА АНАЛИТИЧНИТЕ ИЗВОДИ И СЪТЪПКИ КЪМ ПОВИШАВАНЕ ЧУВСТВИТЕЛНОСТТА НА ПОЛЯРИЗАЦИОННИТЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

По материали от следните собствени и в съавторство публикации: 3, 5, 7, 8

IV.1. Проверка на достоверността на теоретичните модели

IV.1.1. Поляризациянен преобразувател с кръгло напречно сечение

IV.1.2. Поляризациянен преобразувател с правоъгълно напречно сечение

IV.1.3. Възможности за проверка достоверността на аналитичния модел с провеждане на експеримент

IV.2. Изследване влиянието на някои фактори върху изходния сигнал

IV.3. Повишаване чувствителността на поляризацияните преобразуватели

IV.3.1. Еднородно електрическо поле в магнитоелектричен разходомер

IV.3.2. Оптимизационни и обратни задачи в електромагнитен разходомер

IV.3.2.1. Обобщен числен модел (подвижна среда, пространствено изменение на магнитното поле)

IV.3.2.2. Характеристични данни на устройството, подлежащо на подобрене

IV.3.2.3. Проверка точността на моделите. Сравняване на резултатите от аналитично и числено решение

IV.3.2.4. Дефиниране на първата обратна задача. Определяне разпределението на възбудителното поле, при което изходният сигнал е максимален

А) Идея за формиране на общ алгоритъм

Б) Формулировка на алгоритъма

В) Приложение и числени резултати

IV.3.2.5. Дефиниране на втората обратна задача. Оптимизиране формата и геометричните размери на работна област в електротехническо устройство

А) Формулиране на алгоритъма

Б) Приложение на алгоритъма – оптимална геометрия на напречно сечение и на електродите в електромагнитен разходомер при максимален изходен сигнал – числени резултати

IV.4. Изводи

IV.5. Заключение

IV.6. Научни, научно-приложни и приложни приноси.

По т. IV.1.1. Първата проверка за достоверност на аналитичните изводи при сравняване стойностите на изходното напрежение, получени при едни и същи входни данни с използването на резултат от аналитично и от числено решение (МКЕ), е направена като се отчита дебелината на тръбата. Входните данни са следните (глава III, страници 95 и 100): магнитна индукция във вътрешността на тръбата $B = 0,5T$, радиуси и относителна диелектрична константа на тръбата $R_1 = 0,025 m$, $R_2 = 0,03 m$, $\epsilon_{rM} = 4$, средна скорост на диелектричната течност $v_{cp} = 0,5m / s$, $\epsilon_r = 4$ на флуида, $\alpha = 10^0 (0.1745rad)$. Използва се формула (III.2.52). За коефициентите от формулата се получава: $k_1 = 0,18$, $k = -0,6945$, а за напрежението между електродите се намира $U_{..} = 1,929mv$. При същите входни данни разходомерът се изчислява и с помощта на МКЕ. При *изграждане на числения модел* се отчита реалното хидродинамично разпределение на скоростта в напречното сечение на тръбата при установен ламинарен режим на потока на флуида [23]:

$$v = 2v_m \left(1 - \frac{r^2}{R_1^2}\right) \quad (IV.1.1)$$

Поради относително малкия радиален размер полето се разглежда като плоскопаралелно. Използва се софтуерният продукт Quick Field 5.6, при следните гранични условия (Фиг. III.3):

- $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$ – Нойманово по оста на симетрия oy ;
- $\varphi = 0$ – гранично условие на Дирихле по оста на антисиметрия ox и по границата на буферната зона;
- стойност на потенциала на горния електрод φ – неизвестна.

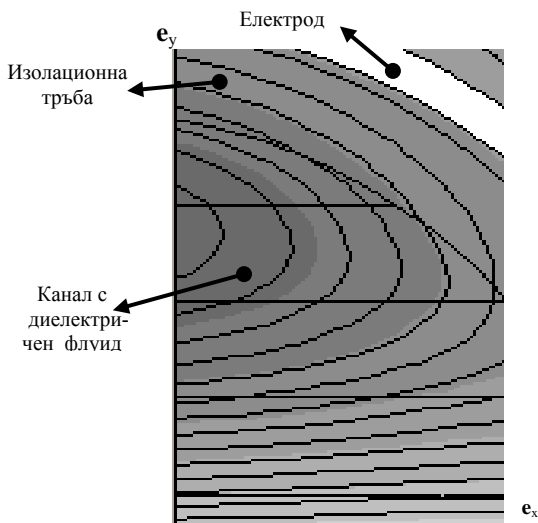
Търси се скаларният електрически потенциал φ на горния електрод. Поради симетрията се разглежда само едната четвърт от напречната конфигурация на разходомера. Софтуерното решение налага дясната страна на основното уравнение:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon} \operatorname{div}(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (IV.1.2)$$

В правоъгълната координатна система от Фиг. III.3 се отчита, че $\vec{v} = v[r(x, y)]\vec{k}$, а $\vec{B} = B\vec{i}$. При $B = \text{const}$ основното уравнение добива следния вид:

$$\nabla^2 \varphi = -4 \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon} B \frac{v_m}{R_1^2} y.$$

Използва се формалната аналогия с уравнението на Поасон в електростатиката и полевата задача се решава като такава при формулираните гранични условия. Софтуерният пакет има възможност да решава уравнение, чиято дясна част е функция на пространствени координати. Картината на полето с еквипотенциалните линии е показана на фиг. IV.2.

