

Monika MATYJASZCZYK-NOWAK

Techniczne Zakłady Naukowe im. gen. W. Sikorskiego w Częstochowie, Polska

Wykorzystanie metody elementów skończonych w modelowaniu pola magnetycznego

Wstęp

Analiza numeryczna jest metodą obliczeń oraz zajmuje się badaniem struktur ciągłych, w których zachodzi potrzeba wykonania obliczeń przybliżonych z uwzględnieniem aproksymacji występujących błędów. Rozwój technologii informacyjnej pozwolił na wykorzystanie skomplikowanych obliczeń na podstawie ustalonego algorytmu działań, które pozwoliły na lepszą przewidywalność uzyskanych wyników oraz błędów. Przedstawiona w pracy aplikacja komputerowa jest właśnie efektem wykorzystania takiego oprogramowania w zakresie modelowania zjawisk z dziedziny elektromagnetyzmu. Oczywiście metoda MES (metoda elementów skończonych) nie jest metodą idealną, obarczona jest licznymi obostrzeniami [Praużner, Ptak 2011: 291]. Program QuickField ver. 5.10 firmy ©Tera Analysis może być wykorzystywany nie tylko w modelowaniu inżynierskim, ale również stanowi niezwykle interesującą alternatywę w obszarze dydaktycznym w kształceniu technicznym [Praużner 2006: 121]. Pozwala on na uniknięcie zbyt czasochłonnych i trudnych przeliczeń matematycznych, natomiast stwarza doskonałą okazję do obserwacji i interpretacji zachodzących zjawisk w zaprojektowanym modelu. Ponieważ jest powszechnie dostępna na stronie producenta, można ją pobrać online oraz wykorzystać w kształceniu zdalnym [Praużner 2009]. Sam projekt opracowania symulacji układu to jeden z głównych celów prowadzonych prac, natomiast analiza w wyniku pojawiających się obostrzeń, błędów w projektowaniu oraz wprowadzonych modyfikacji to kolejny obszar działań dydaktycznych. Przedstawiony w pracy przykład wykorzystania MES w symulacji i modelowaniu pola magnetycznego to jedynie przykład skonstruowany na potrzeby publikacji, natomiast w rzeczywistości sam projekt jest uzależniony od indywidualnych potrzeb słuchacza. MES można traktować jako sposób aproksymacji obiektu ciągłego zbiorem elementów (podobszarów) prowadzący do ustalenia równań opisujących w sposób przybliżony, z dostateczną dla technika dokładnością [Praużner 2012: 205].

1. Program QuickField w modelowaniu pola magnetycznego

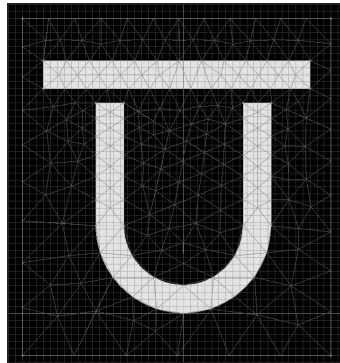
W pierwszym etapie przed przystąpieniem do symulacji program wymaga „sformułowania modelu zagadnienia”, czyli uściślenia, w jakim obszarze będzie

