

Mirosław DĄBROWSKI

ZARYS ROZWOJU PROJEKTOWANIA MASZYN ELEKTRYCZNYCH

STRESZCZENIE *Przedstawiono w ujęciu historycznym zarys rozwoju metod projektowania maszyn elektrycznych. Zaproponowano periodyzację trwających ponad 150 lat działań w tej dziedzinie. Zwrócono uwagę na sekwencyjne oraz iteracyjno-rekursywne metody oraz na intuicyjną oraz obiektywną optymalizację w projektowaniu. Wskazano zmiany w podejściu do projektowania wynikłe z zastosowania ogólnej teorii systemów oraz z ogólnej metodologii pracy badawczej. Szczególnie dużo uwagi poświęcono rozwojowi automatyzacji działań projektowych i ich powiązaniu z konstruowaniem, nawiązując przy tym do rozwoju technik informacyjnych i komunikacyjnych. Wskazano kierunki aktualnych i przyszłościowych badań nad doskonaleniem metod projektowania. W opracowaniu uwzględniono wkład polskich pracowników nauki oraz twórczych inżynierów w omawianej dziedzinie.*

Słowa kluczowe: *Maszyny elektryczne. Rozwój metod projektowania. Algorytmizacja i programowanie. Optymalizacja*

Prof. dr hab. inż. Mirosław DĄBROWSKI
e-mail: dabrom@put.poznan.pl

Zakład Maszyn Elektrycznych
Instytut Elektrotechniki

1. WPROWADZENIE

Podstawowymi działaniami w twórczości inżynierskiej jest projektowanie i konstruowanie techniczne. Pojęcie *projektowanie* pochodzi z języka łacińskiego *proicio* lub *projicio* – dosłownie: rzucanie w przód, oraz *proiectum* lub *projectum* – dosłownie: rzut, zarys, projekt. Projektowanie maszyn elektrycznych jest szczególnym działem projektowania technicznego, którego naukowymi podstawami zajmuje się metodologia projektowania. W tej nauce rozpatruje się, na podstawie metodologii ogólnej (prakseologii), zasady oraz metody postępowania w projektowaniu.

We współczesnym ujęciu projektowanie techniczne polega na przygotowaniu zbioru informacji niezbędnych do realizacji urządzenia lub procesu zaspakajającego zadaną potrzebę. Projektowanie jest zatem postępowaniem celowym (wg K. Szaniawskiego – celowościowym [108]) zmierzającym do rozwiązania problemu praktycznego w obszarze techniki. W tym tkwi jego znaczenie, jako podstawowego elementu postępu technicznego, pośredniczącego między nauką a produkcją.

W aktualnym ujęciu projektowanie polega przede wszystkim na opracowywaniu nowych rozwiązań urządzeń lub procesów w jak największym stopniu optymalnych pod założonymi względami i przy zadanych ograniczeniach, przy posługiwaniu się obiektywnymi metodami matematycznymi. Postulat obiektywnej – a nie „intuicyjnej” – optymalizacji powoduje znaczne rozszerzenie oraz zwiększenie złożoności obliczeń projektowych. Jego spełnienie jest jednak możliwe tylko w warunkach istnienia w otoczeniu projektanta obiektywnego i względnie stabilnego systemu wartości, tj. obiektywnych oraz trwałych kryteriów oceny wyników jego pracy.

Obecnie zakres obliczeń projektowych maszyny elektrycznej jest szeroki; obejmuje bowiem zagadnienia elektromagnetyczne, ciepłno-wentylacyjne, wibracyjne, akustyczne, wytrzymałościowe, niezawodnościowe, eksploatacyjne, ekonomiczne. Zakres ten zwiększa się jeszcze bardziej wówczas, gdy zadanie projektowe obejmuje serię (typoszereg) maszyn, a nie tylko jeden typ. W warunkach przemysłowych zwykle projektuje się mniej lub bardziej rozbudowane serie, obejmujące nawet kilka tysięcy typów maszyn elektrycznych

Projektowanie serii maszyn polega na stworzeniu koncepcji skoordynowanego zbioru elementów, z którego można utworzyć szereg maszyn o takiej samej strukturze lub o podobnych strukturach, ale różniących się znamionowymi parametrami użytkowymi – np. mocą, prędkością obrotową, napięciem oraz przystosowaniem konstrukcyjnym do zadanych warunków napędowych, sieciowych i środowiskowych. Tak złożone zadanie może być wykonane tylko

przez zorganizowany zespół, wyposażony w środki umożliwiające uporządkowane gromadzenie oraz szybkie przetwarzanie i wyszukiwanie informacji, tworzący „zbiorowego projektanta”. Proces projektowania można więc rozpatrywać jako działanie *systemu projektującego* realizującego *system projektowany* – tj. zbiór maszyn.

Systemowo zorientowana metodologia projektowania optymalnego zajmuje się zasadami i sposobami realizacji systemów, a jej podstawową przesłankę metodologiczną można wyrazić następująco: problem złożony, który z natury rzeczy nie jest na wstępie w pełni określony, można rozwiązać dzieląc go na logicznie powiązane części – nazywane *etapami projektowania* – oraz na chronologicznie następujące po sobie wyodrębnione ciągi działań – nazywane *fazami projektowania*. Podczas rozwiązywania zagadnień w kolejnych etapach i fazach zwiększa się zasób informacji uściślających problem projektowy, a także narasta ilość informacji końcowych składających się na ostateczny wynik projektowania.

Zanim doszło do przedstawionych na wstępie poglądów na cele, zakres i metody działań projektowych, projektowanie przechodziło kolejne fazy rozwoju, które były związane z osiągnięciami w dziedzinie nowych materiałów – zwłaszcza ferromagnetycznych, elektroizolacyjnych i półprzewodnikowych, z postęmem w technologii i organizacji produkcji maszyn elektrycznych, a w ostatnich dziesięcioleciach – z rozwojem zagadnień metodologicznych nauk praktycznych oraz technik informacyjnych i komunikacyjnych. Stopniowo zwiększało się zrozumienie złożoności twórczej pracy projektanta i powiązań projektowania z wieloma naukami podstawowymi oraz naukami stosowanymi.

Celem tego szkicu jest przedstawienie w ujęciu historycznym zarysu rozwoju metod projektowania maszyn elektrycznych, jako rozwoju twórczej myśli badawczej, ukierunkowanej na wdrożenie innowacyjnej techniki.

2. OKRESY ROZWOJU PROJEKTOWANIA

Projektowanie maszyn elektrycznych zmieniało się w ciągu ponad 150 lat trwającego rozwoju zarówno co do zakresu, stosowanych metod oraz środków, a także co do formy prezentacji i oceny wyników. Dla uporządkowanego przedstawienia przeszłego nadal dokonywanego postępu w metodach projektowania pomocne jest wprowadzenie podziału działań w tej dziedzinie na okresy – tj. przyjęcie periodyzacji historii projektowania.

Za podstawę podziału mogą służyć różne kryteria; w tym opracowaniu zaproponowano jako podstawowe kryterium zakres oraz formę matematycz-

nego ujęcia zagadnienia projektowego i pod tym względem wyróżniono następujące okresy:

1. Preprojektowy – trwający do ok. 1885 r.
2. Ujęć analitycznych bez stosowania technik informacyjnych – trwający do ok. 1950 r.
3. Ujęć analitycznych i numerycznych wspomaganych technikami informacyjnymi.

Na ten główny podział nakładają się bardziej szczegółowe podziały związane ze stosowaniem początkowo optymalizacji intuicyjnej – od ok. roku 1917, a następnie optymalizacji obiektywnej – od ok. 1960 r., oraz od ok. 1970 r. okres wynikający z wprowadzenia do projektowania ujęć systemowych. Metody, a zwłaszcza zakres projektowania, ulegały zmianie także wraz z rozwojem wiedzy o maszynach elektrycznych; przede wszystkim w związku z wynalazkami nowych zasad działania i nowych struktur maszyn oraz wynalazkami nowych materiałów i elementów, np. półprzewodników, magnesów trwałych, materiałów elektroizolacyjnych o dużej odporności na narażenia.

Zastrzeżenia mogą budzić przedziały czasowe tak zaproponowanej periodyzacji rozwoju metod projektowania. Zależą one bowiem od tego, czy odnosi się je do sytuacji globalnej, czy do sytuacji lokalnej w określonym kraju. Zamierzeniem autora tej pracy jest przedstawienie rozwoju na podstawie osiągnięć krajów przodujących pod tym względem. Jednak, zwrócona została uwaga także na wkład polskich pracowników nauki i twórczych inżynierów do omawianej dziedziny.

Postęp w projektowaniu maszyn elektrycznych wynika głównie z potrzeb gospodarki oraz z ilościowego i asortymentowego rozwoju produkcji przemysłu elektrotechnicznego. Pod tym względem przez wiele dziesięcioleci motywacje w Polsce były bardzo silne; do ok. 1985 r. polski przemysł maszyn elektrycznych rozwijał się bowiem bardzo intensywnie.

3. OKRES PREPROJEKTOWY

W 1831 r. Michał Faraday odkrył podstawowe w przyrodzie zjawisko indukcji elektromagnetycznej i sformułował opisujące je prawo fizyczne. To odkrycie stało się podstawą wielkiego skoku innowacyjnego w rozwoju techniki, doprowadziło bowiem m. in. do wynalezienia wielu rodzajów maszyn elektrycznych i do powstania ogromnego przemysłu elektrotechnicznego oraz

elektroenergetyki. W wyniku pracy kilkunastu pokoleń wybitnych pracowników nauki i inżynierów, a także twórczych rzemieślników, doszło do obecnej dojrzałej postaci, wciąż nadal rozwijanej dziedziny elektromechanicznych przetworników energii.

Podstawy tej dziedziny opracowali tak znakomici fizycy, jak np.: William Ritchi i Charles Wheatstone z Londynu, Florise Nollet z Brukseli, Antonio Pacinotti z Pizy, Anyos Jedlik z Budapesztu, František Adam Petřina z Pragi, P. O. C. Vorseleman de Heer z Deventer (Holandia), Heinrich Gustav Magnus z Berlina, Moritz Herman Jacobi z Dorpatu a następnie z Petersburga, Galileo Ferraris z Turynu, Nicola Tesla (rodem ze Słowenii) ze Stanów Zjednoczonych, którzy także jako pierwsi przedstawili propozycje struktur maszyn elektrycznych. Po 1840 roku do twórczej pracy nad maszynami elektrycznymi włączyli się tak wybitni inżynierowie i technicy (niektórzy powiązani z wyższymi szkołami technicznymi) jak m.in.: Zénobe Théophile Gramme, Ginsbert Kapp, Fridrich Hefner-Alteneck, Werner Siemens, Marcel Deprez, Sebastian Ziani de Ferranti, Søren Hjorth, Charles Grafton Page, Michał Dolivo-Dobrowolski [23], Witold Kamil Rechniewski [95], Károly Zipernowsky, Aleksander Rothert [99], którzy zgłosili kilkaset patentów dotyczących maszyn magnetoelektrycznych i elektromagnetycznych [72]. Tylko w Anglii zgłoszono w latach od 1837 do 1866 sto patentów dotyczących różnych struktur maszyn prądu stałego elektromagnetycznych, tj. wzbudzanych elektromagnesami.

Przedstawione okoliczności miały zasadnicze znaczenie dla rozwoju omawianej dziedziny, wynika z nich bowiem, że podstawą rozwoju maszyn elektrycznych była myśl naukowa, a nie twórcze rzemiosło, jak to się stało w wielu innych dziedzinach techniki, np. we włókiennictwie, budownictwie, budowie maszyn rolniczych.

