

# ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ИНЖЕНЕРЕН АНАЛИЗ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНО ПОВЕДЕНИЕ ЧРЕЗ ТРИМЕРНИ МОДЕЛИ

## POSSIBILITIES FOR ENGINEERING ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC BEHAVIOUR OF 3D STRUCTURES

Г. Тодоров<sup>1</sup>, К. Камберов<sup>1</sup>, А. Иванов<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>ТУ – София)

Изследването разглежда възможностите за моделиране на електромагнитни физични процеси при използване на тримерен виртуален прототип. Той позволява да се оптимизират конструктивните параметри на етапа на проектиране на изделието, дори и при решаване на тримерни физични задачи. Възможностите на инженерните анализи в тази посока са демонстрирани чрез примерна конструкция на стъпков електродвигател с постоянен магнит.

Presented research concerns the possibilities of electromagnetic process modeling via 3D virtual prototype. It allows to optimize design parameters of developed product at its earliest stage even in cases of 3D physical problems. Engineering analysis capabilities are demonstrated through a sample design of permanent magnet stepper motor.

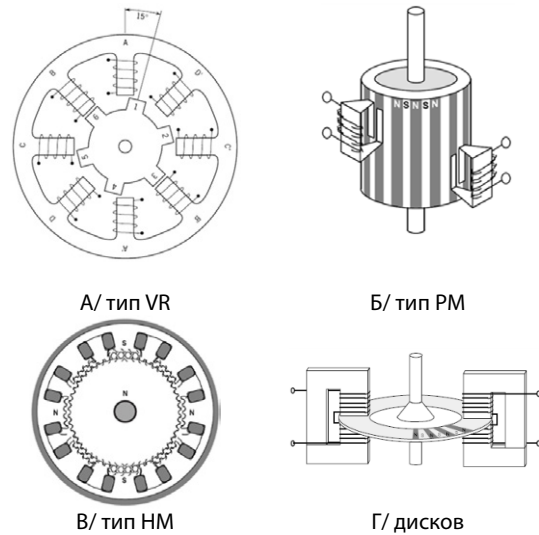
**Key words:** RAPID PROTOTYPING, DIRECT METAL PRODUCTION, DIRECT PLASTIC PRODUCTION

### Увод

Процеса на развитие на продукта (ПРП) обикновено следва пътя на итеративното конструиране, съпътствано от изискващи време и средства физически прототипи. Интензивното развитие на компютърната технология доведе до създаването на изцяло нова парадигма в областта на развитието на продуктите – виртуалното инженерство. Виртуалното инженерство включва широк спектър от инженерни дейности, като анализи, симулации, оптимизации и др., свързани както с процеса на конструиране (CAD), така и с този на производство (CAM). Инженерните анализи са основен елемент виртуалния прототип и са все по-достъпни за приложение при развитието на конвенционален тип продукти. Освен това, те дават възможност да се симулират и комплексни мултифизични проблеми, каквито например са задачите при разработване на електродвигатели. В този случай механични и електромагнитни величини се намират в пряка връзка. Обикновено такъв вид електромагнитни задачи се решават при използване или на емпирични зависимости, или на двумерен модел на характерно сечение на електродвигателя. Тези подходи обаче не са подходящи при детайлното изследване и развитие на някои видове стъпкови електродвигатели.

Стъпковите електродвигатели се отличават с това, че преместват своя ротор (при ротационни двигатели) или плъзгач (при линейни двигатели) на точно определено ъглово или линейно разстояние – стъпка – и да остават в новото положение за неограничено дълго време. По своята конструкция статорът и роторът на ротационните стъпкови електродвигатели значително се различават от тези на променливотоковите и постояннотоковите електродвигатели. Статорът се изработва с явни полюси и съдържа 1-24 фази, които се свързват към

системата за управление на двигателя с цел създаване на въртящо магнитно поле.