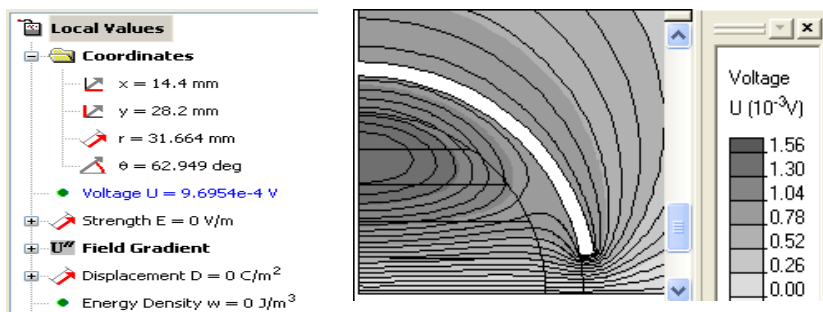


Фиг. IV.2. Разпределение на еквипотенциалните линии в движещата се диелектрична среда

Прилагайки входните данни, с които е извършено аналитичното решение (раздел III.2 на глава III-та), за потенциала на горния електрод се намира $\varphi = U = 0,9695 \text{ mV}$ (Фиг. IV.3). Поради условието за антисиметрия по оста ox , напрежението между електродите има стойност $2U = 1,939 \text{ mV}$. На базата на тези резултати за относителното отклонение ∇ между аналитичното и численото решение се получава следната стойност

$$\nabla = \frac{1,939 - 1,929}{1,929} \cdot 100\% = 0,5\%.$$

Получената относителна грешка е нищожна, което показва че аналитичният модел е достоверен. При това проверката е извършена за по-сложния от двата варианта с отчитане дебелината на изоляционната тръба.



Фиг. IV.3. Изчислената стойност на потенциала на горния електрод

По т. IV.1.2. За разлика от използвания по-горе подход, аналитичният модел на *поляризацияния електромагнитен преобразувател с правоъгълно напречно сечение* е проверен за достоверност чрез сравнение с експериментален резултат, посочен в публикация [16]. Представени са експериментални данни от други автори, които косвено потвърждават получените в дисертационния труд аналитични и симулационни резултати. В [16] са дадени числените стойности, характеризиращи геометрични данни и физически параметри на *опитен образец на поляризиционен разходомер* с правоъгълно напречно сечение (1x6cm). При магнитна индукция 0,56Т и скорост на дестилираната вода 0,1m/s, между плоските електроди, разположени на разстояние 6 cm, възниква потенциална разлика 4 mV. Посочено е, че поради много голямото входно съпротивление на изследвания поляризиционен разходомер, се е налагало поляризиционното е.д.н. да бъде измерено с използването на електрометрични усилватели с входно съпротивление $10^9 \Omega$ до $10^{10} \Omega$. Със същите входни данни за поляризиционното напрежение, изчислено по аналитичния модел (раздел III.3, глава III, формула III.3.15) се намира $U=3,36$ mV. В този случай *относителната грешка е доста голяма, $\nabla=16\%$. В случая, трябва да се има предвид, че двете напрежения (експериментално определеното и определеното по аналитичния модел) са не само от един порядък, но и доста близки по абсолютна стойност. Голямата относителна грешка се обяснява с факта, че изграденият аналитичен модел не отчита влиянието на краевите ефекти.* За този модел при разстояние между електродите 6 cm и ширина на електрода 1 cm краевият ефект би следвало да бъде значителен по големина. Експерименталното изследване, както и прилагането на числена процедура автоматично отчитат този ефект, за разлика от аналитичния модел.

По т. IV.1.3. Задачата за измерване на полученото между електродите напрежение е силно затруднена поради огромното вътрешно съпротивление на източника на сигнал – от порядъка на стотици G Ω . Полученото напрежение е от порядъка на mV и е достъпно за измерване с конвенционални средства, но поради голямото вътрешно съпротивление на източника, вече става дума за измерване на заряди със стойности под 1 pC.

На този етап, експериментална проверка на тезата на дисертационния труд не може да се проведе, поради следните причини:

1) Необходимост от сериозно електростатично и електромагнитно екраниране на цялата експериментална постановка и отделни нейни възли. Най-добре би било измерването да се проведе в безехова камера, но дори и тогава отделните възли на постановката ще трябва да се екранират поради взаимно влияние.

2) Необходимост от закупуването на сериозна измервателна апаратура, в т.ч. специални триаксиални кабели и прецизен усилвател на заряд. Цената на инструменталната екипировка достига десетки хиляди лева.

3) Необходимост от прилагане на специализирана обработка на изходния сигнал при измерването, във временната и в честотната област.

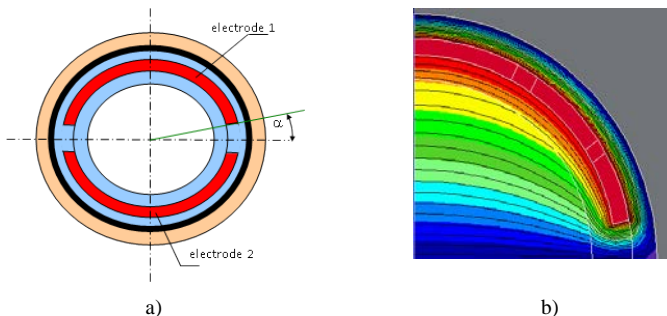
От дотук изложеното, се вижда, че експериментът би отклонил разработването на дисертацията в друга посока, което не е цел на този труда. Още повече, че в литературата са представени експериментални данни от други автори [16], които косвено потвърждават получените в дисертационния труд аналитични и симулационни резултати. На това сравнение и неговия анализ е посветен предишният IV.1.2. раздел.