Pierwsze teoretyczne prace wyrażające w formie analitycznej podstawy działania maszyn elektrycznych prądu stałego opublikował M. H. Jacobi¹⁾ [56; 57]. Jednak inni autorzy nie poszli jego śladem i do ok. 1870 r. nie zostały opracowane metody ich obliczania przydatne w projektowaniu. Do tego czasu maszyny wytwarzano jednostkowo w małych warsztatach, wymiarując je według intuicji i doświadczenia. Kierowano się przy tym bardzo ogólnymi przesłankami, np. przyjmując, że masa rdzenia magneśnicy powinna być ok. 30 razy większa niż masa rdzenia twornika oraz, że szczelina powietrzna między stojanem a wirnikiem powinna być tak mała, jak to tylko jest możliwe. Obie te przesłanki były nietrafne. Maszyny te nie miały tabliczek znamionowych, gdyż pojęcie takich wielkości jeszcze nie istniało. Przydatność gotowego egzemplarza do wybranego zastosowania próbowano doświadczać, w miarę potrzeby korygując

¹⁾ W literaturze rosyjskiej jest wzmianka, że w 1850 r. ukazała się w Petersburgu książka Jacobiego na temat teorii maszyn prądu stałego.

niektóre jego właściwości; np. w celu przystosowania do zadanego napięcia zmieniano położenie ruchomego bieguna magnesnicy względem twornika.

Pierwsze zakłady przemysłowo wytwarzające maszyny powstały w latach 1845...1880, a w ślad za nimi zaczątki przemysłowych metod przygotowania produkcji. Były to wytwórnie na terenie Belgii: Compagnie Belge d'Electricité l'Alliance założona ok. 1845 r. oraz Société des Machines Magneto-electriques Gramme powstałe w 1871 r. W roku 1878 została podjęta produkcja w oddziale maszyn elektrycznych, kierowanym przez K. Zipernowsky'ego, w zakładach Ganz'a w Budapeszcie. Po roku 1880 rozpoczęły produkcję zakłady: Compagnie Française Thomson-Houston Electric Company (1882) we Francji, Westinghouse Electric Corporation (1886) w USA, a nieco później Elektrizitäts-Aktiengesellschaft (1893), oraz Siemens-Schuckert Werke (1903) w Niemczech.

Na ziemiach polskich, a następnie w odrodzonej Polsce, następował podobny proces z tylko niewielkim opóźnieniem w stosunku do samodzielnych i przemysłowo zaawansowanych państw.

Pod wpływem konkurencji i wymagań klientów, a także ze względu na budowę coraz większych i bardziej kosztownych maszyn, wytwórnie musiały gwarantować określone właściwości użytkowe wyrobu.

Po 1885 r. następuje szybki rozwój maszyn prądu przemiennego i rozpoczęły się dyskusje nad normalizacją parametrów energii elektrycznej, tj. nad wartościami napięcia znamionowego oraz częstotliwości znamionowej (na kontynencie europejskim przewidywano częstotliwości 40, 50 oraz 70 Hz, w Anglii 80 i 100 Hz, a w USA – 120 do 140 Hz) [23; 65]. Powstają także zamysły powiązania i analitycznego wyrażenia związków parametrów użytkowych maszyn elektrycznych z ich wymiarami oraz ze stopniem wyzyskania materiałów konstrukcyjnych – przede wszystkim uzwojeń oraz ferromagnetycznych elementów obwodu magnetycznego.

4. OKRES ANALITYCZNYCH UJĘĆ PROJEKTOWANIA

4.1. Wstępny okres rozwoju

W połowie lat osiemdziesiątych dziewiętnastego wieku powstają warunki opracowania pierwszych, jeszcze bardzo uproszczonych, metod obliczania projektowego maszyn elektrycznych. W roku 1885 bracia John i Edward Hopkinson podają praktyczną metodę obliczania obwodów magnetycznych¹⁾.

¹⁾ Phil. Transactions, London, Vol. 176, 1885, p. 455.

Znane wówczas prawo przepływu wynikające z równania Maxwella, wyrażone w formie całkowej, przedstawiają oni w postaci:

$$\sum V_i = \Theta \quad (1)$$

przy czym:

- V_i – napięcie magnetyczne w i -tym odcinku obwodu magnetycznego;
- Θ – przepływ objęty zamkniętą linią obwodu magnetycznego.

Hopkinsonowie stosowali inne oznaczenia i nazwy wielkości; pojęcia: napięcie magnetyczne oraz przepływ zostały bowiem wprowadzone ok. dziesięć lat później [100].

Na początku lat dziewięćdziesiątych Edward Arnold rozpoczął cykl prac o uzwojeniach twornika maszyn prądu stałego, które zostały uogólnione w jego monografii przez podanie m.in. warunków ich symetrii oraz wykonalności [1]. W tym czasie zostały opracowane uproszczone metody obliczenia strat histerezowych oraz wywołanych przez prądy wirowe w elementach rdzeni ferromagnetycznych, a także strat mocy w zestyku ślizgowym. Na przełomie dziewiętnastego i dwudziestego wieku zostały zapoczątkowane prace także nad trudnym zagadnieniem strat dodatkowych wywołanych przez zjawisko wypierania prądu w masywnych przewodach umieszczonych w żłobkach [31].

We wstępnym okresie rozwoju metod projektowania dążono – posługując się współczesnymi pojęciami – do **sekwencyjnego trybu obliczeniowego**, tj. do jednokrotnego wykonania ciągu obliczeń, rozpoczynającego się od pierwszej do ostatniej operacji według zadanego następstwa. Przy takim założeniu największą trudność sprawiał dobór tzw. wymiarów głównych wirnika: jego średnicy D oraz długości l , w zależności od zadanego elektromagnetycznego momentu obrotowego albo od postulowanej mocy i prędkości obrotowej projektowanej maszyny.

Już ok. 1885 r. starano się znaleźć jednakowy dla wszystkich maszyn analityczny związek:

$$P = f(D; l; n) \quad (2)$$

w którym:

- P – postulowana moc;
- D – średnica rdzenia wirnika;
- l – długość rdzenia wirnika;
- n – prędkość obrotowa.

Pierwszymi, którzy zaproponowali zależność w postaci:

$$P = c D^2 l n \quad (3)$$

w której c – wielkość stała, byli Anglicy T. Snell¹⁾ oraz W. B. Esson²⁾. Jednak sprawdzające obliczenia, wykonane na podstawie wymiarów istniejących maszyn wykazały, że wielkość c nie jest uniwersalną stałą dla wszystkich maszyn. Poszukiwano zatem innych zależności, w których wielkość c – nazywana „stałą maszynową” – byłaby bardziej „stała”. Te starania były podobne do poszukiwań „kamienia filozoficznego” przez średniowiecznych alchemików. Tak, jak alchemikom nie udało się znaleźć substancji zamieniającej każdy metal w złoto, tak również nie znaleziono formuły dla rzeczywiście stałej maszynowej. Poszukiwania te doprowadziły jednak do wyjaśnienia wielu istotnych w projektowaniu zależności między wymiarami głównymi maszyny a jej parametrami znamionowymi, rodzajem budowy oraz sposobem chłodzenia, stopniem wyzyskania materiałów, dopuszczalnymi przyrostami temperatury elementów czynnych, sprawnością i innymi właściwościami technicznymi i ekonomicznymi.

Wielu teoretyków oraz projektantów uznało, że posługiwanie się „stałą maszynową”, rozumianą jednak nie jako liczba, ale jako funkcja – np. mocy znamionowej i liczby biegunów, jest przydatna w sekwencyjnym projektowaniu. Takie ujęcie zaproponował m.in. E. Arnold wprowadzając stałą wg zależności:

$$c_A = \frac{D^2 l n}{P} \quad (4)$$

Stała c_A ma wartość w przybliżeniu stałą dla zbioru geometrycznie podobnych maszyn tego samego rodzaju, o takiej samej indukcji maksymalnej w szczelinie oraz o takim samym prądowym obciążeniu liniowym powierzchni twornika [1; 2]. Jej wartość daje pogląd na objętość materiałów czynnych maszyny przypadających na jednostkę elektromagnetycznego momentu obrotowego.

Inną formułę zaproponował Vidmar:

$$c_V = \frac{D^3 l n}{P} \quad (5)$$

¹⁾ Electrician, London, Vol. 25, 1890, p. 469.

²⁾ Electrician, London, Vol. 26, 1891, p. 702.

Stała Vidmara c_V ma wartość w przybliżeniu stałą dla geometrycznie podobnych maszyn tego samego rodzaju, o takiej samej indukcji maksymalnej w szczelinie oraz o takich samych gęstościach prądu w odpowiednich uzwojeniach.

Najlepiej fizykalnie uzasadniona jest stała maszynowa zaproponowana przez F. Emdego, wyrażona zależnością [28]:

$$c_{Em} = \frac{P}{\pi^2 D^2 l n} \quad (6)$$

Stała Emdego jest bowiem równa średniej sile stycznej (obwodowej) na jednostkę powierzchni twornika; jest zatem proporcjonalna do elektromagnetycznego momentu obrotowego maszyny.

Poszukiwanie uniwersalnej, jak najbardziej „stałej maszynowej” rozciągnęło się na kilkadziesiąt lat. Jedną z ostatnich propozycji podał I. M. Postnikov [89]; zależność zaproponowaną przez tego badacza można przedstawić w postaci:

$$c_{Po} = \sqrt[4]{\frac{D^2 l n}{P}} \sqrt[4]{\frac{\pi^2 h_{z1}}{\sqrt{2}}} \quad (7)$$

w której

h_{z1} – głębokość żłobka twornika.

Czynnik drugi we wzorze (7) – uwzględniając, że głębokość żłobka zawiera się w przedziale od 2 do 20 cm – zmienia się co najwyżej w zakresie 1,93÷3,43, a więc zmienia się mniej niż dwukrotnie. Większa „stałość” parametru c_{Po} , w porównaniu np. ze stałą maszynową Arnolda wg zależności (4), wynika przede wszystkim z posłużenia się w zależności (7) pierwiastkiem aż czwartego stopnia. Łatwo można zauważyć, że jeżeli wielkość X zmienia się np. z zakresie 10÷100, to $\sqrt[4]{X}$ – tylko w zakresie 1,8÷5,6, a zatem jest bardziej „stała”. W taki formalny sposób uzyskane zawężenie przedziału zmienności stałej maszynowej nie ułatwia jednak trafnego doboru wymiarów głównych maszyny. Dodatnią cechą stałej Postnikowa jest uzależnienie jej od trzech wymiarów, tj. średnicy D proporcjonalnej do obwodu wirnika, długości l oraz od, prostopadłego do dwóch poprzednich wielkości, wymiaru żłobka stojana w kierunku promieniowym h_{z1} . Ta stała uwzględnia zatem „trójwymiarowy” aspekt przetwarzania energii w maszynie.

Inne propozycje wyrażen na stałą maszynową można znaleźć w pracy [19].

Z zależności (4)÷(7), dla zadanej wartości stałej maszynowej, mocy oraz prędkości obrotowej, wynika wartość iloczynu D^2l . Do obliczenia wymiarów głównych D oraz l potrzebny jest jeszcze jeden związek między tymi wielkościami. W tym celu projektanci posługiwali się t. zw. współczynnikiem smukłości maszyny:

$$\lambda = \frac{l}{\tau} = \frac{2pl}{\pi D} \quad (8)$$

przy czym:

τ – podziałka biegunowa maszyny.

Parametr λ obierano na podstawie doświadczenia dążąc do zmniejszenia sumy masy uzwojeń stojana i wirnika.

Należy zauważyć, że aż do ok. 1970 r. utrzymywała się różnica poglądów między projektantami w Stanach Zjednoczonych a projektantami w Europie co do korzystnych wartości tego współczynnika. Maszyny wytwarzane w Stanach miały z reguły krótkie pakiety rdzeni o dużej średnicy – w przeciwieństwie do wykonywanych w Europie o długich pakietach i małej średnicy.