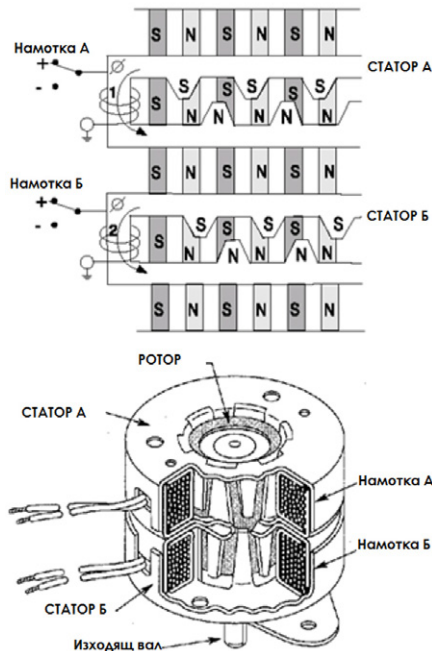
**Фиг.1** Подвидове стъпкови електродвигатели

Роторът се изработва също с явни полюси, към него не се подвежда електрическа енергия и може да бъде един от следните три основни типа:

- Тип VR (Variable-Reluctance) - изработен от магнитномек материал с необходимия брой полюси;
  - Тип PM (Permanent Magnet) – изработен от постоянен магнит с необходимия брой полюси;
  - Тип НМ (Hybrid) – комбинация от горните два типа.
- Съществуват и някои специфични конструкции стъпкови ЕД, като например дисковите. [1]

Стъпковите електродвигатели с постоянен магнит (тип PM) намират широко приложение в съвременната

индустрия. Те имат относително ниска себестойност и резолюция и много добри механични показатели (висок въртящ момент). По-подробна схема на този тип ЕД е показана на фигурата по-долу.



Фиг.2 Принципна схема на стъпков ЕД тип РМ

Определянето на конструктивните параметри на този тип ЕД може да стане емпирично, с известни приближения. Двумерен инженерен анализ не може да бъде извършен поради надлъжното разположение на полюсите на статора. Това налага използването на 3D симулационни модели, които позволяват относително точно възпроизвеждане на магнитното поле и определяне на работните параметри (индукция и напрегнатост на магнитното поле, въртящ момент) на проектираната машина.

### Методика на провеждане на анализа

Електромагнитният анализ се основава на решаване на уравненията на Максвел, съставени за моделираната нехомогенна област. Ползват се два подхода за това решение – чрез функциите на:

- магнитният **векторен** потенциал - ползват се две основни стратегии – основани на възли или на ръбове;
- магнитният **скаларен** потенциал – ползват се три подвида – редуциран, диференциален и обобщен подходи.

Конвенционалните задачи се отнасят до решението на статична задача, което в известна степен опростява алгоритъма. [2, 4]

Нехомогенността на разглежданата област пък включва три типа материали: електропроводящи, неелектропроводящи магнетнопроницаеми и магнетонепроницаеми. Първият тип се отнася до проводници (намотки), вторият – до магнетопроводи, а третият обхваща останалите компоненти и главно въздушната среда. Важно е да се отбележи че при този

тип анализи въздушната среда се разглежда като част от изчислителния модел.

Предложена е методика за изграждане на изчислителен симулационен модел, основана на особеностите на статичният електромагнитен анализ. Принципна схема с основните стъпки е показана на фигурата по-долу. Тя включва шест основни етапа:

- **Подготовка на 3D геометрия:** състои се в съставяне на опростен геометричен модел (виртуален прототип) на изследваният обект, включващ електрическите проводници и магнетопроводите;
- **Генериране на околна медия:** изгражда се околната среда, обхващаща пълният 3D модел. Размерите ѝ зависят както от моделираните обекти (геометрия), така и от очакваните параметри на магнитното поле;
- **Съставяне на изчислителен модел:** създаване на мрежата от крайни елементи и дефиниране свойствата на материалите;
- **Гранични условия:** включват източници на електрически ток, условия за непрекъснатост на средата и за симетрия/цикличност;
- **Избор параметри на численото решение:** съобразно решаваната физична задача се избира някой от по-горе изброените подходи, като се определят и някои допълнителни параметри на нелинейния числен анализ;
- **Обработка на резултатите:** освен преглед на магнитните показатели (индукция, напрегнатост), се извършват някои допълнителни частни решения за определяне на механичните показатели – сила и въртящ момент.



