



Janusz Turowski

Elektrodynamika techniczna

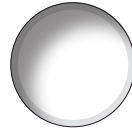


PWN



Elektrodynamika techniczna

Mojej Rodzinie



Janusz Turowski

Elektrodynamika techniczna

 PWN

Projekt okładki i stron tytułowych **Przemysław Spiechowski**

Zdjęcie na okładce **Transformator HVDC produkcji ABB;**
zdjęcie udostępnione przez ABB Sp. z o.o.

Wydawca **Izabela Mika**

Redaktor **Anna Bogdanienko**

Produkcja **Mariola Grzywacka**

Łamanie **Grafini, Brwinów**

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo
Więcej na www.legalnakultura.pl
Polska Izba Książki

Wydanie pierwsze i drugie ukazało się nakładem Wydawnictw Naukowo-Technicznych
Warszawa 1968, 1993

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA
Warszawa 2014

ISBN 978-83-01-17540-5

Wydanie trzecie (pierwsze w WN PWN)

Wydawnictwo Naukowe PWN SA
tel. 22 69 54 321, faks 22 69 54 288
infolinia 801 33 33 88
e-mail: pwn@pwn.com.pl, www.pwn.pl

Spis treści

Wykaz oznaczeń	9
Przedmowa	13
1. Metody badań i materiały konstrukcyjne	21
1.1. Metody badań	21
1.2. Materiały konstrukcyjne	25
1.2.1. Struktura i właściwości fizyczne metali	25
1.2.2. Nadprzewodnictwo	44
1.2.3. Właściwości magnetyczne ciał (ferromagnetyzm)	51
1.2.4. Półprzewodniki i dielektryki	91
2. Podstawowe równania pola elektromagnetycznego	96
2.1. Wyjściowe prawa i równania elektrodynamiki	96
2.2. Formułowanie i metody rozwiązywania równań różniczkowych pola	103
2.3. Środowiska anizotropowe	118
2.4. Środowiska nieliniowe	122
2.5. Podstawowe równania magneto hydrodynamiki i magnetogazodynamiki	125
2.6. Elektrodynamika nadprzewodników	130
2.7. Elektrodynamika środowisk nieliniowych	133
2.8. Elektrodynamika urządzeń półprzewodnikowych	133
2.9. Elektrodynamika układów elektrochemicznych	134
2.10. Ogólne równanie falowe	135
2.11. Metoda Fouriera	137
2.12. Równanie falowe we współrzędnych cylindrycznych	139
2.13. Fala elektromagnetyczna płaska	141
2.14. Odbicie i załamanie fali płaskiej	155
3. Przenoszenie i przetwarzanie mocy pola	162
3.1. Twierdzenie Poyntinga. Wektor Poyntinga	162
3.2. Wnikanie energii elektromagnetycznej do masywnej półprzestrzeni przewodzącej	165
3.3. Strumień mocy pola przy przejściu przewodów przez ścianę stalową	168
3.4. Strumień mocy pola w kablu współosiowym i szynie ekranowanej	171