Dla ułatwienia obliczeń wymiarów głównych kilku autorów proponowało zależności do bezpośredniego obliczania średnicy wirnika. Na przykład R. Richter podał w tym celu prosty wzór [97; 98]:

$$D = a + b \sqrt[3]{\frac{Pp}{n\lambda}} \quad (9)$$

Zalecił on również wartości parametrów a oraz b we wzorze (9), dobrane w zależności od rodzaju i stopnia ochrony maszyny.

Bardzo złożona formuła do obliczania średnicy twornika jest przedstawiona w pracy [70].

W latach 1880...1900 zostało opracowanych wiele procedur projektowych maszyn prądu stałego oraz prądu przemiennego, obejmujących obliczenia obwodu magnetycznego, uzwojeń, parametrów i charakterystyk użytkowych, w tym także sprawności. Do projektowania maszyn indukcyjnych zaproponowali A. Heyland oraz G. Ossanna metody graficzne [54; 82], które szybko się upowszechniły i były stosowane jako narzędzie pomocnicze przez ponad 70 lat. Zastosowanie metod graficznych bardzo się rozszerzyło w latach 20-tych, zwłaszcza przy doborze kształtu nabiegunników i obliczeniach reaktancji uzwojeń maszyn synchronicznych o biegunach jawnych [124].

Duże trudności napotkali projektanci maszyn prądu stałego w związku z niezrozumiałymi dużymi spadkami napięć w maszynie – większymi niż wynikające z iloczynu rezystancji i prądu twornika. Dopiero prace teoretyczne, wyjaśniające zjawisko poprzecznego oraz podłużnego oddziaływania twornika, pozwoliły na zwiększenie dokładności obliczeń. W pracach tych podstawowy wkład wniósł A. Rothert, przyszły profesor Lwowskiego Instytutu Politechnicznego [101]. Prace Rotherta są znane m. in. w Niemczech i we Francji, gdzie jednak jego pochodzenie nie jest kojarzone z Polską. Niestety, w Polsce nie ma wzmianki o nim we współczesnej literaturze, mimo tego, że został wyróżniony doktoratem honorowym Politechniki Warszawskiej w 1925 roku za prace w dziedzinie maszyn elektrycznych oraz tego, że jest autorem pierwszej w języku polskim książki o tych maszynach wydanej we Lwowie w 1910 r. [101]. Podobnie nie wspomina się o zasługach W. K. Rechniewskiego dla rozwoju maszyn prądu stałego, działającego we Francji pod koniec XIX w [95].

O zaawansowaniu procedur projektowych na przełomie XIX i XX wieku świadczą śmiało realizacje wielkich maszyn elektrycznych oraz poziom ówczesnie publikowanych prac. Przykładowo można wymienić zaprojektowany i skonstruowany przez profesora G. Forbesa, a wyprodukowany w 1894 r. przez firmę Westinghouse Electric and Construction Company w Pittsburgu (USA), największy do tej pory hydrogenerator synchroniczny o biegunach kłowych. Maszyna przeznaczona do elektrowni wodnej Niagara Falls miała moc 3750 kW, prędkość obrotową 250 obr/min i napięcie 2500 V. Przykłady wyprodukowanych w Europie maszyn dużej mocy podają m.in.: J. Fischer-Hinnen [34; 35], który przytacza także zestawy wzorów obliczeniowych stosowanych ówczesnie w ich projektowaniu, oraz F. Niethammer w książce z roku 1903, zatytułowanej „Nowoczesne poglądy na projektowanie maszyn elektrycznych i aparatów” [81]. Zwracam uwagę na tę pracę, gdyż istotnie wiele wyrażonych w niej poglądów i zaleceń dla projektanta do dziś zachowało aktualność.

W latach do 1914 r., tj. do wybuchu pierwszej wojny światowej bardzo szybko i wszechstronnie rozwija się teoria maszyn elektrycznych oraz rozszerza się zakres obliczeń projektowych. W tym czasie została m. in. opracowana teoria komutacji, analiza drgań i kołysań maszyn, podstawy pracy równoległej prądnic, podstawy obliczeń cieplnych i wentylacyjnych – pierwsza w literaturze książka o zjawiskach cieplnych w maszynach elektrycznych ukazała się w Niemczech już w 1911 r. [8], analiza naprężeń i odkształceń mechanicznych.

Istotny wkład do zwiększenia dokładności obliczeń projektowych maszyn prądu stałego wniósł K. Idaszewski – przyszły profesor Politechniki Lwowskiej oraz Wrocławskiej, który po doktoracie w Wyższej Szkole Technicznej w Brunzwicku (pierwszy doktorat Polaka w Niemczech) pracował w latach 1904...1919 w biurze konstrukcyjnym fabryki Dynamowerke Siemens-Schuckert

w Berlinie. Dopiero wiele lat później przedstawi on doświadczenia z tej pracy w wydanej we Wrocławiu książce [55]

W tym okresie zostały wynalezione nowe rodzaje maszyn komutatorowych prądu przemiennego szeregowo oraz bocznikowe o regulowanej prędkości obrotowej, co znacznie rozszerzyło zagadnienia projektowe. Twórcami tych maszyn byli m.in.: M. N. Déri (1897), L. Dreyfus (1910), J. Jonas (1910), M. Latour, R. Rüdenberg (1910), H. K. Schrage (1914), E. Thomson.

Jeżeli chodzi o metodologię projektowania, to ugruntowuje się przekonanie, że sekwencyjny tryb obliczeniowy jest niedostatecznie dokładny i nie może doprowadzić do wyników potwierdzanych doświadczalnie na wykonanych maszynach. Powstają pierwsze algorytmy projektowe uwzględniające procedury iteracyjne. Ze względu na znacznie zwiększający się przy tym zakres obliczeń, wykonywanych ręcznie lub za pomocą suwaka logarytmicznego, ogranicza się powtarzanie obliczeń do niezbędnego minimum.

Jednocześnie w literaturze można znaleźć pierwsze próby posługiwania się w projektowaniu kryteriami podobieństwa oraz analizą wymiarową przy obliczaniu nowej maszyny na podstawie danych o maszynie już doświadczalnie sprawdzonej [1; 101].

4.2. Optymalizacja subiektywna

Kryzys materiałowy, który nastąpił w latach 1914...1918 i rozciągnął się na szereg lat po pierwszej wojnie światowej, wymusił oszczędne stosowanie surowców we wszystkich – po za przemysłem zbrojeniowym – dziedzinach gospodarki. Szczególnie duże trudności wystąpiły w dostępie do miedzi, co niekorzystnie wpłynęło na przemysł elektrotechniczny i na koszt jego wyrobów. Trudności surowcowe skłoniły twórczo pracujących elektryków do badań nad projektowaniem urządzeń, w tym maszyn elektrycznych, o racjonalnie wykorzystanych materiałach.

Jednym z pierwszych, który podjął prace w tym kierunku był M. Vidmar, przyszły profesor uniwersytetu w Lublanie [122]. Praca Vidmara dotyczy głównie transformatorów, zawiera jednak wskazówki dotyczące proporcji wymiarów oraz rozdziału strat mocy w rdzeniu oraz w uzwojeniach maszyny elektrycznej – jego zdaniem – ekstremalnie oszczędnej. Były to więc wytyczne do projektowania maszyny jak najlepszej pod określonym względem; i nie jest najważniejsze, czy były one w owym czasie istotnie przydatne oraz czy zachowały aktualność. Wartość pracy Vidmara polega przede wszystkim na rozszerzeniu wiedzy o tym, że projektowanie maszyny materiałooszczędnej wiąże się ze zwiększonymi narażeniami jej elementów, tj. ze zmniejszeniem jej trwałości oraz ze zwiększeniem strat energii podczas eksploatacji, a więc ze

zwiększeniem kosztu jej użytkowania. Wykazał on zatem, że racjonalne projektowanie jest bardzo złożonym i rozległym problemem techniczno-ekonomicznym.

Idee Vidmara, zmierzające do obiektywnej optymalizacji maszyn, znacznie wyprzedzały zarówno ówczesny stan teorii występujących w nich zjawisk, jak i możliwości techniki obliczeniowej, nie upowszechniły się więc w praktyce projektowania. Przez niemal czterdzieści lat nurtowały one jednak badaczy i projektantów, skłaniając ich do popartej doświadczeniem subiektywnej optymalizacji opracowywanych nowych maszyn. Taki stan utrzymywał się do ok. 1955 r.

4.3. Normalizacja w projektowaniu

Na początku lat dwudziestych ubiegłego wieku pojawiła się w obszarze maszyn elektrycznych normalizacja, mająca ogromny wpływ na metodologię pracy projektanta. Wprawdzie normalizacja w technice zrodziła się w Anglii już w 1841 r., w którym został opracowany British Standard Whitworth, dotyczący połączeń gwintowych. Jednak dla projektowania maszyn elektrycznych pierwszym istotnym ustaleniem normalizacyjnym było wprowadzenie do techniki ciągów liczb normalnych. Ciągi te zaproponował w roku 1879 Charles Renard, francuski inżynier lotnictwa wojskowego, jednak jego pomysł wówczas nie rozpowszechnił się.

Liczby normalne mają ogólną postać:

$$X = 10^n \sqrt[m]{10^l} \quad (10)$$

w której:

- m – zero albo dowolna liczba całkowita;
- n – wskaźnik ciągu liczb normalnych równy 5, 8, 10, 20, 40, lub 80, nazywany wskaźnikiem Renarda;
- l – liczba naturalna, co najwyżej równa wskaźnikowi n .

Liczby te do normalizacji wprowadzili Niemcy, ustanawiając w 1921 r. normę DIN 323. Pierwsza Polska norma w tym zakresie o oznaczeniu PN/o 121 ukazała się w roku 1934. Ze zbioru liczb normalnych należało dobierać nie tylko większość wymiarów elementów maszyny, ale także ich moce znamionowe i inne parametry.

Już w roku 1923 w Niemczech ukazały się bardzo szczegółowe przepisy VDE 2650 oraz VDE 2651 dotyczące silników indukcyjnych o wirniku klatkowym oraz o wirniku pierścieniowym. W normach tych podano ciągi mocy znamionowych, a także sprawność i współczynnik mocy silników o liczbach biegunów od 2 do 12. W przepisach tych podano także – co było dużym ograniczeniem dla projektantów – prąd oraz moment rozruchowy początkowy (silników klatkowych), moment obrotowy maksymalny, a także wartość minimalnej szczeliny powietrznej między stojanem a wirnikiem w zależności od mocy i prędkości obrotowej. Była to najdalej idąca w owym czasie normalizacja, ingerująca w pracę projektanta. Przepisy te zostały zaktualizowane w 1945 r., bez zmniejszania ich zakresu.

Wraz z rozszerzaniem zadań działalności normalizacyjnej – obejmującej funkcje: porządkowania, jednoznaczności, zamienności elementów oraz całych maszyn, różnicowania i stopniowania parametrów użytkowych, metod oceny jakości – normami objęto m.in. wymiary pola powierzchni przekroju drutów nawojowych, pierścieni ślizgowych, komutatorów, łożysk, wymiary i właściwości blach ferromagnetycznych, rodzaje pracy maszyn, ich rodzaje budowy i stopnie ochrony przed zagrożeniami środowiskowymi, formy konstrukcyjne i sposoby mocowania, przystosowania do stref klimatycznych, rodzaje i sposoby chłodzenia, poziomy dźwięku i poziomy drgań, a także powiązania między parametrami znamionowymi i wymiarami montażowymi. Wszystkie te uregulowania muszą być brane pod uwagę podczas projektowania.