По т. IV.2. *Изследвано е влиянието на редица фактори, влияещи върху нормалното функциониране на поляризиционните разходомери за диелектрични течности: числото на Рейнолдс за разграничаване на ламинарно и турбулентно движение на потока, изменението на диелектричната проникваемост на течността, както и степента на еднородност на електрическото и магнитното поле.*

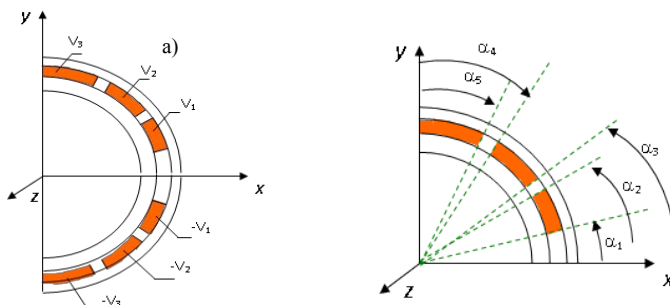
По т. IV.3.1. С използването на числена процедура по МКЕ се уточняват параметрите, дефиниращи локацията, размерите и потенциалите на електродите, гарантиращи получаването на еднородно електрическо поле в работната област на магнитоелектричен разходомер с движещ се диелектрик. Обратната задача се решава по метода с планиране на експеримента и методологията с повърхности на отклика.

Вариантът на подобна система със само два електрода с потенциали V и $-V$, показан на Фиг. IV.6a не може да създаде еднородно електрическо поле в работната област и се нуждае от подобрене. На Фиг. IV.6b е показано разпределението на съответното електрическо поле на системата, което е очевидно деформирано.

При решаването на тази задача са обсъдени възможностите на два варианта, показани на Фиг. IV.7a и Фиг. IV.7b.



Фиг. IV.6. Разпределение на електрическото поле във вътрешността на тръбата при наличие само на 2 електрода



Фиг. IV.7. Изследване на два варианта: а) при изменение а потенциалите; б) при изменение геометрията на структурираните електроди

Числената симулация на електрическото поле се реализира с помощта на Quick Field. Проблемът се решава при различни комбинации от стойности на проектните параметри $\vec{h} = (\alpha_1, \dots, \alpha_5)$, фиг. IV.7б, в съответствие с подходящо избран план (Планиране на експеримента) от числени FEM експерименти. При първия вариант (Фиг. IV.7 а) се варират потенциалите на отделните части на всеки от електродите, а при втория вариант се променят ъглите $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ и α_5 , при зададени потенциали върху всяка от трите части на електродите. След анализ и сравняване на възможностите за хомогенизиране разпределението на електрическото поле в системата, вторият от вариантите е избран като по-подходящ за целите на изследването. На Фиг. IV.8 е показана изследваната област с наложените гранични условия. Полето в тръбата се разглежда като плоско-паралелно, описвано от уравнението на Лаплас относно скаларния електрически потенциал:

$$\nabla^2 V = 0.$$

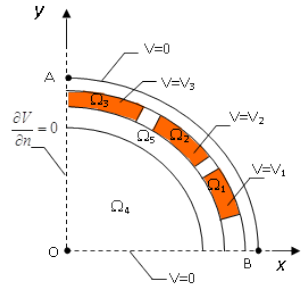
Границите на областта се характеризират така: OA – ос на геометричната симетрия; OB – ос на електрическата антисиметрия; AB – граница по заземения пръстен.

Наложени са следните гранични условия: $\frac{\partial V}{\partial n} = 0$ по линията на симетрия ОА;

$V = 0$ – гранично условие на Дирихле по оста на електрическа антисиметрия ОВ и по външната граница на заземяния пръстен АВ;

$V = V_1$, $V = V_2$ и $V = V_3$ по границата на електродите Ω_1 , Ω_2 и Ω_3 .

Като се използва събраната информация от числените експерименти при решаване на правата задача, моделът на електрическото поле \hat{T}^j в $j=1, \dots, 10$ контролни точки се апроксимира със следния полином от втора степен:



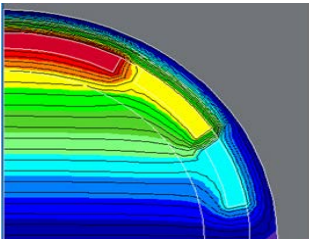
Фиг. IV.8. Гранични условия в изследваната област

$$\hat{T}^j = b_0^j + \sum_{k=1}^p b_k^j h_k + \sum_{k=1}^p b_{kk}^j h_k^2 + \sum_{\substack{k=1 \\ r=k+1}}^p b_{kr}^j h_k h_r \quad (IV.3.1)$$

В уравнението $p = 5$ е броят на проектните параметри h_k , $k=1 \div p$, участващи в нормирани единици. Коэффициентите се определят по метода с най-малките квадрати. Обратната задача се решава като оптимизационна. Критерият за оптималност е квадратичната сума от разликите между $\hat{T}^j(\vec{h})$, изчислено по (IV.3.1) и желаната постоянна стойност $T_{desired}$ на електрическото поле в контролната точка

$$F_{\min}(\vec{h}) = \left\{ \sum_{j=1}^p (\hat{T}^j - T_{desired})^2 \right\}_{\min}$$

Изследването е проведено при следните фиксирани стойности на потенциалите на електродите: $V_1 = 10V$; $V_2 = 7.5V$ и $V_3 = 3.5V$. В Табл. IV.1 са дадени стойностите на проектните параметри в реални стойности, които гарантират хомогенност на електрическото поле в напречното сечение на тръбата (Фиг. IV.9).