3.5.	Strumień mocy pola w kondensatorze, cewce i transformatorze	173
3.6.	Strumienie mocy pola i ich przetwarzanie w maszynach wirujących	175
3.6.1.	Strumień mocy pola elektromagnetycznego w szczelinie maszyny indukcyjnej	175
3.6.2.	Strumienie mocy pola w maszynie synchronicznej	177
4.	Ekranowanie części konstrukcyjnych	181
4.1.	Rodzaje i zadania ekranów	181
4.2.	Ekran i boczniki magnetyczne	184
4.2.1.	Ekran kulisty i poprzeczny cylindryczny	184
4.2.2.	Podłużne ekrany magnetyczne	187
4.3.	Ekran elektromagnetyczne. Falowa metoda obliczeń	194
4.3.1.	Przydatność praktyczna falowej metody obliczeń pola	194
4.3.2.	Ekran przenikalny przy jednostronnym padaniu fali	194
4.3.3.	Ekran przenikalny przy dwustronnym padaniu fali	201
4.4.	Straty mocy w ekranach	204
4.4.1.	Wektor Poyntinga i straty mocy w ekranie jednostronnym	204
4.4.2.	Wektor Poyntinga i straty mocy przy obustronnym symetrycznym padaniu fali	208
4.5.	Ekranowanie kadzi transformatorów	213
4.5.1.	Ekranowanie magnetyczne (bocznikowanie) kadzi	214
4.5.2.	Ekranowanie elektromagnetyczne kadzi	218
4.5.3.	Trójwymiarowa analiza komputerowa i projektowanie interaktywne ekranów	222
4.6.	Silniki indukcyjne z ekranowanym i wielowarstwowym wirnikiem	227
4.6.1.	Charakterystyka ogólna	227
4.6.2.	Równania podstawowe silników indukcyjnych wielowarstwowych	228
4.7.	Ekranowanie w dużych generatorach	233
4.7.1.	Ekranowanie (bocznikowanie) magnetyczne i kształtowanie pola	233
4.7.2.	Ekranowanie elektromagnetyczne w generatorach	235
4.8.	Ekranowanie przy nagrzewaniu indukcyjnym	236
4.9.	Ekranowanie szyn i przewodów	237
4.9.1.	Ekran cylindryczny przewodu pojedynczego	237
4.9.2.	Ekran cylindryczny w poprzecznym polu równomiernym	246
4.9.3.	Ekran szyn układów blokowych w elektrowniach	248
4.10.	Pole elektromagnetyczne w ekranach wielowarstwowych	254
4.10.1.	Przewodnik dwuwarstwowy	254
4.10.2.	Wpływ izolacji pod ekranem	256
5.	Pole magnetyczne przy powierzchniach żelaznych	258
5.1.	Metoda odbić zwierciadlanych	258
5.1.1.	Pojedyncze odbicie prądu stałego	258
5.1.2.	Zastosowanie teorii pola stałego do pól przemiennych	261
5.1.3.	Odbicie magnetyczne prądu w cylindrze żelaznym	265
5.1.4.	Wielokrotne odbicia zwierciadlane	267
5.1.5.	Odbicia magnesów i obwodów z prądem stałym	270
5.2.	Pole połączeń czołowych maszyn elektrycznych	273
5.3.	Pole przepustów	276