4.4. Iteracyjny tryb obliczeniowy

Konieczność zapewnienia gwarantowanych parametrów użytkowych maszyn zmusiła konstruktorów do zwiększenia dokładności metod projektowania. Opracowano wówczas **iteracyjny tryb obliczeniowy**. Szczególnie wyraźnie zaznaczało się to w obliczeniach wymiarów obwodu magnetycznego, występujących w nim napięć magnetycznych oraz wymaganego przepływu wzbudzającego przy zadanym napięciu znamionowym. W ciągu obliczeniowym pojawiły się w trybie iteracyjnym pętle, w których postępowanie odbywało się wg algorytmu: **zakładaj – sprawdzaj – koryguj**. Na przykład, żeby zapewnić wymaganą sprawność maszyny, należało na wstępie obliczeń założyć jej wartość, obliczyć prąd, dobrać wymiary uzwojeń i obwodu magnetycznego, obliczyć parametry wyzyskania materiałów oraz straty mocy; na końcu tej iteracji należało obliczyć sprawność i porównać jej wartość z założoną. Po skorygowaniu wymiarów i innych parametrów maszyny następowała kolejna iteracja

obliczeń przy zmienionej sprawności, aż do osiągnięcia wymaganej zgodności wartości założonej z otrzymaną jako wynik końcowy. Podobnie postępowano przy obliczaniu parametrów rozruchowych, przeciążalności, współczynnika mocy i innych wielkości gwarantowanych.

Po zastosowaniu trybu iteracyjnego włączono do projektowania sprawdzające rozszerzone obliczenia ciepłno-wentylacyjne, akustyczne, wibracyjne i wytrzymałościowe.

W połowie lat dwudziestych ubiegłego wieku opracowano wiele szczegółowych metod obliczania zjawisk cieplnych i wentylacyjnych maszyn, stwarzając podstawy do algorytmizacji obliczeń przyrostów temperatury nie przekraczających wartości dopuszczalnych przez normy. Monograficzne opracowanie tej problematyki nastąpiło dopiero trzydzieści lat później [49]. Szczególnie duży wkład wniosły do tej problematyki prace J. Haka [52]. W Polsce monografię na temat zagadnień cieplnych w maszynach elektrycznych opracował W. Pełczewski [87]. W późniejszym okresie ukazała się m.in. monografia I. F. Filippova [32]

Od około roku 1930 pojawiają się obszerne prace badawcze nad zjawiskami akustycznymi w maszynach; do wyróżniających się publikacji z tej problematyki należy opracowanie H. Fritza z 1933 r. [37]. Pierwsza monografia na ten temat pojawiła się dopiero w roku 1950 [62].

W związku z budową bardzo dużych maszyn synchronicznych oraz prądu stałego – turbogeneratorów i hydrogeneratorów oraz silników do napędów walcowniczych i wyciągowych, włączone zostały do projektowania systematyczne obliczenia wytrzymałościowe, odkształceń sprężystych oraz wibracji niskiej częstotliwości maszyn i ich części. Pierwsza książka dotycząca tych zagadnień ukazała się we Francji [88]. Wnikliwe opracowanie tej problematyki jako pierwszy podał B. N. Krasovskij [71].

Stan wiedzy o projektowaniu maszyn elektrycznych w połowie lat trzydziestych jest przedstawiony w książkach: M. Liwschitza, w której autor zamieścił spis literatury obejmujący aż 605 pozycji oraz M. G. Saya, dotyczącej tylko maszyn prądu przemiennego [75; 105]. W kilka lat później ukazała się pierwsza polska książka o projektowaniu silników indukcyjnych [66].

W latach trzydziestych ukazały się także prace o dokładnych metodach obliczania parametrów maszyn elektrycznych – zwłaszcza reaktancji, rezystancji i stałych czasowych; należy do nich m.in. publikacja [63].

4.5. Projektowanie serii maszyn

Niektóre wytwórnie oferowały już w 1880 r. zbiory typów produkowanych maszyn prądu stałego, a ok. roku 1900 – maszyn prądu przemiennego. Katalogi ze zbiorami typów o uporządkowanych regularnie narastających mocach znamionowych ukazują się dopiero ok. 1905 r. Nie są to jednak **serie** maszyn w dzisiejszym znaczeniu, tj. uporządkowane i skoordynowane konstrukcyjnie zbiory typów maszyn różniących się mocą znamionową, prędkością obrotową i innymi cechami użytkowymi. Każdy typ maszyny był bowiem projektowany oddzielnie, praktycznie bez wzajemnych powiązań konstrukcyjnych z innymi typami.

Projektowanie serii silników indukcyjnych rozpoczęło się ok. pięć lat później, jednak tylko na podstawie wstępnie rozpoznanych potrzeb, bez analizy trafności przyjętych ciągów wartości parametrów znamionowych. Dopiero pod wpływem trudności gospodarczych, po zakończeniu I wojny światowej, wzmożły się tendencje do zmniejszania kosztów produkcji i do ograniczenia zróżnicowania wytwarzanych elementów maszyn. Producenci maszyn wymagali od projektantów rozwiązania zagadnienia: jak przy małym zróżnicowaniu elementów uzyskać duże zróżnicowanie typów maszyn. Na przykład dużą liczbę mocy znamionowych przy małej liczbie wzniosów osi wału i średnic rdzenia otrzymano zwiększając liczbę jego długości przy każdej średnicy.

Bardziej złożone było uzyskanie maszyn o wielu różnych parach biegunów i małym zróżnicowaniu elementów konstrukcyjnych. Przy racjonalnym doborze struktury serii maszyn o zadanym zbiorze znamionowych mocy i prędkości obrotowej kierowano się przez ok. dwadzieścia lat głównie doświadczeniem i subiektywnymi poglądami projektantów, wspierających się kryteriami podobieństwa zjawisk w ciągach geometrycznie podobnych struktur. Jak już podano w p. 4.2., do omawianego zagadnienia włączyła się normalizacja parametrów maszyn. Jednocześnie narastała świadomość projektantów o nadzwyczajnej rozległości i złożoności zagadnienia doboru racjonalnej (a obecnie optymalnej) struktury serii maszyn przy respektowaniu interesów całej gospodarki, a nie tylko przemysłu elektrotechnicznego. Mimo znakomitej, pierwszej w literaturze światowej, monografii tego zagadnienia, opracowanej przez V. B. Trapeznikowa [117] i późniejszych prac dotyczących maszyn prądu stałego [53] oraz wszystkich typów maszyn [50] (wraz z próbami wzajemnej koordynacji serii maszyn indukcyjnych oraz synchronicznych), nie udało się go rozwiązać do dziś w sposób obiektywny.

Podstawowymi parametrami struktury serii są:

- stosunek mocy skrajnych typów maszyn; obecnie przyjmuje się zwykle równy ok. 15, w przeszłości projektowano serie, w których ten stosunek wynosił nawet ponad 50;
- stosunek narastania mocy znamionowych maszyn, wyrażony stosunkiem mocy dwóch sąsiednich typów, tzn. parametr

$$k_p = \frac{P_{n+1}}{P_n} \quad (11)$$

- stosunek wybranego podstawowego wymiaru charakteryzującego rozmiar maszyn należących do dwóch sąsiednich gabarytów (zwykle jest to wznios osi wału);
- liczba długości rdzeni w jednym gabarycie.

Od stosunku narastania mocy serii zależy m.in. współczynnik przekroczenia mocy zainstalowanych maszyn N_a przykład przy rozkładzie hiperbolicznym gęstości mocy zapotrzebowanej, współczynnik przekroczenie mocy wyraża się wzorem [18]

$$W_p = \frac{k_p \ln k_p}{k_p - 1} \quad (12)$$

Jeżeli np. wartości mocy serii dobrano z ciągu liczb normalnych Renarda R5, to stosunek narastania mocy

$$k_p = \sqrt[5]{10} \approx 1,583 \approx 1,6$$

Współczynnik przekroczenia mocy wg zależności (12) jest wówczas równy 1,253. Nieco mniejsze byłoby przeinwestowanie, wyrażające się współczynnikiem 1,231, przy równomiernym zapotrzebowaniu na maszyny wszystkich mocy z przedziału objętego serią, tj. przy rozkładzie gęstości mocy zapotrzebowanej wyrażającym się liczbą stałą.

Dużą pomocą w projektowaniu serii jest teoria podobieństwa oraz modelowania, za pomocą których można wykorzystać wyniki uzyskane przy obliczaniu jednego typu do obliczania innych typów maszyn. Zwykle w tym celu posługiwano się regułami podobieństwa dla ciągu geometrycznie podobnych

maszyn o różnych mocach i takiej samej prędkości obrotowej. Pomocny jest także szereg maszyn o stałej mocy i różnej prędkości obrotowej, w których zachowane jest podobieństwo w obszarze podziałki biegunowej, zaproponowany w pracy [12].

4.6. Rozszerzanie zagadnień projektowych

Do około 1950 roku w zasadzie nie zmieniły się metody projektowania w omawianej dziedzinie. Dla ułatwienia pracy projektantów niemal powszechnie wprowadzono formularze obliczeniowe z zestawieniami wzorów, wykresami oraz nomogramami. Nadal jednak podstawowym narzędziem obliczeniowym pozostał suwak logarytmiczny. Dla ułatwienia obliczeń zaproponowana została metoda posługiwania się wartościami względnymi lub procentowymi, zamiast bardziej zróżnicowanymi liczbowo wielkościami bezwzględnymi [106]. Nie znalazła ona jednak szerszego zastosowania w opracowaniach algorytmów obliczeń projektowych. Natomiast bardzo rozszerzyły się zagadnienia projektowe w związku z nowymi rodzajami maszyn, zwiększeniem ich mocy, produkcją rozbudowanych serii i nowymi wymaganiami, m.in. co do przystosowania środowiskowego i właściwości użytkowych, a także w związku z nowymi materiałami – zwłaszcza elektroizolacyjnymi, oraz nowymi technologiami produkcji.

Na okres między rokiem 1925 a 1930 przypada szczyt zainteresowania projektowaniem, znanych już wcześniej, silników indukcyjnych o wirniku dwuklatkowym oraz głębokożłobkowym z wypieraniem prądu podczas rozruchu. Pojawia się przy tym nowe zagadnienie w projektowaniu, polegające na jednoczesnym obliczaniu wariantów silników takiej samej mocy i prędkości obrotowej, ale z różnymi wirnikami – odpowiednimi do wymaganych parametrów rozruchowych.

W latach trzydziestych rozpoczął się rozwój elektrycznej trakcji kolejowej, dla której potrzebne były specjalne szeregowo silniki prądu stałego o mocy do 600 kW i napięciu 3000/1500 V. Projektowanie tych maszyn było szczególnie złożone i nastręczało duże trudności. Do ich pokonania stosowano, na niespotykaną wcześniej skalę, wyniki badań modelowych.

Lata trzydzieste to początek zastosowań wodoru do chłodzenia kompensatorów i turbogeneratorów synchronicznych oraz przyspieszony rozwój maszyn synchronicznych bardzo dużej mocy [20].

W latach 1939...1940 zapoczątkowano w Stanach Zjednoczonych prace nad maszynowymi wzmacniaczami elektrycznymi dla układów automatycznej regulacji; należały do nich m.in. amplidyna i rototrol. Nastąpił także ogromny rozwój innych elektrycznych maszynowych elementów automatyki, a przede

wszystkim łączy selsynowych oraz tachometrów. W projektowaniu coraz większe znaczenie zaczęły odgrywać obliczenia parametrów charakteryzujących stany nieustalone, zarówno prądnic synchronicznych, jak i silników oraz innych maszynowych elementów do układów automatycznej regulacji.

W połowie lat pięćdziesiątych pojawiła się potrzeba przystosowania maszyn elektrycznych do pracy w specjalnych warunkach środowiskowych, m.in. w klimacie tropikalnym. Wynikające z tego przystosowania zagadnienia projektowe zawiera praca [103].

Przełomowym osiągnięciem w projektowaniu było w tym czasie zwrócenie uwagi na analizę pola magnetycznego metodami analitycznymi i graficznymi [123]. Szczególnie duże znaczenie dla obliczeń pola magnetycznego w maszynach elektrycznych miało zastosowanie od 1925 r. metody odwzorowań konforemnych [36].