Фиг.3 Принципна схема на методиката за провеждане на анализа

Така описаната методика е демонстрирана чрез конкретен пример.

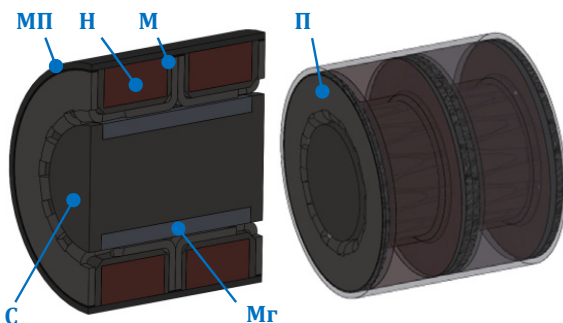
### Пример: 3D електромагнитен анализ на стъпков ЕД

Ползваният пример се отнася до стъпков ЕД с постоянен магнит, ползван за аксиален актуатор за задвижване на плунжера на хидравличен клапан. Оптималното отношение на обем към изходящ въртящ момент е основното предимство за ползване на този тип ЕД. Въпреки голямото многообразие от налични конструкции ЕД на пазара, спецификата на приложението му (възможен аксиален размер и

ограничен радиален) изисква развитието на нова конструкция.

#### Подготовка на 3D геометрия

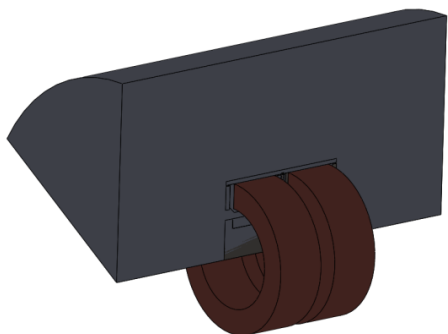
Симулационният модел (фиг. 4) е изграден въз основа на съществуващият CAD модел, ползван за развиване на детайлната конструкция. Той включва само компоненти, имащи пряко отношение към изследваният електромагнитен проблем: статор, състоящ се от 4 бр. полюса (П), 2 бр. макари (М), 2 бр. намотки (Н), монтирани в магнитопровод (МП) и ротор, състоящ се от 12 бр. магнити (Мг) и сърцевина от магнитолека стомана (С). Всички малки геометрични обекти (фаски, малки закръгления) са премахнати с цел опростяване. Намотките са моделирани като твърдотелен пръстен.



Фиг.4 Дефиниране на геометрия на изчислителния модел

#### Генериране на околна медия

Околното пространство е важен елемент за възпроизвеждане на магнитния поток, създаден от протичащия в намотките ток и от постоянните магнити в ротора. Поради цикличната геометрия на изследваният ЕД, е използван само един сегмент от общият модел, заключаващ се в рамките на 60°. Въздушната медия е представена също като сегмент от цилиндър, като размерите са подбрани с оглед да не влияят върху електромагнитния поток. Окончателният вид на ползваният за изчислителния модел геометричен такъв е показан на фигура 5.