5.4.	Pole szyn w pobliżu powierzchni stalowej	278
5.5.	Pole rozproszenia w transformatorach i żłobkach maszyn elektrycznych	281
5.5.1.	Zastosowanie metody wielokrotnych odbić zwierciadlanych	281
5.5.2.	Metody rozwiązywania pola w oknie transformatora za pomocą szere- gów Fouriera	282
5.5.3.	Metody numeryczne; rozwiązywanie pola magnetycznego rozproszenia	285
5.5.4.	Żłobek maszyny indukcyjnej głębokożłobkowej	287
5.5.5.	Pole w szczelinie maszyny elektrycznej	292
5.6.	Pole pary przewodów w pobliżu ściany stalowej	296
6.	Zjawiska elektromagnetyczne w metalach o stałej przenikalności	301
6.1.	Zastosowanie metody wielokrotnych odbić fali	301
6.2.	Błacha elektrotechniczna	301
6.3.	Straty mocy przy przejściu przewodu przez ścianę stalową	309
6.4.	Straty mocy w pokrywach stalowych ze wstawkami niemagnetycznymi	313
6.5.	Indukowane przebiegi niustalone	316
6.6.	Wirnik masywny silnika indukcyjnego	319
6.7.	Wirnik kubkowy	325
6.8.	Zasady nagrzewania indukcyjnego	327
6.9.	Tory wieloprądowe	330
7.	Zjawiska elektrodynamiczne w ciałach ferromagnetycznych	340
7.1.	Aproksymacja charakterystyk magnesowania	340
7.2.	Metody uwzględniania zmiennej przenikalności magnetycznej $\mu = (H)$	346
7.2.1.	Metoda Rosenberga (1923) dla przewodów żelaznych	347
7.2.2.	Metoda fal prostokątnych	348
7.2.3.	Metoda Nejmana (1950)	349
7.2.4.	Przenikalność zastępcza	353
7.2.5.	Metody komputerowe	354
7.3.	Zależność strat rozproszonych w masywnych częściach stalowych trans- formatora od prądu i temperatury	357
7.4.	Straty mocy w stalowych pokrywach transformatorów	360
7.5.	Obliczanie strat rozproszonych w masywnych ścianach stalowych metodą szeregów Fouriera	363
7.5.1.	Metoda ogólna	363
7.5.2.	Wzory analityczne w przypadku sinusoidalnego rozkładu pola na po- wierzchni stali	367
7.5.3.	Komputerowe obliczanie strat mocy w płycie stalowej umieszczonej w polu szyn równoległych	370
7.6.	Straty mocy w kadzi transformatora	375
7.6.1.	Dwuwymiarowe rozwiązanie numeryczne	375
7.6.2.	Trójwymiarowe obliczanie analityczno-numeryczne pola rozproszenia i strat mocy w kadzi o stałej przenikalności	376
7.6.3.	Komputerowe, trójwymiarowe, analityczno-numeryczne (MAN-3D) obliczanie rozproszonych strat mocy w kadzi transformatora	382
7.6.4.	Trójwymiarowe obliczanie numeryczne pól rozproszenia w transfor- matorach trójfazowych	388
7.6.5.	Wdrożenie i weryfikacja programów klasy MSR-3D w przemyśle	394

8. Siły w układach elektrodynamicznych	402
8.1. Zasady obliczania sił działających na szyny i uzwojenia transformatorów ..	402
8.2. Siły działające na szyny umieszczone w pobliżu stalowych elementów konstrukcji	410
8.3. Siły działające na powierzchnię przewodników	410
8.4. Siły w części żłobkowej uzwojeń maszyn elektrycznych	411
8.5. Siły i momenty reluktancyjne	417
9. Lokalne nagrzewanie się części konstrukcyjnych	420
9.1. Elektromagnetyczne kryteria lokalnych przegrzań	420
9.2. Metody zapobiegania miejscowym przegrzaniom konstrukcji	429
9.3. Nagrzewanie się pokryw transformatorów	433
9.4. Dopuszczalny prąd w przepustach	433
9.5. Straty mocy od prądów wirowych i lokalne przegrzania w kominkach transformatorów	435
9.6. Obliczenia komputerowe kominków i boczników	435
9.6.1. Kominki jednofazowe	436
9.6.2. Model symulacyjny MSR-3D kominków trójfazowych	439
9.6.3. Obliczanie reluktancji dla sieci MSR-3D	440
10. Metody badań eksperymentalnych	443
10.1. Weryfikacja eksperymentalna obliczeń teoretycznych	443
10.2. Zasady teorii elektrodynamicznego podobieństwa	447
10.3. Zasada modelowania indukcyjnych urządzeń grzejnych	452
10.4. Modelowanie torów wielkoprądowych	454
10.5. Modelowanie transformatorów i ich części	455
10.6. Metoda termometryczna pomiaru strat jednostkowych	458
10.7. Badania dopuszczalnych przewzbudzeń transformatorów	468
10.8. Pomiar mocy przy niskich współczynnikach mocy	470
10.9. Inne metody pomiaru	476
10.10. Diagnostyka elementów metalowych	482
10.11. Krytyczna odległość kadzi od uzwojeń w transformatorze	483
10.12. Wpływ kolektorów strumienia rozproszenia	490
Wnioski	493
Dodatki	495
Literatura	502
Skorowidz	518