wykonywana analiza dwuwymiarowych zagadnień układu. Do dyspozycji program oferuje nam następujące działy: analizę magnetostatyczną, analizę elektrostyczną, analizę pola przepływowego, analizę pola temperaturowego oraz analizę pola naprężeń mechanicznych [Prazner 2006: 121]. W omawianym przypadku będzie to „pole magnetyczne”. Badaniu poddano przypadkowy magnes trwały AlNiCo będący bardzo często na wyposażeniu każdego laboratorium miernictwa z zakresu elektromagnetyzmu o wymiarach 50 mm x 60 mm x 10 mm. Magnes zawiera: 7–10% Al, 13–16% Ni, 20–40% Co, reszta to Fe. Ponadto magnes AlNiCo ma wprowadzane dodatki, takie jak Cu (3–5%), Ti (1–8%) oraz Nb lub Ta. Stop AlNiCo ma niewielkie natężenie pola koercji przy wysokiej remanencji. Magnesy te mają najczęściej wydłużony w kierunku magnetyzacji kształt sztabkowy lub podkowiasty. W założeniach materiałowych wykorzystano uśrednione wartości dla stopu AlNiCo-5. Gdy już zostanie odwzorowany kształt przedmiotu, kolejną czynnością jest zdefiniowanie poszczególnych składowych każdej figury w tzw: Block Labels, Edge Labels, Vertex Labels. W rozumieniu teorii MES to nic innego jak określenie nazw dla bloków, krawędzi i wierzchołków (rys.1). Model przedstawia magnes trwały oraz umieszczony w jego otoczeniu element metalowy. Kolejnym krokiem jest wprowadzenie dla każdego z tych elementów danych oznaczających określenie właściwości nadanych elementom etykiet, takich jak: określenie wymuszeń, warunków brzegowych i właściwości materiałowych. Blokom (Magnes-, Magnes+, Powietrze, Stal) przyporządkowuje się właściwości materiałowe, wybranym obszarom – wymuszenia, natomiast krawędziom i wierzchołkom warunki brzegowe [Bąk, Burczyński 2001].

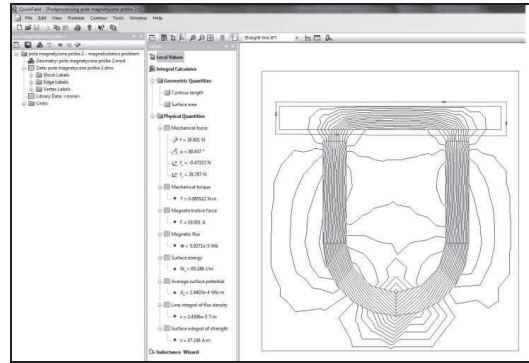
W celu ograniczenia powierzchni obszaru symulacji, a tym samym ze względu na ograniczoną rozdzielczość siatki, ograniczono obszar badań, co zostało uwidocznione poprzez figurę prostokąta wokół elementów badanych. W symulacji przyjęto m.in. następujące parametry symulacji: przenikalność magnetyczna powietrza $\mu=1.000004$; względna przenikalność magnetyczna stali o zawartości 0,03%C $\mu=2000$; przenikalność względna magnesu (+/-) $\mu=1,1$; natężenie koercji dla AlNiCo $BH_c=100\text{kA/m}$. Następnie za pomocą opcji Results-Solve program nanosi na wskazaną powierzchnię siatkę i przystępuje do określenia macierzy sztywności oraz rozwiązuje układ równań liniowych lub nieliniowych. Wyniki symulacji przedstawione zostają na licznych wykresach oraz obrazach ukazujących między innymi przebieg linii ekwipotencjalnych, wektorów, map rozkładów obliczonych badanych wielkości z odniesieniem do legendy ukazującej w postaci kolorystycznej obszary występowania oczekiwanych wartości, przemieszczeń układu, wykresów liniowych ukazujących składowe wartości w postaci skalarnej i wektorowej [Prazner 2006].

2. Zastosowanie MES w pomiarze pola magnetycznego

Dla danego przykładu oznaczono jako elementy charakterystyczne 18 wierzchołków, 21 krawędzi, 6 bloków, a następnie wygenerowano sieć 221 elementów skończonych o kształcie trójkątów.

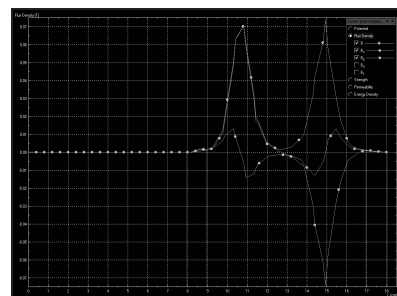


Rys. 1. Odwzorowanie kształtu badanych elementów w płaszczyźnie x-y z nałożoną siatką