5. OKRES NUMERYCZNYCH UJĘĆ I AUTOMATYZACJI PROJEKTOWANIA

5.1. Rozwój kierunków badawczych nad metodologią projektowania

Projektowanie inżynierskie, którego rozwój przedstawiono na przykładzie maszyn elektrycznych w poprzednich rozdziałach, ujmowano jako działanie z zakresu technicznego przygotowania produkcji (taki pogląd jeszcze nadal dominuje w niektórych środowiskach). W wyniku zorganizowanych i realizowanych podczas drugiej wojny światowej badań dla celów militarnych na nieznaną wcześniej skalę, głównie w Stanach Zjednoczonych, zmieniły się po wojnie poglądy na organizację badań także w innych dziedzinach. Opracowane koncepcje systemowe, zmierzające do znoszenia podziałów między dyscyplinami naukowymi, przyczyniły się do powstania i rozwoju nowego kierunku w nauce, tj. do badań projektowania (design research), w tym zwłaszcza nad metodologią projektowania. Zauważono bowiem, że projektowanie jest obszarem działań, na którym spotyka się wiedza z wielu dziedzin nauki **podzielonej** na dyscypliny, z potrzebami **jednolitej** praktyki.

Badania nad metodologią projektowania stały się podstawą inżynierii systemów (systems engineering), tj. normatywnej teorii projektowania układów złożonych [14; 39; 51; 123]. Inżynieria systemów w dużym stopniu przyczyniła się do unowocześnienia działań w projektowaniu, a także w nauczaniu projek-

towania. Zwrócono przy tym uwagę na uwarunkowania socjologiczne, psychologiczne i społeczne działalności projektotwórczej. Powstała nauka o projektowaniu postuluje, żeby w projektowaniu posługiwać się całym wielodyscyplinowym potencjałem wiedzy i zajmować się nie tylko dziedzinami inżynierskimi – tj. projektowaniem szczegółowym, ale także naukami o zarządzaniu, inżynierią systemów i tymi aspektami nauk behawioralnych, które dotyczą projektantów, placówek projektowych oraz społecznych implikacji ich działalności [40; 91].

Projektowanie jest obecnie rozpatrywane jako koncepcyjne przygotowanie zmiany, zapewniające sprawne działania celowościowe dotyczące nie tylko produkcji, ale także wszystkich dziedzin działalności człowieka [19; 41]. Skutkiem rozwoju metodologii projektowania jest jej wpływ na ocenę kompetencji projektantów oraz na zmiany w systemie kształcenia przygotowującym inżynierów do rozwiązywania nietrywialnych problemów praktycznych.

Pod wpływem teorii systemów oraz dzięki powstaniu i rozwojowi technik informacyjnych i komunikacyjnych w praktyce projektowania zwiększyły się możliwości co do:

- przygotowania kompletnej mapy problemu projektowego [18; 78];
- analizy struktury stosowanych modeli matematycznych i zasad ich opracowywania [15];
- rozszerzenia zakresu systemowego oprogramowania obejmującego rozwiązywanie zagadnień zarówno syntezy jak i analizy oraz symulacji zachowań projektowanej maszyny [13];
- uzyskania rozwiązań spełniających kryteria efektywności i ukierunkowania projektowania na optymalizację [48; 64; 108; 110; 111];
- zastosowania metod numerycznych do rozwiązywania zagadnień polowych w projektowaniu [17].

5.2. Zastosowanie technik informacyjnych i komunikacyjnych w projektowaniu

W latach pięćdziesiątych powstały w Stanach Zjednoczonych, a następnie także w ZSRR pierwsze numeryczne programy obliczeń projektowych maszyn elektrycznych [104]. Jednymi z pierwszych zaprojektowanych za pomocą komputera były silniki indukcyjne typu FA (Fully Accessible) o mocy od 200 do 7000 kW i stopniu ochrony IP 23 oraz IP 44 firmy Westinghouse. Była to pierwsza nowoczesna seria silników o wymiennych elementach (modułach), łatwym montażu i przystosowaniu do różnych stopni ochrony oraz różnych sposobów chłodzenia. Inne firmy amerykańskie (Allis Chalmers, Reliance) oraz europejskie (Siemens, ASEA, BBC, Mather-Platt) przejęły tę koncepcję dopiero

kilkanaście lat później. Duży wkład w rozwój zastosowania w Stanach Zjednoczonych komputerowych metod projektowania maszyn elektrycznych, zwłaszcza małej i średniej mocy, wniósł C. G. Veinott [118 – 121].

Pierwsze doniesienia o zastosowaniu komputerów do obliczania serii maszyn elektrycznych w ZSRR opublikował T. G. Soroker i B. M. Kagan, informując o obliczeniach w roku 1956 serii maszyn prądu stałego oraz maszyn synchronicznych o mocy od 1000 do 10 000 kW, a w roku 1957 – serii silników indukcyjnych [107].

Już w tych pierwszych programach zastosowano uproszczone obliczenia optymalizacyjne, ale bez formułowania funkcji celu i poszukiwania metodami programowania matematycznego jej supremum lub infimum w przestrzeni ograniczonej. Zdolności obliczeniowe i zasoby pamięci stosowanych wówczas maszyn cyfrowych były bowiem jeszcze niewystarczające do stosowania tego rodzaju metod (np. w roku 1960 liczba operacji na sekundę komputerów nie przekraczała ok. 1200).

W tym czasie ciekawą teorię doboru optymalnego kształtu maszyny indukcyjnej, nie wymagającą zastosowania metod programowania matematycznego, przedstawił H. St. Kozłowski [69].

Rozwój sprzętu komputerowego oraz oprogramowania był jednak tak gwałtowny, że większość publikowanych pomysłów przyspieszania obliczeń optymalizacyjnych szybko się dezaktualizowała [3 – 5; 7; 38; 74; 76; 116; 123]. Na przykład odstąpiono od stosowania programów pracujących w trybie konwersacyjnym oraz z rozproszonym dołączaniem danych wejściowych. Oprogramowanie było rozwijane w kierunku włączania grafiki komputerowej do wizualizacji wyników oraz dołączania baz danych z oddzielnym oprogramowaniem do ich obsługi. Wraz z rozwojem systemów operacyjnych szeroko korzysta się w programach z okien dialogowych, hierarchicznych rozwijanych menu z możliwością tworzenia w przyszłości nowych ścieżek w programie.

Wśród pomijanych obecnie pomysłów był również taki, który zalecał oddzielne „optymalizowanie” stojana i oddzielne wirnika maszyny [79; 80].

Współcześnie projektowanie maszyny optymalnej polega na poszukiwaniu zbioru zmiennych $\{y_1^*; y_2^*; \dots; y_n^* \in Y^*\}$, które ekstremalizują zadaną funkcję zmiennych rzeczywistych

$$C = f(y_1; y_2; \dots; y_n) \quad (13a)$$

w przestrzeni n wymiarowej i spełniającą zadane ograniczenia wyrażone zbiorem nierówności

$$g_i(Y) \leq 0, \quad i = 1; 2; \dots; m, \quad (13b)$$

oraz zbiorem równań

$$h_j(Y) = 0, \quad j = 1; 2; \dots; k \quad (13c)$$

Funkcja C nazywa się funkcją celu lub efektywności i w formie analitycznej lub w formie algorytmu wyraża kryterium, wg którego optymalizuje się projektowaną maszynę. Zmienne ze zbioru Y są poszukiwanymi wymiarami maszyny lub wielkościami jednoznacznie zależnymi od wymiarów, a także od wielkości określających właściwości zastosowanych materiałów.

W procesie optymalizacji rozpatruje się je jak zmienne niezależne „naprowadzające” na punkt Y^* , nazywane zmiennymi decyzyjnymi. Nierówności (13b) oraz równania (13c) określają w formie analitycznej lub w formie algorytmów wymagania, jakie musi spełniać maszyna wykonana zgodnie z projektem. Zależności te określają granice wielowymiarowej przestrzeni dopuszczalnej. Niestety, sytuacja projektanta jest taka, że nie zna on kształtu tej przestrzeni ani jej powierzchni granicznych. Badania nad obiektywnymi metodami poszukiwania kształtu przestrzeni dopuszczalnej (nazywanymi także metodami poszukiwania obszarów sprawności) są dopiero we wstępnej fazie rozwoju. To jest powód, dla którego tak wiele uwagi i twórczego wysiłku poświęca się numerycznym metodom poszukiwania maksimum lub minimum funkcji celu w przestrzeni ograniczonej, (odpowiednio jej supremum lub infimum), tj. programowaniu matematycznemu [4; 10; 30; 33; 42; 60; 77; 90; 94; 121].

Efektywne rozwiązanie zagadnienia optymalizacji maszyny elektrycznej utrudnia nieliniowość funkcji celu oraz funkcji ograniczeń. Nieliniowości te utrudniają znajdowanie poszukiwanego ekstremum globalnego i mogą doprowadzić obliczenia do jednego z ekstremów lokalnych. Punkt przestrzeni dopuszczalnej, w którym znajduje się ekstremum globalne teoretycznie leży na jej granicy. Dlatego spośród wielu procedur programowania matematycznego rozpowszechniła się przede wszystkim metoda wewnętrznej funkcji kary. W tej metodzie ekstremalizuje się zmodyfikowaną (rozszerzoną) funkcję celu

$$C_m(Y; r_k) = C(Y) + r_k \sum_{i=1}^m K_i [g_i(Y)] \quad (14a)$$

w której:

- r_k – współczynnik kary;
- K_i – funkcja kary, wg której transformuje się funkcję $g_i(Y)$ i -tego ograniczenia.

Funkcję kary przyjmuje się zwykle w postaci

$$K_i[g_i(Y)] = \frac{1}{g_i(Y)} \quad (14b)$$

Po 1970 r. ukazały liczne książkowe opracowania projektowania maszyn elektrycznych wspomaganego komputerem; należą do nich m.in. prace [6; 24; 96; 116].

Złożoność obliczeń optymalizacyjnych zależy od tego, jak jest zrealizowany splot algorytmu (lub algorytmów) obliczeń syntetyzujących maszynę z procedurą programowania matematycznego oraz jaki obszar obliczeń projektowych jest objęty tą procedurą, a jaka część spełnia rolę tylko obliczeń sprawdzających. Na przykład, od tego czy obliczenia cieplne i wentylacyjne są wraz z obliczeniami elektromagnetycznymi objęte procedurą optymalizacyjną, czy są poza nią. To samo może dotyczyć obliczania parametrów stanów nieustalonych, wskaźników niezawodnościowych maszyny, poziomu głośności oraz drgań.

Współczesne środki technik informacyjnych umożliwiają tworzenie wirtualnych środowisk projektowania (ze względu na zastosowanie nowoczesnych technik komunikacyjnych nazywanymi laboratoriami bez ścian), w których niemal wszystkie obliczenia są objęte procedurami optymalizującymi wraz z możliwością wirtualnej weryfikacji właściwości zaprojektowanej, ale jeszcze nie wykonanej, maszyny lub zbioru maszyn. Budowa i użytkowanie takiego środowiska jest jednak bardzo kosztowna, dlatego ich liczba jest jeszcze mała.

Szczególnie złożone zagadnienia, nie tylko obliczeniowe ale przede wszystkim pojęciowe, występują przy optymalizacji wielokryterialnej, przy której konieczne jest poszukiwanie obszaru kompromisów, ustalenie schematu kompromisów i wybór priorytetów wśród zadanych kryteriów. W metodach inżynierskich stosuje się, upraszczającą zagadnienie, tzw. agregatyzację kryteriów, tworząc jedną złożoną funkcję celu [19; 59].

Złożone jest także zagadnienie osiągnięcia dużej dokładności obliczeń optymalizacyjnych przy możliwie małej liczbie sekwencji obliczeniowych. Zależy to m.in. od przyjętego kryterium zbieżności procesu obliczeniowego [22]. Dla ułatwienia podejmowania decyzji w projektowaniu inżynierskim T. Śliwiński wprowadził pojęcie wielowymiarowego obszaru rozwiązań suboptymalnych. Zaproponował także podział tego obszaru na trójwymiarowe podobszary, umożliwiające numeryczną analizę uzyskanych wyników [115].