Фиг.5 Сегментен геометричен модел

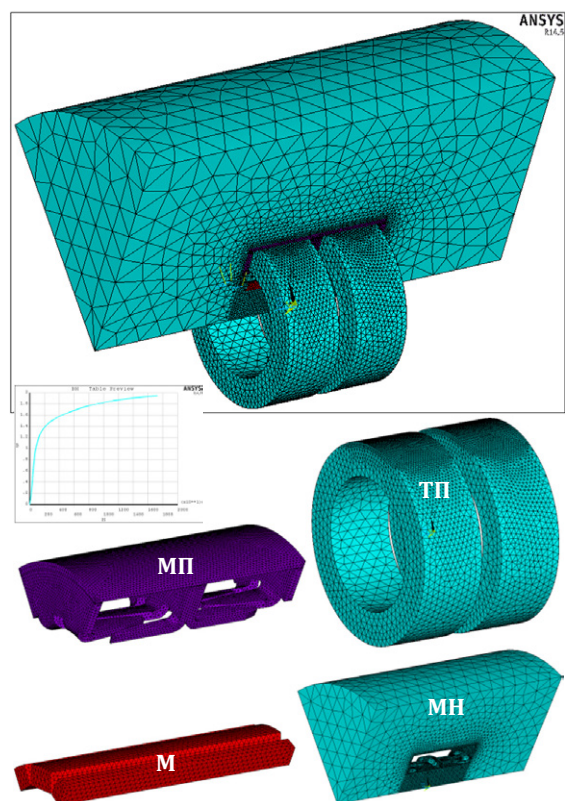
#### Съставяне на изчислителен модел

Изчислителният модел е съставен от четири основни типа като материал компоненти:

- **Магнитопроводящи (МП)** – включват металните компоненти на статора – полюси и магнитопровод. Материалните характеристики включват ВН крива, съответстваща на ползваната стомана;

- **Токопроводящи магнитонепроницаеми (ТП)** – намотките. Относителна магнитна проницаемост равна на 1;
- **Магнитно непроницаеми (МН)** – макарите на намотките, въздушната среда и сърцевината на ротора. Относителна магнитна проницаемост равна на 1;
- **Магнити (М)** – разположени в сърцевината на ротора. Относителна магнитна проницаемост равна на 1,05 и коерцитивна сила според намагнитеността на магнита.

Изградената мрежа от крайни елементи за компонентите и общият вид на модела са показани на фигура 6 по-долу.



Фиг.6 Изчислителен модел от крайни елементи

#### Гранични условия

Граничните условия за този тип анализ се отнасят само до електромагнитни величини и са два основни вида:

- **Електрически** – големина и посока на тока, зададени чрез примитив за намотка, включващ нейните параметри;
- **Магнитни** – указване на отдалечено пространство посредством големината на магнитния скаларен потенциал и указване на цикличност на геометрията.

Допълнително се указва и в рамките на кои елементи ще се търсят резултантни механични величини (сила).

#### Избор параметри на численото решение

Конкретният пример е подходящ да бъде решен чрез подход, ползващ диференциален магнитен

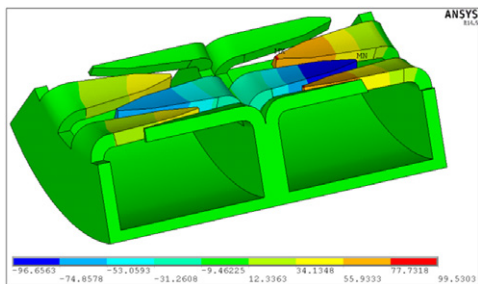
скаларен потенциал. Това е подходящо за широк кръг проблеми, включващи нелинейни характеристики на материала и разглеждащи магнитно поле, генерирано от постоянни магнити. Друг важен компонент е указването на търсената степен на точност на решението. Това става посредством задаване числена стойност на границата за привеждане на математичното решение на нелинейната задача.