Rys. 2. Rozkład linii pola magnetycznego

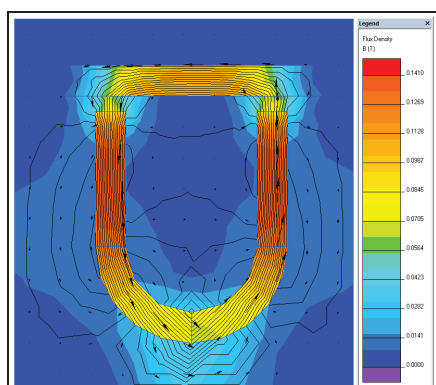
Za pomocą narzędzia Add to Contour poddano analizie obszar ograniczony linią czerwoną przy użyciu zintegrowanego kalkulatora przeliczeń matematycznych (rys. 2), w postaci tabelarycznej oraz wykresów liniowych (rys. 3, 4).



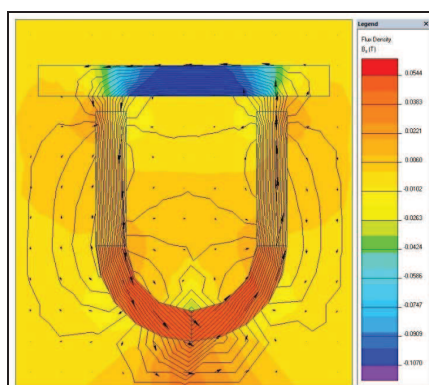
Rys. 3. Przebieg składowych B_x , B_y indukcji magnetycznej