Na algorytmizacji i programowaniu obliczeń oraz zastosowaniu grafiki komputerowej nie kończy się udział technik informacyjnych w projektowaniu. Obliczanie jest obecnie powiązane z automatycznym konstruowaniem, opra-

cowaniem i gromadzeniem dokumentacji a także z przygotowaniem i nadzorem procesów technologicznych oraz metod kontroli wyrobów. Zaczątki takiego systemu powstały w niektórych koncernach już 30 lat temu [29].

Współcześnie występuje tendencja do budowania systemów doradczych dla potrzeb projektowania, wyposażonych w zasobne bazy wiedzy, bazy algorytmów oraz bazy danych wynikowych ze zrealizowanych trafnych projektów.

5.3. Algorytmy stochastyczne w projektowaniu

Metody optymalizacyjne można podzielić na dwie główne grupy, tj. na metody deterministyczne oraz stochastyczne. W praktyce inżynierskiej stosowane są niemal wyłącznie metody deterministyczne, natomiast w badaniach naukowych nad rozwojem metod projektowania – metody stochastyczne. Wynika to z wprowadzania numerycznej analizy pola, zwykle za pomocą metody elementów skończonych, do rozwiązywania zagadnień projektowych i występującej wówczas dużej liczby zmiennych decyzyjnych. W metodach deterministycznych liczba zmiennych decyzyjnych z reguły nie przekracza kilkunastu; w metodach zaś stochastycznych może obecnie dochodzić nawet do kilkuset.

W metodach stochastycznych są stosowane nowoczesne metody matematyczne i informacyjne. Należą do nich m.in. arytmetyka i analiza interwałowa, algorytmy wyżarzania, sieci neuronowe, algorytmy genetyczne, logika rozmyta [102]. Rozwój i zastosowanie metod stochastycznych jest uzależnione od rozpowszechnienia komputerów (a także superkomputerów) wektorowych i maszyno-równoległych oraz oprogramowania do obliczeń równoległych.

Literatura dotycząca zastosowania metod stochastycznych w projektowaniu, a zwłaszcza metody algorytmów genetycznych, jest już bogata. Przykładowo można wymienić ciekawe i obiecujące wyniki optymalizacji silników indukcyjnych zawarte w pracy S. Palko [84; 85].

Metody stochastyczne optymalizacji są stosowane także w systemach ekspertowych, w inteligentnych systemach prognozowania oraz w modelowaniu struktur i procesów [11].

6. OSIĄGNIĘCIA W DZIEDZINIE METOD PROJEKTOWANIA MASZYN ELEKTRYCZNYCH W POLSCE

Maszyny elektryczne były przed 1939 r. produkowane w Polsce głównie na podstawie dokumentacji wykonanej za granicą. Jedynie w fabryce „Elek-

trobudowa” w Łodzi, w fabryce w Bielsku-Białej i w kilku drobnych warsztatach wytwarzano maszyny na podstawie własnych projektów. W Łodzi wykonano na przykład unikatowy czterobiegowy silnik indukcyjny o dwóch współśrodkowych wirnikach. Niestety ta maszyna, świadcząca o wysokim poziomie projektantów, została w latach siedemdziesiątych przypadkowo zniszczona.

Największe fabryki w Żychlinie i w Cieszynie należały do przedsiębiorstwa „Zakłady Elektromechaniczne Rohn-Zieliński Spółka Akcyjna, Licencja Brown-Boveri”, a ich biura konstrukcyjne zajmowały się modyfikacjami projektów licencyjnych. Potencjał produkcyjny przemysłu maszyn elektrycznych w latach trzydziestych w Polsce przedstawiono w pracy [58]. Duże zasługi w ukierunkowaniu rozwoju tego przemysłu wniósł Z. Gogolewski, który był rzecznikiem produkowania maszyn na podstawie prac badawczych i projektowych wykonanych w Polsce. Na XI Walnym Zjeździe SEP w 1939 r. wyraził pogląd: „Na czoło zagadnień wysuwa się zatem zadanie opracowania nowych konstrukcyjnych rozwiązań, zadanie stworzenia nowych polskich serii silników i transformatorów, przystosowanych do nowoczesnych wymagań i techniki produkcji. Specjalnie ważne jest to zagadnienie w dziale silników asynchronicznych o mocy do 100 kW i w dziale transformatorów do 1600 kV·A” [45]. Energicznie przystąpił on do działań w tej dziedzinie po roku 1945, opracowując plany rozbudowy przemysłu maszyn elektrycznych [21; 46]. Dzisiaj ponownie stajemy przed zadaniem wytyczenia kierunków rozwoju tego przemysłu i sprostaniu zagranicznej konkurencji. Warto zapoznać się ze śmiałymi i twórczymi koncepcjami z 1948 r., niektóre z nich są ponownie aktualne.

We wrześniu 1946 r. powstał z inicjatywy prof. J. L. Jakubowskiego Państwowy Instytut Elektrotechniczny, przemianowany w 1948 r. na Główny Instytut Elektrotechniki, a w listopadzie 1951 r. na Instytut Elektrotechniki. W Instytucie został już w 1946 r. zorganizowany Zakład Maszyn Elektrycznych, kierowany przez prof. B. Dubickiego, autora monografii z maszyn elektrycznych [25 – 27]. W grudniu 1948 roku zostało powołane pod kierownictwem prof. Gogolewskiego Centralne Biuro Konstrukcyjne Maszyn Elektrycznych z siedzibą w Katowicach – przemianowane następnie w Branżowy Ośrodek Badawczo Rozwojowy Maszyn Elektrycznych „Komet”. Pracownicy tych dwóch ośrodków wnieśli największy wkład w rozwój metod projektowania maszyn elektrycznych. Prace w tej dziedzinie są prowadzone także w kilku uczelniach, przede wszystkim w Politechnice Łódzkiej, Poznańskiej, Śląskiej w Gliwicach, Warszawskiej i Wrocławskiej.

Największe osiągnięcia w opracowaniu kolejno udoskonalanych trzech wersji programów obliczeń projektowych optymalnych silników indukcyjnych ma Zakład Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki, w wyniku prac T. Śliwińskiego i kierowanego przezeń zespołu [44; 109 – 115]. Dzięki temu oprogramowaniu można było opracować i uruchomić produkcję serii nowoczesnych

maszyn, w tym także odmiany silników energooszczędnych i materiałooszczędnych.

W Zakładach DOLMEL we Wrocławiu opracowano m. in. programy do projektowania maszyn prądu stałego [9].

W BOBRME „Komel” zostały opracowane programy komputerowe do projektowania maszyn prądu stałego i przemiennego – w tym maszyn synchronicznych i jednofazowych silników indukcyjnych. Duży wkład w projektowanie kilku typoszeregów maszyn prądu stałego wnieśli: I. Cholewicki, K. Nowak, M. Lubina. W realizacji projektów typoszeregów silników indukcyjnych m.in. brali udział J. Kokotkiewicz, który stosunkowo wcześniej zajął się zagadnieniem optymalizacji [64], oraz S. Kwaśnicki, który opracował obliczenia poziomu hałasów pochodzenia magnetycznego [73].

Do rozwoju projektowania maszyn prądu stałego przyczyniły się prace prof. Z. Gogolewskiego z Politechniki Śląskiej [47] oraz prof. A. Kordeckiego z Politechniki Wrocławskiej, przedstawiając nowe poglądy na proces obliczeń projektowych [67]. Wiele przydatnych w projektowaniu maszyn synchronicznych rozważań i ujęć analitycznych zawierają prace W. Paszka i jego współpracowników z Politechniki Śląskiej, a zwłaszcza monografia dotycząca stanów nieustalonych w maszynach elektrycznych [86].

W Politechnice Warszawskiej oraz w Zakładzie Małych Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki główne dokonania dotyczą projektowania małych maszyn elektrycznych oraz elektrycznych maszynowych elementów automatyki, realizowane pod kierunkiem J. Owczarka, R. Sochockiego i P. Puternickiego [83; 92; 93]. Wyniki tych prac umożliwiły uruchomienie produkcji m.in. nowoczesnych selsynów i jednofazowych silników komutatorowych.

W Politechnice Poznańskiej zostało opracowane obszerne oprogramowanie systemowe do projektowania i symulacji stanów pracy maszyn prądu stałego o regulowanej prędkości obrotowej w szerokim zakresie [16]. Zaawansowane są badania także nad włączeniem metod polowych do syntezy maszyn elektrycznych.

Prace w Politechnice Wrocławskiej koncentrują się głównie wokół projektowania maszyn prądu stałego, maszyn magnetoelektrycznych oraz maszyn z prasowanymi rdzeniami proszkowymi. Zapoczątkowane przez prof. J. Gierasa w Polsce prace nad maszynami magnetoelektrycznymi są przez niego kontynuowane za granicą [43].

Realizowane w Politechnice Łódzkiej badania nad projektowaniem dotyczą głównie transformatorów. W tej uczelni została opracowana pierwsza w Polsce książka dotycząca maszyn synchronicznych [61]. W ostatnich latach problematyka badawcza została w tej uczelni znacznie rozszerzona, obejmując

m.in. zagadnienia drgań maszyn elektrycznych, ich współpracę z przetwornikami półprzewodnikowymi, mikromaszyn specjalnych.

Największy wkład w metodologię projektowania technicznego w Polsce zawierają publikacje W. Gasparskiego [39 – 41], na które już zwrócono uwagę w p. 5.1.

7. PODSUMOWANIE

Maszyny elektryczne, mimo już ponad 150 letniej historii, są nadal twórczo rozwijane. Pogłębiana jest teoria występujących w nich zjawisk elektromagnetycznych, cieplnych, akustycznych i innych. Powstają maszyny o nowych zasadach działania – jak np. ultrasonioczno-rezonansowe, o nowych strukturach – jak np. obrotowo-liniowe, nadprzewodnikowe, zespolone, wielowirnikowe. Powstają urządzenia przystosowane do pracy w ekstremalnych warunkach, jak np. w próżni kosmicznej, w cieczy pod bardzo dużym ciśnieniem, w otoczeniu o intensywnym napromienieniu jonizującym.

W ostatnich latach zwiększył się zakres prac związanych ze współdziałaniem maszyn z układami półprzewodnikowymi, z mikroprocesorami oraz skomputeryzowanymi układami regulacji o dużej dynamice. Rozszerza się zatem zakres ich obliczeń projektowych i rozwijają się metody projektowania. Bardzo duży wpływ na zachodzące w projektowaniu zmiany ma postęp w technikach informacyjnych i komunikacyjnych.

Na te okoliczności, z konieczności w sposób niepełny, zwrócono uwagę w tym opracowaniu. Także wrywkowo zostały przedstawione dokonania w Polsce w tym zakresie. Wiedza o wielkim wysiłku ostatnich pokoleń nad zbudowaniem w Polsce przemysłu maszyn elektrycznych, jednego z najbardziej rentownych i gospodarczo nieodzownych, jest potrzebna. Może pozwoli ona odnieść się z większym szacunkiem do pracy naszych poprzedników – pracowników nauki, twórczych inżynierów, organizatorów produkcji, a także znaleźć sposób na przywrócenie tej dziedzinie należnego jej znaczenia w naszym kraju.

LITERATURA

1. Arnold E.: *Die Gleichstrommaschine Bd. 1*. Verlag von J. Springer, Berlin 1901.
2. Arnold E., la Cour J. L.: *Die Wechselstromtechnik V Band, Die asynchronen Wechselstrommaschinen, Erster Teil: Die Induktionsmaschinen*. Verlag von J. Springer, Berlin 1923.