Wykaz oznaczeń

- A** – magnetyczny potencjał wektorowy ($\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \equiv \nabla \times \mathbf{A}$), wartość chwilowa; A – moduł [Wb/m]
- A – pole powierzchni, $d\mathbf{A}$ – wektor elementu pola prostopadły do powierzchni [m²]
- A_l – obciążenie liniowe (okład prądowy), wartość chwilowa; A_{ml} – wartość maksymalna [A/m]
- B** – wektor indukcji, wartość chwilowa; B – moduł wektora; $B_m = B_m e^{j\omega t}$, gdzie $\underline{B}_m = |B_m| e^{j\omega t}$ – wielkości zespolone (wskazy); B^* – wielkość sprzężona, B_m – wartość maksymalna w czasie, $B_{sr, m}$ – wartość maksymalna, średnia w przestrzeni; B_t – składowa styczna; B_n – składowa normalna; B_s – wartość powierzchniowa (*surface*); B_{nas} – indukcja nasycenia (T = Wb/m²)
- b, a, d, D, l, L – wymiary liniowe [m]
- C – pojemność kondensatora [F]
- c – ciepło właściwe [J/(kg · K)]
- c – prędkość światła w próżni [m/s]
- $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ – wektor indukcji elektrycznej, przesunięcia elektrycznego [C/m²]
- D – średnica wewnętrzna stojana, kolumny transformatora [m]
- d – grubość blachy, ekranu [m]
- e – wartość chwilowa siły elektromotorycznej SEM, napięcie źródła [V]
- $e = 1,60219 \cdot 10^{-19}$ C – ładunek elektronu
- e – podstawa logarytmu naturalnego ($e = 2,718$)
- E** – wektor natężenia pola elektrycznego, wartość chwilowa [V/m]; inne symbole jak przy **B**; \mathbf{E}_{ob} – natężenie pola elektrycznego obce
- E_u – siła elektromotoryczna, wartość skuteczna [V]; E_m – wartość maksymalna [V]
- F** – wektor siły [N]
- F – przepływ, siła magnetomotoryczna SMM, amperozwoje; F_m – wartość maksymalna [A]

- f – częstotliwość [Hz]
 \mathbf{H} – wektor natężenia pola magnetycznego, wartość chwilowa; H_m – wartość maksymalna [A/m]; inne symbole jak przy \mathbf{B}
 H – wymiar liniowy
 h – wysokość [m]
 I – prąd elektryczny; wartość skuteczna; I_m – wartość maksymalna [A]
 $i = \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s}$ – wartość chwilowa prądu elektrycznego
 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ lub $\mathbf{1}_x, \mathbf{1}_y, \mathbf{1}_z$ – wektory jednostkowe w prostokątnym (kartezjańskim) układzie współrzędnych (wersory)
 \mathbf{J} – wektor gęstości prądu elektrycznego, wartość chwilowa; J_{sk} – wartość skuteczna; J_m – wartość maksymalna [A/m²]; inne symbole jak przy \mathbf{B}
 j – jednostka urojona, $j^2 = -1$
 K – współczynnik
 $k = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$ – stała tłumienia fali elektromagnetycznej w metalu [1/m]
 l – długość; $d\mathbf{l}$ – wektor elementu długości [m]
 L, M – indukcyjność własna i wzajemna odpowiednio [H]
 M, m – współczynniki odbicia zwierciadlanego prądu lub magnesu w metalu
 N – liczba zwojów (lub z w poprzednich wydaniach); współczynnik
 n – prędkość obrotowa [1/s], [obr/s]; $n_s = 60f/2p$ – prędkość synchroniczna [obr/min]; prędkość kątowna [rad/s]
 P – moc czynna [W]; $P_s = P + jQ$ – pozorna [V · A]
 P_1 – moc na jednostkę powierzchni [W/m²]
 p – współczynnik ekranowania; liczba par biegunów
 p_{Fe} – stratność blachy w rdzeniu [W/kg]
 Q – moc bierna [var]
 Q_1 – moc na jednostkę powierzchni [var/m²], długości lub objętości
 Q – ładunek elektryczny [C]
 R – opór czynny, rezystancja [Ω]
 R_m – opór magnetyczny, reluktancja, \underline{R}_m – reluktancja zespolona (impedancja magnetyczna) [1/H]
 \mathbf{r} – promień wektor, r – promień [m]; $\mathbf{1}_r$ – wektor jednostkowy w kierunku promienia
 $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$ – wektor Poyntinga; $S_s = S_p + jS_q$ – moduł wektora Poyntinga zespolonego
 S_p – składowa czynna wektora Poyntinga [W/m²]
 S_q – składowa bierna wektora Poyntinga [var/m²]
 $\mathbf{s}_i = \mathbf{i}_{s_{xi}} + \mathbf{j}s_{yi} + \mathbf{k}s_{zi}$ – wektor w kierunku propagacji fali elektromagnetycznej
 $d\mathbf{s}$ – wektor, element powierzchni
 T – okres [s]
 T – temperatura termodynamiczna [K]
 t – czas (s)
 t – temperatura [°C]