Id	Id1	Id2	Id3	Id4	Id5	Id6	Id7	Id8	Id9	Id10	Id11	Id12	Id13	Id14	Id15	Id16	Id17	Id18	Id19	Id20	Id21	Id22	Id23	Id24	Id25	Id26	Id27	Id28	Id29	Id30	Id31	Id32	Id33	Id34	Id35	Id36	Id37	Id38	Id39	Id40	Id41	Id42	Id43	Id44	Id45	Id46	Id47	Id48	Id49	Id50	Id51	Id52	Id53	Id54	Id55	Id56	Id57	Id58	Id59	Id60	Id61	Id62	Id63	Id64	Id65	Id66	Id67	Id68	Id69	Id70	Id71	Id72	Id73	Id74	Id75	Id76	Id77	Id78	Id79	Id80	Id81	Id82	Id83	Id84	Id85	Id86	Id87	Id88	Id89	Id90	Id91	Id92	Id93	Id94	Id95	Id96	Id97	Id98	Id99	Id100	Id101	Id102	Id103	Id104	Id105	Id106	Id107	Id108	Id109	Id110	Id111	Id112	Id113	Id114	Id115	Id116	Id117	Id118	Id119	Id120	Id121	Id122	Id123	Id124	Id125	Id126	Id127	Id128	Id129	Id130	Id131	Id132	Id133	Id134	Id135	Id136	Id137	Id138	Id139	Id140	Id141	Id142	Id143	Id144	Id145	Id146	Id147	Id148	Id149	Id150	Id151	Id152	Id153	Id154	Id155	Id156	Id157	Id158	Id159	Id160	Id161	Id162	Id163	Id164	Id165	Id166	Id167	Id168	Id169	Id170	Id171	Id172	Id173	Id174	Id175	Id176	Id177	Id178	Id179	Id180	Id181	Id182	Id183	Id184	Id185	Id186	Id187	Id188	Id189	Id190	Id191	Id192	Id193	Id194	Id195	Id196	Id197	Id198	Id199	Id200	Id201	Id202	Id203	Id204	Id205	Id206	Id207	Id208	Id209	Id210	Id211	Id212	Id213	Id214	Id215	Id216	Id217	Id218	Id219	Id220	Id221																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
N_00000	-4.2220	7.2000	0.0000	-0.0000	-4.2607e-7	1.5852e+4	1.58507e+4	4.7952e+5	4.7952e+5	1.5857e+4	1.58565	1.58566	1.58567	1.58568	1.58569	1.58570	1.58571	1.58572	1.58573	1.58574	1.58575	1.58576	1.58577	1.58578	1.58579	1.58580	1.58581	1.58582	1.58583	1.58584	1.58585	1.58586	1.58587	1.58588	1.58589	1.58590	1.58591	1.58592	1.58593	1.58594	1.58595	1.58596	1.58597	1.58598	1.58599	1.58600	1.58601	1.58602	1.58603	1.58604	1.58605	1.58606	1.58607	1.58608	1.58609	1.58610	1.58611	1.58612	1.58613	1.58614	1.58615	1.58616	1.58617	1.58618	1.58619	1.58620	1.58621	1.58622	1.58623	1.58624	1.58625	1.58626	1.58627	1.58628	1.58629	1.58630	1.58631	1.58632	1.58633	1.58634	1.58635	1.58636	1.58637	1.58638	1.58639	1.58640	1.58641	1.58642	1.58643	1.58644	1.58645	1.58646	1.58647	1.58648	1.58649	1.58650	1.58651	1.58652	1.58653	1.58654	1.58655	1.58656	1.58657	1.58658	1.58659	1.58660	1.58661	1.58662	1.58663	1.58664	1.58665	1.58666	1.58667	1.58668	1.58669	1.58670	1.58671	1.58672	1.58673	1.58674	1.58675	1.58676	1.58677	1.58678	1.58679	1.58680	1.58681	1.58682	1.58683	1.58684	1.58685	1.58686	1.58687	1.58688	1.58689	1.58690	1.58691	1.58692	1.58693	1.58694	1.58695	1.58696	1.58697	1.58698	1.58699	1.58700	1.58701	1.58702	1.58703	1.58704	1.58705	1.58706	1.58707	1.58708	1.58709	1.58710	1.58711	1.58712	1.58713	1.58714	1.58715	1.58716	1.58717	1.58718	1.58719	1.58720	1.58721	1.58722	1.58723	1.58724	1.58725	1.58726	1.58727	1.58728	1.58729	1.58730	1.58731	1.58732	1.58733	1.58734	1.58735	1.58736	1.58737	1.58738	1.58739	1.58740	1.58741	1.58742	1.58743	1.58744	1.58745	1.58746	1.58747	1.58748	1.58749	1.58750	1.58751	1.58752	1.58753	1.58754	1.58755	1.58756	1.58757	1.58758	1.58759	1.58760	1.58761	1.58762	1.58763	1.58764	1.58765	1.58766	1.58767	1.58768	1.58769	1.58770	1.58771	1.58772	1.58773	1.58774	1.58775	1.58776	1.58777	1.58778	1.58779	1.58780	1.58781	1.58782	1.58783	1.58784	1.58785	1.58786	1.58787	1.58788	1.58789	1.58790	1.58791	1.58792	1.58793	1.58794	1.58795	1.58796	1.58797	1.58798	1.58799	1.58800	1.58801	1.58802	1.58803	1.58804	1.58805	1.58806	1.58807	1.58808	1.58809	1.58810	1.58811	1.58812	1.58813	1.58814	1.58815	1.58816	1.58817	1.58818	1.58819	1.58820	1.58821	1.58822	1.58823	1.58824	1.58825	1.58826	1.58827	1.58828	1.58829	1.58830	1.58831	1.58832	1.58833	1.58834	1.58835	