### Обработка на резултатите

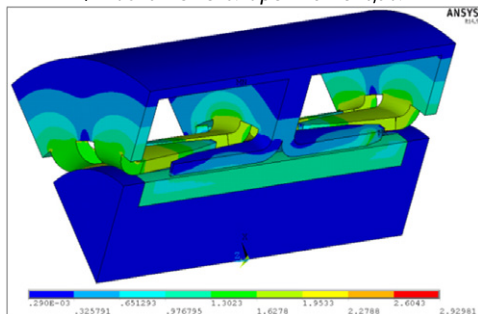
Основният търсен резултат има механичен характер – сила в ротора. Това се явява вторично пресмятане, като са възможни два метода – въз основа на виртуалната работа и въз основа на тензора на Максвел. Виртуалната работа се основава на диференциране на енергията спрямо преместването за елементарен обем и е подходяща за въздушната междина, окръжаваща подвижният компонент. Ползването на тензора на Максвел е подходящо при оценка на сили, възникващи във феромагнитни региони. [3, 5]

Електромагнитните параметри на резултатите са важни за анализ на конструкцията и последваща оптимизация. Те са три основни типа разпределения в изследваните тела:

- магнитен скаларен потенциал – показано на фигура 7 А/ относно магнитопроводящите части;
- индукция на магнитното поле – показан на фигура 7 Б/ относно магнитопроводящите части и магнитите;



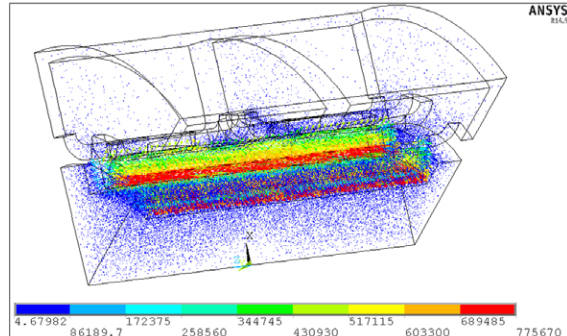
А/ Магнитен скаларен потенциал



Б/ Индукция на магнитното поле

**Фиг.7** Растерно представени резултатни параметри

- напрегнатост на магнитното поле – показана на фигура 8 относно магнитопроводящите части.



**Фиг.8** Векторно представени резултатни параметри

Внимателният анализ на получените резултати предоставя възможност за оценка на балансираността на конструкцията. Възможно е да бъдат съставени и пресметнати голям брой варианти по отношение на материали, геометрия и работни натоварвания за сравнително кратко време и стойност. Тези възможности не могат да бъдат постигнати чрез физическо прототипиране.

### Обобщение:

Предложена е методика за 3D числен електромагнитен инженерен анализ, основана на ползването на виртуален прототип и специализиран софтуер за инженерни анализи. Тя позволява решаването на проектантски задачи за които е неприложима конвенционалната методика, основана на 2D модел или на емпирични зависимости. Това изследване има отношение към широк кръг проблеми в областта на електромагнитните явления. Възможностите са демонстрирани чрез пример за симулация на стъпков ЕД с постоянни магнити, като са посочени предимствата на ползването на виртуални прототипи спрямо физически такива. Те са най-вече във връзка с оценката на непряко измервани величини и бързата промяна и оценка на различни конструктивни варианти.

### Благодарности

Това изследване е осъществено с техническа инфраструктура изградена по проект ДУНК-01/3 на Фонд „Научни Изследвания“ при Министерство на Образованието, Младешта и Науката.

### Литература:

1. Condit R., Jones D.W., Stepper motors fundamentals. AN907, Microchip Technology Inc., 2004
2. Červ V., Pek J., Modelling and analysis of electromagnetic fields in 3D inhomogeneous media, Surveys in Geophysics, vol. 11, iss. 2-3, pp 205-229, 1990
3. Fei W., Kwong Luk P., Shen J., Torque Analysis of Permanent Magnet Flux Switching Machines with Rotor Step Skewing, IEEE Transactions on Magnetics, Volume 48, Issue 10, Pages 2664 - 2673, 2012
4. Song-min W., et al, Electromagnetic Field Analysis and Dynamic Simulation of a Two-Valve Solenoid Actuator, IEEE Transactions on Magnetics, vol.29, no.2, 1993
5. Townbridge C. W., Sykulski J. K., Some key developments in computational electromagnetics and their attribution, IEEE Antennas and Propag. Magazine, vol. 42, no. 6, pp. 503 – 508, 2006