Фиг. IV.9. Картина на електрическото поле след оптимизацията

Табл. IV.1

Проектни параметри	Стойности
α_1	28.83 ⁰
α_2	34.46 ⁰
α_3	32.74 ⁰
α_4	28.9 ⁰
α_5	10.33 ⁰

По т. IV.3.2.1. Численото решение изисква дясната страна на основното уравнение да бъде представена в развита форма. Преобразуванията, извършени в два варианта – в Декартова и в цилиндрична координатна система, се оказва, че дават физически еквивалентни резултати. Поради това резултатите са представени в един от двата варианта – декартови координати. За да може да се изследва влиянието на разпределението на възбудителното магнитно поле върху изходното напрежение между електродите, аналитичният израз се представя в по-удобна форма. Правят се следните уговорки: $\vec{v} = v[r(x, y)]\vec{e}_z$, $\vec{B} = B(y)\vec{e}_x$ и $R_1 = R_2$, т.е. разглежда се вариант на тънкостенна тръба, като първа стъпка (*примерът е различен от този в раздел IV.3.1*). В съответствие с горните зависимости *членът в дясната страна на уравнението (IV.1.2) получава една по-универсална форма*, и отново се достига до математически израз, представляващ формален аналог на уравнението на Поасон

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon} \left(B \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial B}{\partial y} \right), \quad (\text{IV.3.2})$$

като при $B = \text{const}$ изразът се опростява в частност до равенството

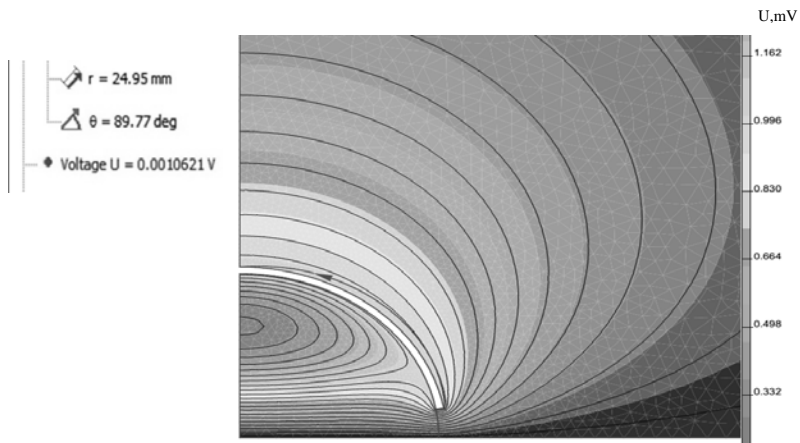
$$\nabla^2 \varphi = -4 \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon} B \frac{v_m}{R_1^2} y. \quad (\text{IV.3.3})$$

Това уравнение вече намери приложение в раздел IV.1.1. *Зависимостта (IV.3.2) се характеризира с това, че описва потенциално поле в материална среда, която се движи в област на пространствено изменящо се магнитно поле.*

По т. IV.3.2.2. Разглежда се *реално устройство подлежащо на подобрене*. То се характеризира със същите параметри като изчислявания вече разходомер от т. IV.1.1, но има *тънкостенна изолационна тръба*. Входните данни са: допустима средна скорост на течния диелектрик $v_m = 0,5 \text{ m/s}$; приложено хомогенно магнитно поле $B = \text{const.} = 0,5 \text{ T}$; вътрешен диаметър на канала $d_1 = 2R_1 = 0,05 \text{ m}$; ъгъл $\alpha = 10 \text{ deg}$, относителна диелектрична проницаемост $\varepsilon_r = 4$; дебелината на стената на изолационната тръба е пренебрежима, т.е. $R_2 = R_1$.

По т. IV.3.2.3. *По аналитичния модел*, представен с уравнение III.2.33 от раздел III.2 на глава III-та (като краен резултат) и входните данни за работната област на преобразувателя, дадени по-горе, полученият числен резултат за поляризационното напрежение между двата електрода на тънкостенния разходомер е $U = 2,315 \text{ mV}$.

Картината на потенциалното поле, определено числено за по-простия от двата случая ($B = \text{const.}$), е представена на фиг. IV.10.



Фиг. IV.10. Картина на еквипотенциалните линии при тънкостенна тръба

Като се има предвид, че потенциалът на горния електрод $U = 1,0621 \text{ mV}$ е равен на напрежението между него и равнината на антисиметрия, следва че напрежението между двата електрода, определено числено, е $U_{es} = 2U = 2,124 \text{ mV}$. Резултатът показва, че относителната грешка между аналитично определената и намерената с използване на числен метод стойност за напрежението между електродите в случая е $\nabla = 8,2 \%$. Отклонението гарантира допустима точност и позволява да бъдат направени следващите стъпки.