1.58836	1.58837	1.58838	1.58839	1.58840	1.58841	1.58842	1.58843	1.58844	1.58845	1.58846	1.58847	1.58848	1.58849	1.58850	1.58851	1.58852	1.58853	1.58854	1.58855	1.58856	1.58857	1.58858	1.58859	1.58860	1.58861	1.58862	1.58863	1.58864	1.58865	1.58866	1.58867	1.58868	1.58869	1.58870	1.58871	1.58872	1.58873	1.58874	1.58875	1.58876	1.58877	1.58878	1.58879	1.58880	1.58881	1.58882	1.58883	1.58884	1.58885	1.58886	1.58887	1.58888	1.58889	1.58890	1.58891	1.58892	1.58893	1.58894	1.58895	1.58896	1.58897	1.58898	1.58899	1.58900	1.58901	1.58902	1.58903	1.58904	1.58905	1.58906	1.58907	1.58908	1.58909	1.58910	1.58911	1.58912	1.58913	1.58914	1.58915	1.58916	1.58917	1.58918	1.58919	1.58920	1.58921	1.58922	1.58923	1.58924	1.58925	1.58926	1.58927	1.58928	1.58929	1.58930	1.58931	1.58932	1.58933	1.58934	1.58935	1.58936	1.58937	1.58938	1.58939	1.58940	1.58941	1.58942	1.58943	1.58944	1.58945	1.58946	1.58947	1.58948	1.58949	1.58950	1.58951	1.58952	1.58953	1.58954	1.58955	1.58956	1.58957	1.58958	1.58959	1.58960	1.58961	1.58962	1.58963	1.58964	1.58965	1.58966	1.58967	1.58968	1.58969	1.58970	1.58971	1.58972	1.58973	1.58974	1.58975	1.58976	1.58977	1.58978	1.58979	1.58980	1.58981	1.58982	1.58983	1.58984	1.58985	1.58986	1.58987	1.58988	1.58989	1.58990	1.58991	1.58992	1.58993	1.58994	1.58995	1.58996	1.58997	1.58998	1.58999	1.59000	1.59001	1.59002	1.59003	1.59004	1.59005	1.59006	1.59007	1.59008	1.59009	1.59010	1.59011	1.59012	1.59013	1.59014	1.59015	1.59016	1.59017	1.59018	1.59019	1.59020	1.59021	1.59022	1.59023	1.59024	1.59025	1.59026	1.59027	1.59028	1.59029	1.59030	1.59031	1.59032	1.59033	1.59034	1.59035	1.59036	1.59037	1.59038	1.59039	1.59040	1.59041	1.59042	1.59043	1.59044	1.59045	1.59046	1.59047	1.59048	1.59049	1.59050	1.59051	1.59052	1.59053	1.59054	1.59055	1.59056	1.59057	1.59058	1.59059	1.59060	1.59061	1.59062	1.59063	1.59064	1.59065	1.59066	1.59067	1.59068	1.59069	1.59070	1.59071	1.59072	1.59073	1.59074	1.59075	1.59076	1.59077	1.59078	1.59079	1.59080	1.59081	1.59082	1.59083	1.59084	1.59085	1.59086	1.59087	1.59088	1.59089	1.59090	1.59091	1.59092	1.59093	1.59094	1.59095	1.59096	1.59097	1.59098	1.59099	1.59100	1.59101	1.59102	1.59103	1.59104	1.59105	1.59106	1.59107	1.59108	1.59109	1.59110	1.59111	1.59112	1.59113	1.59114	1.59115	1.59116	1.59117	1.59118	1.59119	1.59120	1.59121	1.59122	1.59123	1.59124	1.59125	1.59126	1.59127	1.59128	1.59129	1.59130	1.59131	1.59132	1.59133	1.59134	1.59135	1.59136	1.59137	1.59138	1.59139	1.59140	1.59141	1.59142	1.59143	1.59144	1.59145	1.59146	1.59147	1.59148	1.59149	1.59150	1.59151	1.59152	1.59153	1.59154	1.59155	1.59156	1.59157	1.59158	1.59159	1.59160	1.59161	1.59162	1.59163	1.59164	1.59165	1.59166	1.59167	1.59168	1.59169	1.59170	1.59171	1.59172	1.59173	1.59174	1.59175	1.59176	1.59177	1.59178	1.59179	1.59180	1.59181	1.59182	1.59183	1.59184	1.59185	1.59186	1.59187	1.59188	1.59189	1.59190	1.59191	1.59192	1.59193	1.59194	1.59195	1.59196	1.59197	1.59198	1.59199	1.59200	1.59201	1.59202	1.59203	1.59204	1.59205	1.59206	1.59207	1.59208	1.59209	1.59210	1.59211	1.59212	1.59213	1.59214	1.59215	1.59216	1.59217	1.59218	1.59219	1.59220	1.59221	1.59222	1.59223	1.59224	1.59225	1.59226	1.59227	1.59228	1.59229	1.59230	1.59231	1.59232	1.59233	1.59234	1.59235	1.59236	1.59237	1.59238	1.59239	1.59240	1.59241	1.59242	1.59243	1.59244	1.59245	1.59246	1.59247	1.59248	1.59249	1.59250	1.59251	1.59252	1.59253	1.59254	1.59255	1.59256	1.59257	1.59258	1.59259	1.59260	1.59261	1.59262	1.59263	1.59264	1.59265	1.59266	1.59267	1.59268	1.59269	1.59270	1.59271	1.59272	1.59273	1.59274	1.59275	1.59276	1.59277	1.59278	1.59279	1.59280</