- U – napięcie, wartość skuteczna; U_m – wartość maksymalna [V]; $U = \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$
 u – napięcie, wartość chwilowa
 \mathbf{v} – prędkość liniowa, wektor [m/s]
 W – energia [J]
 w – gęstość objętościowa energii [J/m³]
 X – reaktancja (opór bierny); X_m – reaktancja rozproszenia [Ω]
 $Z = R + jX$ – impedancja zespolona (opór pozorny, zespolony); $Z^* = R - jX$;
 $|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$ [Ω]
 Z_1, Z_2, Z_3 – impedancje falowe środowisk 1, 2, 3
 (powietrze $377 \Omega \gg$ żelazo $2,4 \cdot 10^{-4} \Omega \gg$ Cu $2,7 \cdot 10^{-6} \Omega$)
 $\alpha, \beta, \gamma, \theta$ – kąty [rad]
 α – współczynnik rezystywności [1/K]
 α' – współczynnik oddawania ciepła [W/m²]
 $\alpha = (1+j)k$ – stała propagacji w przestrzeni dla masywnego metalu [1/m]; $\alpha^* = (1-j)k$;
 $|\alpha| = \sqrt{2}k = \sqrt{\omega\mu\sigma}$
 $\Gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = \alpha'' + j\beta''$ – stała propagacji w przestrzeni; α'' – stała tłumienia, β'' – stała fazowa
 $\delta = \frac{1}{k} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$ – równoważna głębokość wnikania pola do półprzestrzeni przewodzącej [m]
 $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ – przenikalność elektryczna bezwzględna (permitywność); ε_r – permitywność względna; $\varepsilon_0 \cong 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m, stała elektryczna (permitywność próżni)
 $\theta = t - t_0$ – przyrost temperatury względem otoczenia [K]
 Λ – przewodność magnetyczna (permeancja) [H]
 $\lambda = 2\pi \delta$ – długość fali elektromagnetycznej [m]
 λ – przewodność cieplna [W/(m · K)]
 $\mu = \mu_r \mu_0$ – przenikalność magnetyczna bezwzględna;
 μ_r – względna; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m – stała magnetyczna (próżni)
 $\nu = 1/\mu$ – reluktywność [m/H]
 $\rho = 1/\sigma$ – rezystywność = opór właściwy [Ω /m]
 ρ – gęstość objętościowa ładunku przestrzennego [C/m³]
 ρ_m – gęstość masy, masa właściwa [kg/m³]
 $\sigma = 1/\rho$ – przewodność elektryczna właściwa (konduktywność) [S/m]
 σ_p – gęstość ładunku powierzchniowego [C/m²]
 $\tau = \frac{\pi D}{2p}$ – podziałka biegunowa maszyny elektrycznej [m]
 $\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ – strumień magnetyczny, wartość chwilowa; Φ_m – maksymalny w czasie [Wb]; Φ_{mr} – strumień rozproszenia
 φ – kąt przesunięcia fazowego [rad]