3. Appelbaum J., Erlicki S.: *A problem of economic optimization of electric equipment design*. IEEE Trans. Communication and Electronics, vol. 83, 1964, s. 773 – 776.
4. Appelbaum J., Fuchs E. F., White J. C.: *Optimization of three-phase induction motors design*. Part I, IEEE Trans. on Energy Conversion, 1987, s. 407 – 414.
5. Avietisjan D. A., Bertinov A. I.: *Mnogoetapnyje processy vybora optimalnych razmierov električeskich mašin*. Električestvo, 1966, nr. 6, s. 69 – 74.
6. Avietisjan D. A.: *Osnovy avtomatizirovannogo projektirovanija elektromechaničeskich preobrazovateliej*. Izd. Vysšaja Škola, Moskva 1988.
7. Bahm E.: *Entwerfen von elektrischen Mschinen mit Digitalrechnern*. Elektrotechnik und Maschinenbau, vol. 60, 1963, nr 19-20, s. 441 – 447.
8. Binder L.: *Die Erwärmung elektrischer Maschinen*. Verlag von W. Knapp, Halle 1911.
9. Bojczewski H., Krowicki A.: *O zastosowaniu EMC do projektowania maszyn elektrycznych prądu stałego*. Przegląd Elektrotechniczny, Rocznik XLVIII, 1972, z. 5, s. 215 – 18.
10. Borodulin Ju. B., Mostejkis V. S., Popov G. V., Šiškin V. P.: *Avtomatizirovannoje projektirovanije električeskich mašin*. Izd. Vysšaja Škola, Moskva 1989.
11. Bubnicki Z.: *Wstęp do systemów ekspertowych*. PWN, Warszawa 1990.
12. Dąbrowski M.: *Prawa podobieństwa dotyczące serii maszyn elektrycznych*. Przegląd Elektrotechniczny, 1963, nr 7, s. 250 – 253.
13. Dąbrowski M., Józefowicz W.: *Komputerowo wspomagane projektowanie maszyn elektrycznych w ujęciu systemowym*. Prace Instytutu Cybernetyki Politechniki Wrocławskiej, nr 39, 1976, s. 51 – 59.
14. Dąbrowski M.: *Ujęcia oraz metody systemowe w rozwiązywaniu problemów poznawczych i decyzyjnych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1978.
15. Dąbrowski M.: *Klasyfikacja modeli stosowanych w projektowaniu maszyn elektrycznych*. Przegląd Elektrotechniczny, 1986, s. 108 – 111.
16. Dąbrowski M.: *Komputerowo wspomagany proces projektowania maszyn prądu stałego*. Zeszyty Problemowe. Maszyny Elektryczne KOMEL, Katowice, 1978, nr 28, s. 1 – 5.
17. Dąbrowski M.: *Zastosowanie modelowania cyfrowego w projektowaniu elektromechanicznych przetworników energii. Stan obecny i kierunki rozwoju*. Prace Instytutu Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej PAN, nr 14, 1983, s. 239 – 248.
18. Dąbrowski M.: *Konstrukcja maszyn elektrycznych*. WNT, Warszawa 1977.
19. Dąbrowski M.: *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Wydanie 1 WNT, Warszawa 1988, Wydanie 2. WNT, Warszawa 1994.
20. Dąbrowski M.: *Przegląd rozwoju maszyn synchronicznych*. Proceed. XXXI International Symposium on Electrical Machines, Politechnika Śląska Gliwice 1995, s. 33 – 54.
21. Dąbrowski M.: *Wkład Zygmunta Gogolewskiego w rozwój maszyn elektrycznych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka, z. 155, 1996, s. 33 – 38.
22. Dąbrowski M.: *Some remarks on application of multicriterial optimization for CAD of electric machines*. Prace Instytutu Elektrotechniki w Warszawie, z. 194, 1997, s. 1 – 7.
23. Dolivo-Dobrowolsky M.: *Aus Geschichte des Drehstromes*. ETZ 1917, s. 341 – 344; 354 – 357; 366 – 369; 376 – 377.
24. Dombrowskij V. V., Hutoreckij G. M.: *Osnovy projektirovanija električeskich mašin pieremiennogo toka*. Energija, Leningrad 1974.
25. Dubicki B.: *Maszyny elektryczne*. Tom 1 Maszyny prądu stałego, PWN, Warszawa 1958.

26. Dubicki B.: *Maszyny elektryczne. Tom 2 Uzwojenia prądu zmiennego*, PWN, Warszawa 1953.
27. Dubicki B.: *Maszyny elektryczne. Tom 3 Silniki indukcyjne*, PWN, Warszawa 1964.
28. Emde F.: *Leistungsparameter, Größenparameter und mittlerer Drehschub bei elektrischen Maschinen*. Elektrotechnische Zeitschrift, 1922, H. 48, s. 1430 – 1435.
29. Facker D., Howein W.: *Programmsystem als Projektierungs- und Dokumentationshilfe für Prozessrechner-Hardware*. Siemens Zeitschrift, vol. 47, 1973, s. 109 – 118.
30. Fiacco A. V., Mc Cormig G. P.: *Nonlinear Programming: Sequential Minimization Method*. John Willey, New York 1969.
31. Field A. B.: *Eddy Currents in Large Slot Wound Conductors*. Trans. AIEE, vol. 24, 1905, s. 701.
32. Filippov I. F.: *Osnovy tieploobmiena v električeskich mašinach*. Energija, Leningrad 1974.
33. Findeisen W., Szymanowski J., Wierzbicki A.: *Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji*. PWN, Warszawa 1980.
34. Fischer-Hinnen J.: *Die Vorausberechnung von Wechselstrommaschinen mit Bezug auf den Spannungsabfall*. Elektrotechnische Zeitschrift 1897, Heft 41, S. 633 – 638.
35. Fischer-Hinnen J.: *Die Wirkungsweise Berechnung und Konstruktion elektrischer Gleichstrom-Maschinen*. Zürich 1897.
36. Frey K.: *Anwendung der Konformen Abbildung auf praktische Probleme des Elektromaschinenbaues*. Arbeiten an der Elektrotechnischen Institut TH Karlsruhe, Bd. 4, Springer Verlag 1925.
37. Fritze H.: *Über die Geräuschbildung bei elektrischen Maschinen*. Archiv für Elektrotechnik, 1933, s. 77 – 98, s. 185 – 195.
38. Frohne H.: *Rationalisierung beim Entwurf elektrischer Maschinen unter Verwendung digitaler Rechenautomaten*. ETZ-A Bd. 84, 1963, H. 2, s. 49 – 57.
39. Gasparski W.: *Pojęcie systemu. Z zagadnień metodologii badań i projektowania systemowego*. (W zbiorze: Projektowanie maszyn i systemów cyfrowych, WNT, Warszawa 1972).
40. Gasparski W.: *Projektowanie jako przedmiot refleksji i badań*. Postępy Cybernetyki, vol. 1, 1978, nr 1, s. 11 – 31.
41. Gasparski W.: *Projektowanie – koncepcyjne przygotowanie zmiany*. PWN, Warszawa 1978.
42. Genzel A., Lutz K.: *Elektronische Datenverarbeitung beim Berechnen elektrischer Maschinen*, Siemens Zeitschrift 1980, H. 12, s. 477 – 480.
43. Gieras J., Wing M.: *Permanent Magnet Motor Technology. Design and Applications*. M. Dekker, Inc., New York, 2002.
44. Głowacki A.: *Obliczenia elektromagnetyczne silników indukcyjnych trójfazowych*. WNT, Warszawa 1993.
45. Gogolewski Z.: *Widoki rozwoju przemysłu elektrotechnicznego na tle osiągnięć ostatnich lat*. Przegląd Elektrotechniczny, 1939, s. 428
46. Gogolewski Z., Morsztyn K.: *Plan rozwoju przemysłu maszyn elektrycznych*. Przegląd Elektrotechniczny, 1948, s. 126 – 129.
47. Gogolewski Z., Gabryś W.: *Maszyny prądu stałego. Obliczenia, konstrukcja, zagadnienia specjalne*. PWT, Warszawa 1960.
48. Goliński J.: *Metody optymalizacyjne w projektowaniu technicznym*. WNT, Warszawa 1974.

49. Gotter G.: *Erwärmung und Kühlung elektrischer Maschinen*. J. Springer Verlag, Berlin 1954.
50. Gurin Ja. S., Kuzniecov B. I.: *Projektirovanije serij električeskich mašin*. Izd. Energija, Moskva 1978.
51. Hall A. D.: *Podstawy techniki systemów*. WNT, Warszawa 1968.
52. Hak J., Ošlejšek O.: *Výpočet chlazení elektrických strojů*. Výzkumný a vývojový ústav eelektrických strojů točivých, Brno 1973.
53. Hanzelin F.: *Tvorba řad a unifikace v projektování stejnosměrných strojů*. Elektrotechnický obzor, Roč. 57, 1966, nr. 3, s. 137 – 141.
54. Heyland A.: *Ein graphisches Verfahren zur Vorausberechnung von Transformatoren und Mehrphasenmotoren*. Elektrotechnische Zeitschrift, 1894, S. 561.
55. Idaszewski K.: *Maszyny prądu stałego*. PWN, Warszawa 1954.
56. Jacobi M. H.: *Über die Prinzipien der elektro-magnetische Maschinen*. Poggendorfsche Annalen, vol. 51, 1840, s. 358 – 372.
57. Jacobi M. H.: *Über magneto-elektrische Maschinen*. Poggendorfsche Annalen, vol. 69, 1846, s. 188 – 207.
58. Januszewski P., Barthel W.: *Polski przemysł elektrotechniczny*. Przewodnik, Wydawnictwo Polskiego Związku Przedsiębiorstw Elektrotechnicznych, Warszawa 1933.
59. Jażdżyński W.: *Projektowanie maszyn elektrycznych i identyfikacja ich modeli z wykorzystaniem optymalizacji wielokryterialnej*. Wydawnictwa AGH, Kraków 1995.
60. Jeleniewski T., Sielicki A.: *Metodologia i komputerowe wspomaganie projektowania technicznego*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1975.
61. Jezierski E.: *Maszyny synchroniczne*. PWT, Warszawa 1951.
62. Jordan H.: *Der geräuscharme Elektromotor*. Girardet, Essen 1950.
63. Kilgore L. A.: *Calculations of Synchronous Machine Constants*. Trans. AIEE, vol. 50, 1931, s. 1201 – 1213.
64. Kokotkiewicz J.: *Optymalizacja w projektowaniu maszyn elektrycznych*. Zeszyty problemowe BOBRME, nr. 25, 1977.
65. Kolben E.: *Zur Frage der Günstigen Periodenzahl für Wechselstromanlagen*. ETZ 1885, s. 77.
66. Kopczyński W.: *Obliczenia silników asynchronicznych*. Wydawnictwo Sp. Akc. „Elektrobudowa”, Łódź 1938.
67. Kordecki A.: *Budowa maszyn elektrycznych. Projektowanie maszyn elektrycznych prądu stałego*. WNT, Warszawa 1973.
68. Kozłowski H. St., Turowski E.: *Silniki indukcyjne. Projektowanie. Konstruowanie. Wytwarzanie*. WNT, Warszawa 1961.
69. Kozłowski H. St.: *Teoria optymalnych kształtów maszyn indukcyjnych*. Archiwum Elektrotechniki, 1955, z. 4, s. 585 – 607.
70. Krasovskij B. N.: *Zavisimost' gabaritov i obščego viesa električeskich mašin postojannogo toka ot geometrii jakorja i čisła poljusov*. Električestvo, 1964, nr 2, s. 58 – 62.
71. Krasovskij B. N.: *Voprosy pročnosti električeskich mašin*, Izd. AN SSSR, Moskva 1951.
72. Królikowski L.: *Rozwój maszyn elektrycznych do końca XIX wieku*. Zakład Narodowy Ossolińskich, Wyd. PAN, Wrocław 1986.
73. Kwaśnicki S.: *Hałas magnetyczny silników indukcyjnych*. Wyd. KOMEL, Katowice 1998.