Постигане на целта. В контролните точки се задават определен брой комбинации от стойности на \mathbf{B} , фиксирани от конкретен план (Планиране на експеримента). За всяка такава комбинация се решава задачата за анализ на електрическото поле в диелектрика, като се провежда числен „експеримент“ с помощта на МКЕ с определянето на изходното напрежение. Като се обработят резултатите от всички подобни „експерименти“, се намира аналитичното описание $\hat{U}(\mathbf{B})$, което апроксимира реалната теоретична зависимост на напрежението между електродите от разпределението на индукцията. На всяка стъпка от процедурата $\mathbf{B} = B(y_1, y_2, \dots, y_n)$ се апроксимира с кубичен сплайн, с цел да се работи с една непрекъсната аналитична функция. Като резултат от решаването на оптимизационната процедура се намира оптималната комбинация от стойности \mathbf{B}^* в контролните точки, гарантираща максимално изходно напрежение \hat{U}_{\max} . Полученият аналитичен израз $\mathbf{B}^*(\mathbf{Y})$, представен отново с апроксимиращ сплайн описва оптималното разпределение на възбудително-то магнитно поле като непрекъсната функция.

Търсената аналитична зависимост между изходното напрежение и разпределението на възбудителното магнитно поле за решаваната конкретна задача се представя с израза (използва се Matlab):

$$\hat{U}(\mathbf{X}) = 1,91 + 0,0077x_1 + 0,03636x_2 + 0,07x_3 + 0,09x_4 + 0,075x_5 - 0,0009x_1^2 - 0,001x_2^2 +$$

$$+0,003x_3^2 + 0,004x_4^2 - 0,00084x_5^2 + 0,0031x_1x_2 + 0,004x_1x_3 + 0,003x_1x_4 + 0,004x_1x_5 - 0,0017x_2x_3 - 0,0018x_2x_4 - 0,0034x_2x_5 - 0,00034x_3x_4 - 0,0017x_3x_5 - 0,00175x_4x_5 \quad (IV.3.6)$$

Величините x_i в този израз символизират магнитната индукция в нормирани единици в петте наблюдавани точки.

Последна стъпка на изследването е решаването на оптимизационния проблем. Математически тази процедура се дефинира така:

Да се определи оптималната комбинация от стойности $B^*(1), B^*(2), \dots, B^*(5)$, за която

$$\hat{U}(X^*) = \hat{U}(B^*(i)) = \hat{U}_{max}.$$

Получената максимална стойност на изходния параметър (напрежение между електродите) е $U_{max} = \text{abs}(-2.4947, \text{mV})$ (минус знак, тъй като софтуерният продукт е настроен да определя само минимум на целевата функция).

Получава се един и същ краен резултат за три различни стартови точки:

$$\%x0 = [1;1;1;1;1]; \quad \%x0 = [-1;-1;-1;-1;-1]; \quad \%x0 = [0.1;0.1;0.1;0.1;0.1].$$

Резултатите са доста любопитни. Определеното оптимално разпределение на възбудителното магнитно поле е хомогенно с магнитни индукции в наблюдаваните точки, равни на горната гранична стойност на индукцията (т.к. нормираните единици $x_i=2$ съответстват на реална индукция $B^*(i) = 0.6T$). При такова възбудително магнитно поле във всички контролни точки, се достига до максимална стойност на напрежението между електродите: $\hat{U}_{max} = 2.495 \text{ mV}$.

Тъй като максималната стойност на напрежението между електродите е определена само с помощта на апроксимиращата функция (IV.3.5) се налага проверка-потвърждение на получения резултат, като се реши задачата за анализ на електрическото поле в разходомера с помощта на МКЕ за полученото оптимално разпределение $x = [2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2]$. Решението се търси, при условие че устройството е подложено на въздействието на определеното вече оптимално възбудително магнитно поле $B^*=0.6 \text{ T}$, във всички наблюдавани контролни точки. При решаването на правата задача за анализ по МКЕ за изходното електрическо напрежение се получава $U_{max}^* = 2.53 \text{ mV}$. Отклонението между резултатите получени с помощта на апроксимиращия разпределението на индукцията полином и директното изчисление по МКЕ, е само 1.4%.

По т. IV.3.2.5. Целта е да се дефинира формата на напречното сечение на разходомера, която гарантира получаването на максимален изходен сигнал. При това, решението трябва да бъде такова, че да се удовлетворяват следните ограничения:

- да се запази площта на напречното сечение;
- да се запази налягането на течния диелектрик в тръбата.

Поради кръговата симетрия полевата задача се решава само в четвъртинка от напречното сечение на устройството (Фиг. IV.11). Основната задача се формулира така: търси се аналитична връзка между изходния електрически сигнал и координатите на точките, дефиниращи контура на напречното сечение. Тези точки са разположени върху лъчи с начало – координатното начало в централната точка на устройството: $\mathbf{R}\{r_1(90\text{deg}), r_2(75\text{ deg}), r_3(60\text{ deg}), r_4(45\text{ deg}), r_5(30\text{ deg}), r_6(15\text{ deg}), r_7(0\text{ deg})\}$. Приема се, че границите на изменение на тези радиални размери са от 21 mm до 33 mm. Те съответстват в нормирани единици на долното ($\alpha = -2$) и горното ($\alpha = 2$) звездно рамо, според избраната схема на планиране на числения „експеримент“. Изчисленията се извършват при пълен факторен експеримент относно 5 фактора r_1, r_2, \dots, r_5 . Централно композиционно планиране. Използват се допълнително две степени на свобода – дължината на радиалните размери $r_6(15\text{ deg})$ и $r_7(0\text{ deg})$, чрез които се удовлетворява условието да се запази напречното сечение на разходамера при всеки „експеримент“. Анализът на електрическото поле в устройството за тази последователност от N на брой „експеримента“ се извършва по МКЕ, като се изчисляват N съответстващи стойности на напрежението U между електродите. След обработка на натрупания числен материал се определят коефициентите в аналитичното описание $U(\mathbf{R}(\mathbf{r}))$