- χ_m – podatność magnetyczna (susceptabilność); $\mu_r = 1 + \chi_m$ (bezwymiarowa) = miara polaryzacji magnetycznej
- $\Psi = \int \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s}$ – strumień elektryczny [C]
- ψ – kąt przesunięcia fazowego [rad]
- $\Omega = 2\pi n$ – prędkość kątowna mechaniczna [obr/s; rad/s]
- $\omega = 2\pi f$ – pulsacja, prędkość kątowna [rad/s]
- $W = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = AB \cos \alpha = A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z$ – iloczyn skalarny; np. $\text{div } \mathbf{A}$ (lub $\equiv \nabla \cdot \mathbf{A}$)
- $\mathbf{F} = \mathbf{A} \times \mathbf{B} = n AB \sin \alpha = \mathbf{i}(A_y B_z - A_z B_y) + \mathbf{j}(A_z B_x - A_x B_z) + \mathbf{k}(A_x B_y - A_y B_x)$ – iloczyn wektorowy; np. $\text{rot } \mathbf{A}$ (lub $\equiv \nabla \times \mathbf{A}$, ang. $\equiv \text{curl } \mathbf{A}$)
- $\Delta \mathbf{A} \equiv \nabla^2 \mathbf{A} \equiv \text{Lap } \mathbf{A}$ – laplasjan

Skróty nazw metod komputerowych

- MAN (ang. ANM) – metoda analityczno-numeryczna (*analytical-numerical method*)
- MEB (ang. BEM) – metoda elementów brzegowych (*boundary element method*)
- MES (ang. FEM) – metoda elementów skończonych (*finite element method*)
- MRC (ang. MIE) – metoda równań całkowych (*method of integral equations*)
- MRS (ang. FDM) – metoda różnic skończonych (*finite difference method*)
- MSP (ang. MFN) – metoda sieci przepływowych (*method of flow network*)
- MSR (ang. RNM) – metoda sieci reluktancyjnych (*reluctance network method*)

Przedmowa

Nowoczesny przemysł, zwłaszcza jego naukowe zarządzanie, opiera się na zasadach mechatroniki (J. Turowski [1.20]). Zasady te polegają głównie na wdrożeniu prostych narzędzi do szybkiego projektowania i budowy na podstawie głębokich badań podstawowych. Jednym z takich narzędzi jest **system ekspertowy**, który z kolei składa się z **bazy wiedzy** i **oprogramowania**. Baza wiedzy jest tworzona przez **eksperta dziedzinowego** na podstawie doświadczenia zawodowego, naukowego i sprawdzonego dorobku poprzednich pokoleń. Oprogramowanie przygotowuje **inżynier wiedzy**, który dobrze rozumie i potrafi przetworzyć wskazówki eksperta dziedzinowego na konkretny program.

Im więcej wiedzy wprowadzimy do bazy wiedzy, tym szybszy, łatwiejszy i tańszy jest ostateczny program. Różnice są tak wielkie jak ułamek sekundy do miesięcy obliczeń. Ta książka oferuje teoretyczne i praktyczne materiały do tworzenia skutecznych baz wiedzy w zakresie projektowania w elektrotechnice oraz doboru metod dla inżyniera wiedzy.

Ogólnie w inżynierii istnieją dwa główne nurty projektowania:

- a) budowa maszyn i układów oraz
- b) ruch i dynamika układów.

W budowie, jak wspomniano, podstawowym narzędziem jest teoria różnych pól fizycznych: elektrycznych, magnetycznych, elektromagnetycznych, przepływowych, mechanicznych, termicznych, hydraulicznych, pneumatycznych, grawitacyjnych itd. Narzędziami są tu w szczególności równania różniczkowe Maxwella, Faradaya, Naviera–Stokesa, Duhamela i in.