74. Lehmann S., Hagedorn G.: *Die technische Berechnung von Synchronmaschinen mit Rechenautomaten*. ETZ-A, 1963, s. 855 – 860.
75. Liwshitz M.: *Die elektrischen Maschinen Band III, Berechnung und Bemessung*. Verlag Teubner, Leipzig 1934.
76. Lutz K.: *Arten und Gestaltung der digitalen Berechnungsprogramme elektrischer Maschinen*. ETZ-A, 1966, s. 496 – 502.
77. Mazija Ł. V., Popov P. G., Strelbickij Z. K.: *Struktura bazovoj SARP elektromehaničeskich ustrojstv*. Elektromechanika, 1987, nr 2, s. 43 – 46.
78. Miller D.: *Projektowanie metodyczne*. WNT, Warszawa 1987.
79. Nath M. C., Julka V. S.: *Computer Aided Design of Hydrogenerator*. Optimum Stator Design Part I, Electrical India 1980, 15th May, s. 13 – 20.
80. Nath M. C., Julka V. S.: *Computer Aided Design of Hydrogenerator*. Optimum Rotor Design Part II, Electrical India 1980, 31st May, s. 13 – 19.
81. Niethammer F.: *Moderne Gesichtspunkte für den Entwurf Elektrischer Maschinen und Apparate*. Verlag von R. Oldenburg, München und Berlin 1903.
82. Ossanna G.: *Theorie der Asynchronen Mehrphasenmotoren*. Elektrotechnische Zeitschrift, 1900, S. 712.
83. Owczarek J., Sochocki R., Pochanke A.: *Elektryczne maszynowe elementy automatyki*. WNT, Warszawa 1983.
84. Palko S.: *Structural Optimization of an Induction Motor using a Genetic Algorithm and a Finite Element Method*. Acta Polytechnica Scandinavica, EI 84, Helsinki 1996.
85. Palko S.: *Structural Optimization of Induction Motors using Time Stepping Method, Proceed. of International Conference ICEM'98*. Vigo 1998, s. 14 – 19.
86. Paszek W.: *Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Wyd. Helion, Gliwice 1998.
87. Pełczewski W.: *Zagadnienia cieplne w maszynach elektrycznych*. PWT, Warszawa 1956.
88. Pistoye H.: *Étude mécanique et usinage des machines électriques*. Baillière libr., Paris 1924.
89. Postnikov E. M.: *Projektirovanije električeskich mašin*. Gos. Izd. Techničeskoj Literatury USSR, I izdanie Kijew 1952, 2 izdanie Kijew 1960.
90. Powell M. J. D.: *A Method for Constraints in Minimization Problems, in: Optimization* (Editor Fletcher R.) Academic Press, London 1969.
91. Praca zbiorowa pod red. W. Gasparskiego: *Metodologia projektowania inżynierskiego*. PWN, Warszawa 1973.
92. Puternicki P.: *Metoda obliczania uzwojeń silników prądu stałego małej mocy za pomocą maszyny cyfrowej*. Prace Instytutu Elektrotechniki, tom XVII, 1970, z. 62, s. 77 – 103.
93. Puternicki P.: *Silniki komutatorowe małej mocy – Analiza i optymalna synteza konstrukcji*. Warszawa: Wyd. Książkowe Instytutu Elektrotechniki 2000.
94. Rastrigin Ł. A., Terzjan A. A., Unanian E. M.: *Ekstrapolacjonnyj metod optimizacji v zadačach projektirovanija električeskich mašin*. Izwiestja Akademii Nauk SSSR Energetika i Transport, 1981, nr 6. s. 61 – 69.
95. Rehniewski W. K.: *Étude sur les machines dynamos*. La Lumière Electrique, 1886, vol. XX. s. 391 – 395.
96. Reiche H., Glöckner G.: *Maschinelles Berechnen elektrischer Maschinen*. Verlag Technik, Berlin 1973.

97. Richter R.: *Elektrische Maschinen, Erster Band, Allgemeine Berechnungselemente*. Die Gleichstrommaschinen, Verlag von Julius Springer, Berlin 1924.
98. Richter R.: *Elektrische Maschinen Vierter Band*. Die Induktionsmaschinen, Verlag von Julius Springer, Berlin 1936.
99. Rothert A.: *Beitrag zur Theorie der asynchronen Drehfeldmotoren*. Elektrotechnische Zeitschrift, 1895, Heft 45, S. 705 – 708.
100. Rothert A.: *Ueber Ankerrückwirkung von Dynamomaschinen*. Elektrotechnische Zeitschrift 1896, nr 37; 48, 1897, nr 1.
101. Rothert A.: *Teoria i konstrukcja maszyn elektrycznych*. Lwów 1910.
102. Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L.: *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*. PWN, Warszawa 1997.
103. Rychtera M., Bartakova B.: *Tropikalizacja urządzeń elektrycznych*. WNT, Warszawa 1966.
104. Souders R. M.: *Digital Computers as an Aid in Electric Machine Design*. AIEE Trans. Part I Communication and Electronics, 1954, s. 189 – 192.
105. Say M. G.: *The performance and design of alternating current machines*. Sir Isaac Pitman and Sons, London 1936.
106. Sopuch Z.: *Procentní výpočet indukčního motoru*. Technicko-vědecké vydavatelství, Praha 1952.
107. Soroker T. G., Kagan B. M.: *O primienieniji elektronnykh vychislitelnykh mashin dlja raschetov električeskikh mashin*. Vestnik elektroprmyšlennosti, 1958, nr 9, s. 17 – 25.
108. Szaniawski K.: *Metoda i twórczość w nauce*. W zbiorze prac: *O nauce, rozumowaniu i wartościach*. PWN, Warszawa 1994.
109. Śliwiński T., Wdowiak B.: *Ocena serii maszyn elektrycznych metodą analizy łącznych kosztów amortyzacji i eksploatacji*. Przegląd Elektrotechniczny, 1955, nr 5.
110. Śliwiński T.: *Analysis of optimal designed induction motors*. Proceed. of International Conference ICEM'86, Munchen 1986, s. 121 – 125.
111. Śliwiński T.: *Optymalizacyjne obliczenia projektowe silników indukcyjnych*. Prace Instytutu Elektrotechniki 1980, z. 114, s. 5 – 26.
112. Śliwiński T., Głowacki A.: *Parametry rozruchowe silników indukcyjnych*. PWN, Warszawa 1982.
113. Śliwiński T.: *Optymalna synteza silnika indukcyjnego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej Elektryka, nr 40, 1992, s. 31 – 43.
114. Śliwiński T.: *Output constant in optimal designed induction motors*. Proceed. of International Conference ICEM'82, Budapest 1982, cz. 3, s. 813 – 817.
115. Śliwiński T.: *Suboptimal induction motors*. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej Elektryka, nr 91, 1998, s. 19 – 26.
116. Terzjan A.A.: *Avtomatizirovannoje projektirovanije električeskikh mashin*. Energoatomizdat, Moskva 1983.
117. Trapeznikov V.: *Osnovy projektirovanija serii asinchronnykh mashin*. G.O.N.T.I., Moskva 1937.
118. Veinott C. G.: *MONECA – a new Network Calculator for Motor Performance Calculations*. AIEE Transactions cz. III, vol. 71, 1952, s. 231 – 239.
119. Veinott C. G.: *Induction Machinery Design Being Revolutionized by the Digital Computer*. AIEE Transactions cz. III, vol. 75, 1956 (February 1957), s. 1509 – 1515.

120. Veinott C. G.: *Synthesis of induction-motor designs on a digital computer*. Trans. AIEE, cz. III, vol.79, 1961, s.12.
121. Veinott C. G.: *Computer Design of Electric Machinery*. The MIT Press, 1972
122. Vidmar M.: *Die wirtschaftliche Aufbau der elektrischen Maschinen*. J. Springer Verlag, Berlin 1918.
123. Voleský E.: *Soubor interakčních programů pro oblast elektromagnetických výpočtů stejnosměrných strojů*. Technika elektrických strojů VUES Brno, 1990, číslo 1-2, s. 14 – 22.
124. Wieseman R. W.: *Graphical determination of Magnetic Fields. Practical Application to Salient Pole Synchronous Machine Design*. Trans. AIEE. 1927, s. 141 – 154.
125. Wilson W. E.: *Projektowanie techniczne w ujęciu systemowym*. WNT, Warszawa 1969.

Rękopis dostarczono, dnia 1.12.2002 r.

Opiniował: doc. dr inż. Jerzy Mukosiej

OUTLINE OF DEVELOPMENT OF ELECTRIC MACHINES DESIGN

M. DĄBROWSKI

SUMMARY *The aim of this work is to give an outline of development of the design methods of electric machines as a historical process. Also the state of art in this field is presented.*

It is proposed to divide this more than 150 years process into following main periods:

1. *Pre-designed period, from 1830 till about 1885;*
2. *Analytical methods without information technologies period, divided into sub-periods:*
 - *introductory period, from ~1885 till ~1917;*
 - *intuitive optimization period, from ~1917 till ~1950;*
3. *Digital methods with information and communication technologies period, after ~1950;*
4. *Objective deterministic optimization, after ~1960;*
5. *Stochastic optimization, after ~1990.*

In the introductory part of the second period, as a start point of a design, the output coefficient has been used. This coefficient, defined by different authors is given by formulae (1) ÷ (7). The most physically adequate is the formula

$$C_{Em} = \frac{P}{\pi^2 D^2 l n}$$

given by F. Emde [28], which is proportional to the electromagnetic torque of designed machine.

The output coefficient is not a “universally constant parameter” for all machines. Value of this parameter depends on many factors, first of all on the rated power and rated rotational speed of the machine.

The intuitive optimization started in 1917, after the M. Vidmar work on an economical dimensions of electromagnetic devices. Substantial changes in the design approaches started after 1950 due to application of electronic computers, digital programming, and objective optimization methods. The optimization or a mathematical programming problem is stated by equations (13) and (14). Generally, there exist hundreds of different optimization algorithms; mainly they are slightly improved versions of each other. Optimization methods can be divided into two main groups: deterministic methods, and stochastic methods. In engineering praxis the deterministic methods are often used, in research works – the stochastic one. Deterministic or classical optimization based on algorithm converging often to local extremum. In the modern stochastic methods the optimization is based on statistical analysis. These methods utilize random processes, statistical methods, interval arithmetic's, neural networks, and mainly genetic algorithms. In these methods the finite element optimization is also used.

In the paper the attention is also paid to the design automatization and relations to the machine construction with the use of the newly developed information and communication technologies.

Last but non-least a substantial contribution of polish researchers and engineers in this field are described.



Prof. dr hab. inż. Mirosław Dąbrowski urodził się w roku 1926. Po ukończeniu studiów na Wydziale Elektrycznym Politechniki Łódzkiej uzyskał w 1952 r. tytuł inżyniera, w 1954 r. stopień magistra, w 1960 r. – doktora a w 1966 r. – doktora habilitowanego. Od 1967 r. był pracownikiem naukowym Politechniki Poznańskiej. W roku 1973 uzyskał tytuł profesora nadzwyczajnego, a w roku 1979 – profesora zwyczajnego. W latach 1967...1998 kierował Katedrą a następnie Zakładem Maszyn Elektrycznych w Politechnice Poznańskiej opiekując się specjalnością maszyny elektryczne. W latach 1980...1984 pełnił funkcję prorektora ds. naukowych Politechniki Poznańskiej. Od roku 1989 jest członkiem korespondentem Polskiej Akademii Nauk. Od 1996 r. jest zatrudniony w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie. Prace badawcze dotyczą głównie zagadnień analizy pola elektromagnetycznego, syntezy elektromechanicznych przetworników energii oraz strat mocy w ferromagnetykach. Jest autorem ponad dwustu trzydziestu publikacji (w tym ponad pięćdziesiąt zagranicznych), ośmiu książek oraz autorem i współautorem siedmiu patentów.