$$U(\mathbf{r}) = 2,3665 + 0,0387\bar{r}_1 + 0,0773\bar{r}_2 + 0,0553\bar{r}_3 + 0,0204\bar{r}_4 - 0,0349\bar{r}_5 - \\ 0,0121\bar{r}_1^2 - 0,0105\bar{r}_2^2 + 0,0003\bar{r}_3^2 - 0,0182\bar{r}_4^2 - 0,0238\bar{r}_5^2 - 0,0261\bar{r}_1\bar{r}_2 - 0,0271\bar{r}_1\bar{r}_3 - \\ 0,0208\bar{r}_1\bar{r}_4 - 0,0299\bar{r}_1\bar{r}_5 - 0,0197\bar{r}_2\bar{r}_3 + 0,0087\bar{r}_2\bar{r}_4 - \\ 0,0229\bar{r}_2\bar{r}_5 + 0,0074\bar{r}_3\bar{r}_4 + 0,0086\bar{r}_3\bar{r}_5 + 0,0029\bar{r}_4\bar{r}_5.$$

Величините \bar{r}_k за $k = 1, 2, \dots, 5$ представляват нормираните стойности на съответните радиални размери. Връзката между произволен реален размер $r_k(i)$ на k -ти фактор и неговата нормирана стойност $\bar{r}_k(i)$ се дава с израза

$$\bar{r}_k(i) = \frac{\alpha(r_k(i) - r_0)}{0,5\Delta}, \text{ а за конкретния пример } \bar{r}_k(i) = \frac{r_k(i) - 27}{3}$$

Последна стъпка на изследването е решаването на оптимизационния проблем. Математически тази процедура се дефинира по следния начин.

Търси се оптималната комбинация от радиални размери $\bar{r}_1^*, \bar{r}_2^*, \bar{r}_3^*, \bar{r}_4^*, \bar{r}_5^*$ и съответните реални стойности $r_1^*, r_2^*, \dots, r_5^*$, за които $\widehat{U}(\mathbf{R}^*) = \widehat{U}_{\max}$ при удовлетворяване на следните ограничителни условия: $\text{abs}(r_i) \leq 2$.

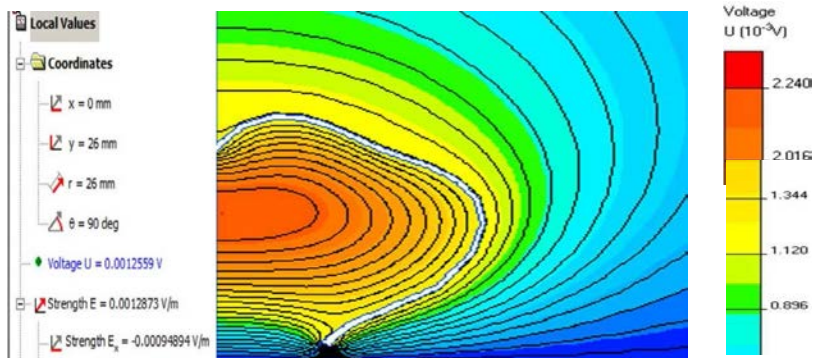
Числените резултати са представени по-долу.

Оптимална точка в областта на нормираните променливи:

$$\mathbf{R}^* = \mathbf{R}^* [-1.0000, 1.4000, 1.0000, 1.6000, -0.4994]$$

Съответно, в областта на реалните променливи тази точка има следните радиални координати в милиметри: $\mathbf{R}^* = \mathbf{R}^* [25.0, 29.8, 29.0, 30.2, 26.0]$;

Максималната стойност на изходното напрежение при оптимална форма на контура, обхващащ напречното сечение на канала, достига стойност $U_{\max} = 2.55 \text{ mV}$. До същия резултат се достига при старт на процедурата за оптимизация от три различни начални точки: $x_0 = [1; 1; 1; 1; 1]$; $x_0 = [-1; -1; -1; -1; -1]$; $x_0 = [0.1; 0.1; 0.1; 0.1; 0.1]$. Оптималната форма на напречното сечение и потвърждението на полученото оптимално решение са демонстрирани на Фиг. IV.11. Изчисляване на полето с помощта на МКЕ при запазено оптимално по форма напречно сечение води до следната стойност за изходното напрежение $U = 2.5118 \text{ mV}$. Съществува само 1.5% отклонение между двата резултата.



Фиг. IV.12. Оптимизираната форма на електродите при максимална чувствителност на разходомера

По т. IV.4. Изводи

1. Направена е проверка за достоверността на изградените аналитични модели.
 - За електромагнитен разходомер с кръгло напречно сечение и с отчитане дебелината на изолационната тръба относителната стойност на процентното отклонение между аналитичен и числен резултат, получен с МКЕ, е с големина 0.5%.
 - За разходомери с правоъгълно напречно сечение относителното отклонение между теоретичен и експериментален резултат (по литературни данни), е 16%, но трябва да се има пред вид че експериментирания опитен образец има много голям краев ефект, който не може да бъде отчетен с аналитичния модел.
 - Формулиран е числен модел, включващ: подходящо модифициран аналитичен израз, гранични условия и числена процедура с използване на МКЕ.
 - Обоснована е тезата, че на този етап, експериментална проверка на аналитичните модели от дисертационния труд не може да се проведе.