Do projektowania ruchu i dynamiki układów w dużych przedsiębiorstwach są wykorzystywane kosztowne programy SABER [1.20]; jednakże, jak słusznie zauważa A.H. Jasiński [1.4]: Znaczące zainteresowanie wzbudza obecnie... dążenie ku skracaniu czasu wprowadzenia na rynek (*time to market*) przez szybkie projektowanie (*rapid design*).

Istnieje wiele metod komputerowego modelowania i symulacji procesów projektowania. Jednak najbardziej przyjazne dla użytkownika – proste, szybkie i tanie są dwie podstawowe metody:

1) W przypadku **budowy** jest to metoda sieci przepływowych MSP-3D (ang. FNM-3D) spektakularnie potwierdzona przez jej wersję elektromagnetyczną autora MES-3D (ang. RNM-3D), realizowaną w fabrykach transformatorów na całym świecie [1.15], [1.20].

2) W przypadku **ruchu** natomiast jest to prosty i tani program autora „Hamilton” [1.20], oparty na wariacyjnej zasadzie najmniejszego działania Hamiltona, ogólnej teorii elektromechanicznego przetwarzania energii, równaniu Eulera–Lagrange’a oraz funkcji stanu Lagrange’a.

Oba te programy mogą działać w czasie od ułamka do kilku sekund na jeden wariant konstrukcyjny, podczas gdy inne pakiety (np. MES-3D/FEM-3D) wymagają nawet do 3–6 miesięcy na prawie takie same rozwiązania.

Sprostanie coraz to nowym zadaniom szybko rozwijającej się elektrotechniki wymaga od współczesnego inżyniera dobrej znajomości matematyki, teorii elektrotechniki, dziedzin pokrewnych, dobrego rozumienia zjawisk fizycznych oraz umiejętności wykorzystania tej wiedzy w pracy zawodowej. Uczelnie techniczne, a nawet szkoły średnie w wielu krajach dostosowują swoje programy nauczania do tych potrzeb.

Takim przedmiotem, szczególnie interesującym inżynierów o kierunku konstrukcyjno-badawczym, jest *makroskopowa makswelowska teoria pola elektromagnetycznego*. Istnieje jeszcze sporo luk pomiędzy daleko dziś posuniętą teorią elektrotechniki i praktycznym jej zastosowaniem w przemysłowych biurach konstrukcyjnych. Zadaniem elektrodynamiki technicznej, traktowanej jako nowoczesny dział nauki, jest zmniejszenie tego dystansu przez m.in. dobór najmniej pracochłonnych narzędzi komputerowych.

Elektrodynamika jest nauką o ruchu materii, tzn. energii pól, ładunków i środowisk pod wpływem sił działających w polach elektrycznych i magnetycznych. *Elektrodynamika klasyczna* [2.10] jest raczej częścią fizyki opartą na wyidealizowanych przesłankach i nieco abstrakcyjnych założeniach matematycznych. *Elektrodynamiką techniczną* (EDT) nazywamy naukę o zastosowaniach technicznych elektrodynamiki klasycznej, uwzględniającą kompleksowo właściwości fizyczne materiałów, ich nieliniowość, nagrzewanie, złożoną budowę, wpływ sił elektrodynamicznych, ruchu ciał itp., w której często wykorzystuje się metody uproszczone, analogie fizyczne, aproksymacje analityczne, zastępczą linearyzację przebiegów nieliniowych, programy hybrydowe i wzory praktyczne przyspieszające szybkie i łatwe uzyskiwanie wyników. Dużą pomocą jest tu wspomaganie obliczeń metodami i wzorami analitycznymi, tam gdzie tylko to jest możliwe, wzorami półempirycznymi, zastępowanie metod polowych modelowaniem obwodowym itd.

Często stosowane są zresztą dobrze dobrane tzw. *modele zredukowane*, a także uproszczone programy komputerowe służące przyspieszeniu i uproszczeniu modelowania oraz jako praktyczne narzędzia szybkiego projektowania (*rapid design*). Warunkiem koniecznym takiego podejścia praktycznego jest jednak stała weryfikacja doświadczalna założeń i wyników końcowych.