2. Изследвано е влиянието на редица фактори, влияещи върху нормалното функциониране на поляризационните разходомери за диелектрични течности: числото на Рейнолдс за разграничаване на ламинарно и турбулентно движение на потока, изменението на диелектричната проницаемост на течността, степента на еднородност на електрическото и магнитното поле.
3. Предложен е алгоритъм и е определена геометрията на части от електродите и техните потенциали, при които в работната област на магнитоелектричен разходомер се създава еднородно електрическо поле.
4. Предложен е нов алгоритъм, определящ оптималното разпределение на възбудително магнитно или електрическо поле, което гарантира екстремална стойност на съществен изходен сигнал на електромагнитно устройство. Алгоритъмът може да бъде приложен при решаване на подобни задачи и в други физически полета от областта на: механиката (напр.обработка на инструменти), разпределението на температурни полета (напр.концентрация на зададена температура в определена област) и пр. Критерият за оптималност може да бъде свързан с повишаване чувствителността на устройството, подобряване на неговите изходни характеристики, синтез на електромагнитно поле с определена структура;

Изследваният обект е електромагнитен разходомер. Установява се, че при наличие на линеен диелектрик в подобен преобразувател с кръгло напречно сечение, максимална стойност на напрежението между електродите се достига, когато възбудителното магнитно поле е хомогенно.

5. Формулиран е оригинален алгоритъм, с помощта на който може да се определи оптималната работна или наблюдавана област на електротехническо устройство. Алгоритъмът може да бъде приложен при решаване на задачи и в областта на други физически полета: в механиката (напр.оптимална форма на работен инструмент), разпределението на температурни полета (напр.уточняване формата на област със зададени температури, която гарантира определена степен на закаляване на работен инструмент) и пр. Целевата функция може да бъде получаване на изходен сигнал с екстремална стойност или увеличаване чувствителността на устройството.

Определена е оптималната конфигурация и оптималните геометрични размери на електродите на поляризационен електромагнитен разходомер: Фиг.IV.11.

По т. IV.5. Заключение. Обект на изследване в дисертационния труд са поляризационни преобразуватели – магнитоелектричен и електромагнитен, с промишлено приложение при измерване разхода на диелектрични течности с

голям вискозитет. Тук се включва по-голямата част от продуктите на нефтената, химическата, хранително-вкусовата промишленост и енергетиката. Основен проблем е точното определяне разхода на флуида. Голяма част от изследванията са теоретично-аналитични, свързани с изграждането на прецизни аналитични модели, които след проверка за достоверност са база за решаване на оптимизационни и обратни задачи. Проверката за точност на аналитичните модели е направена при сравняване на резултатите от тях с такива, получени по числен път с използване на МКЕ, а също и резултати от експеримент, цитиран в литературата, върху опитен образец. Обоснована е тезата (глава IV, раздел IV.1.3), че на този етап, поради обективни причини, експериментална проверка на аналитичните модели от дисертационния труд не може да се проведе. Предложени са решения относно оптимална геометрия на магнетоелектричен разходомер, гарантираща необходимото равномерно разпределение на възбудителното електрическо поле в работната област; оптимално разпределение на възбудителното магнитно поле и оптимална форма на електродите в електромагнитен разходомер, гарантиращи повишена чувствителност на преобразувателя. За целта е изграден числен модел, включващ: подходящо модифициран аналитичен израз, гранични условия и числена процедура с използване на МКЕ. Предложени са оригинални изчислителни алгоритми. Накратко, уточнените в уводната част задачи, са изпълнени в представения дисертационен труд. В резултат може да се формулират следните научни, научно-приложни и приложни приноси.

IV.5. Научни, научно-приложни и приложни приноси на дисертационния труд

На базата на проведените изследвания и получените резултати може да се приеме, че уточнените в уводната част на представения дисертационен труд задачи са изпълнени и може да се формулират следните научни, научно-приложни и приложни приноси на разработката (при представянето им се посочва към коя от предвидените в първа глава задачи на дисертацията се отнася всеки от тях):

- **По задача 1.** Аналитично са изведени входно-изходните връзки между външния възбудител и обусловената от него реакция при поляризационен преобразувател (магнетоелектричен, електромагнитен). В резултат са изведени следните зависимости:
 - *При магнетоелектричен разходомер* – аналитичната зависимост на възбудения магнитен поток от средната скорост на движещия се флуид с отчитане на неговите диелектрични характеристики и геометричните параметри на преобразувателя.
 - *При електромагнитен разходомер:*
 - При канал с кръгла форма, аналитичната зависимост на свободния електрически заряд върху външната повърхност на

всеки от електродите от възбудителното магнитно поле.

- Аналитичната зависимост на изходното поляризационно напрежение, при правоъгълно и при кръгло напречно сечение на канала, с отчитане на динамиката, диелектричните качества на движещия се флуид и геометрията на устройството.
- **По задача 2.** Формулирана и решена е обратната полева задача за хомогенизиране на електрическото поле в диелектрика на магнетоелектричен преобразувател. Изведени са аналитично необходимите условия за създаването на оптимална геометрия и разположение на структурираните електроди в работната област на разходомера. Аналитичните изводи са потвърдени с числен пример по МКЕ.
- **По задачи 3 и 4.** Формулиран и разработен е числен модел на електромагнитен преобразувател на базата на: модифицирано уравнение, дефиниращо връзките между полетата в диелектрика при уточнени гранични условия и разработена числена процедура по МКЕ. Доказана е достоверността на аналитичния модел при канал с кръгла форма. Показано е, че при отчитане дебелината на изолационната тръба относителното отклонение между аналитичния и числения резултат по МКЕ, е едва 0,5 %.
- **По задача 5.** Изследвано е влиянието на редица фактори, влияещи върху нормалното функциониране на електромагнитните разходомери за диелектрични течности.
 - Установява се, че независимо от стойността на диелектричната константа стената на тръбата влияе винаги деполяриращо.
 - Определена е точността и границите на валидност на използвания в литературата опростен израз за капацитета на системата – полуцилиндрични електроди-диелектричен флуид, чрез която се изчислява поляризационното напрежение.
- **По задача 6.** Предложени, разработени и приложени за изследване са 2 оригинални алгоритъма за оптимизация:
 - за определяне оптималното разпределение на възбудително магнитно или електрическо поле, което гарантира екстремална стойност на изходния сигнал на електромагнитно устройство.
 - алгоритъм, с помощта на който може да се определи оптималната конфигурация на работната (или наблюдаваната) област на изследваното електротехническо устройство.

И в двата случая целевата функция води до получаването на изходен сигнал с екстремална стойност и до увеличаване чувствителността на устройството. В резултат от прилагането на тези алгоритми се установява:

- В електромагнитен преобразувател с кръгло напречно сечение максимална стойност на напрежението между електродите се достига, когато възбудителното магнитно поле е хомогенно.
- Оптимална конфигурация и оптимални геометрични размери на електродите на поляризационен електромагнитен разходомер, които са представени на Фиг. IV.11.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ, СОБСТВЕНИ И В СЪАВТОРСТВО

1. Iatcheva I., Stancheva R., **Andreev A.**, Inverse field problem in a magneto electric flowmeter, 54th Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Ilmenau University of Technology, 07-11September, 2009.
2. **Андреев А.**, Анализ на поляризационен преобразувател с кръгло напречно сечение, Thirid International Scientific Congres, on CD, vol 3, pp. 253-257, 4-6 October, Varna, Bulgaria, 2012 .
3. **Andreev A.**, Iatcheva I., Stancheva R., Theoretical Model of Electromagnetic Flowmeter, Verification and Sensitivity Increasing, Pilsen, Czech Republic, 24-26 June, 2013 (on CD)
4. **Andreev A.**, Analysis of a contact flow meter with exciting electric field, XVIII-th International 29-31 May 2014, Bourgas, Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2014, Bulgaria
5. **Andreev A.**, Iatcheva I., Karastoyanov D., Stancheva R., Electromagnetic Flow Meter Efficiency, World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index Vol:08 N:09 Part I, pp. 181-185, Switzerland, 20146
6. **Andreev A.**, Theoretical analysis of polarization flowmeter with circular cros section while taking the pipe thickness into account, ELMA-XIV-th International Confrence on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ISSN 1313-4965,pp. 77-80, 1-3 October, Varna, Bulgaria, 2015.
7. **Andreev A.**, Iatcheva I., Stancheva R., Shape optimization of electromagnetic flow meter, ISEF 2015 – XVII International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering,Valencia, Spain, September 10-12, 2015 (on CD).
8. Iatcheva I., **Andreev A.**, Stancheva R. and Lilyanova I., Electromagnetic flow meter field distribution maximizing device sensitivity, Materials Science Forum ISSN:0255-5476, Vol.856, pp157-162, doi:10.4028/www.scientific.net/ MSF.856.157, © 2016 Trans Tech Publications, Switzerland.
9. **Andreev A.**, Panov E., Polarizing Converter with Rectangular Cross Section, International Scientific Symposium, Electrical Power Engineering, ISBN 978-954-20-0762-3, pp 134-137, 6-8 October, Varna, Bulgaria, 2016.

Analysis of the Electrodynamic Processes in Polarizing Converters

by Andrey D. Andreev

(ABSTRACT)

In this dissertation some electromagnetic and magneto-electric flowmeters for measuring the consumption flow of dielectric fluids are observed and analyzed. In the first chapter some basic concepts being the scientific basis in the theory of the flowmeters and the electromagnetic field of moving media are presented. A research was conducted on the status and development of the electrical methods for measuring the consumption of dielectric fluids. In chapter two an analytical study of the electromagnetic field in moving dielectric fluid in external uniform electric field was made. The analytical dependence of the excited magnetic flux on the rate of the fluid flow has been derived. The location of the electrodes in the working area of the flowmeter for creation of homogeneous electric field in cylindrical tube is defined. In the third chapter an analysis of the electromagnetic field is conducted for a moving dielectric fluid in an external uniform magnetic field. There the excited electric field because of the polarization of the moving dielectric for flowmeters with circular and rectangular cross-sections is explored. In chapter four it has been verified the accuracy of the existing analytical models using numerical methods (FEM). The influence of some factors on the accuracy of the flow meters is investigated, too. The reverse field optimization tasks are solved in order to increase the sensitivity of the flowmeters.