wzajemnego ich położenia automatycznie powoduje zmianę linii indukcji magnetycznej i natężenia pola magnetycznego, gęstości energii, potencjału magnetycznego itd. Naprowadzenie wskaźnika (myszy) na badany obszar w dowolny jego punkt powoduje odczyt wartości danych wielkości elektrycznych.



Rys. 5. Obraz linii pola magnetycznego oraz modulu indukcji



Rys. 6. Przykład obrazu linii pola magnetycznego oraz modulu indukcji dla składowej B_x

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych rozważań można sformułować następujące wnioski:

- symulacja jest wynikiem jedynie odwzorowania z określoną dokładnością zjawisk fizycznych, a prawidłowe przeprowadzenie badań wymaga dobrej znajomości tematu, określenia celu badań oraz umiejętności interpretacji uzyskanych wyników, stąd jego przydatność dydaktyczna wydaje się w pełni uzasadniona, np. w metodzie problemowej, projekcie itp. [Prazzner 2013];
- wizualizacja zachodzących zjawisk, automatyka skomplikowanych obliczeń, przedstawienie danych w postaci tabelarycznej oraz wykresów zachęcają badacza do dalszej i głębszej analizy problemu, stanowią intuicyjne oraz atrakcyjne środowisko pracy;
- program udostępniony jest między innymi w wersji freeware z pewnymi ograniczeniami (wersja studencka), co w istotny sposób ogranicza jego możliwości, natomiast jego dostępność online jest wyraźnym udogodnieniem w aspekcie kształcenia technicznego w formie Blended Learning [Prazzner 2009];
- przedstawiony program jest doskonałą propozycją wykorzystania symulacji MES 2D w kształceniu zarówno na poziomie technikum, jak i szkoły wyższej, pracę w programie można traktować jako wstęp do praktyki badawczej w przyszłej pracy inżynierskiej;

- ćwiczenie można również wzbogacić merytorycznie o kolejne etapy badań, co w konsekwencji podniesie jego wartość dydaktyczną, np. poprzez dokonanie pomiaru teslomierzem indukcji magnetycznej bądź natężenia pola magnetycznego występującego w modelu rzeczywistym, porównaniu z danymi symulacyjnymi i obliczeniu błędów pomiarów.

Literatura

- Bąk R., Burczyński T. (2001), *Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego*, Warszawa.
- Goleman R., Surdacki P., Czerwiński D. (1996), *Zastosowanie programu QuickField w nauczaniu teorii pola elektromagnetycznego* [w:] *Zastosowania komputerów w elektrotechnice*, Konferencja Naukowo-Techniczna ZKwE'96, Poznań/Kiekrz.
- Heermann D. (1997), *Podstawy symulacji komputerowych w fizyce*, Warszawa.
- Prauzner T. (2006), *Zastosowanie programów symulacyjnych w nauczaniu przedmiotów technicznych* [w:] *Prace Naukowe AJD, Edukacja techniczna i informatyczna*, red. J. Wilsz, Częstochowa.
- Prauzner T. (2006), *Wykorzystanie mediów elektronicznych w edukacji elektronicznej studentów* [w:] *Technika – Informatyka – Edukacja*, red. W. Walat, Rzeszów.
- Prauzner T. (2010), *Applications of multimedia devices as teaching aids* [w:] *Annales UMCS Informatica AI X*, 1, red. R. Szczygieł, Lublin.
- Prauzner T. (2009), *Blended Learning – nowa metoda nauczania* [w:] *Prace Naukowe AJD, Edukacja techniczna i informatyczna*, red. A. Gil, Częstochowa.
- Prauzner T. (2012), *ICT education in practice* [w:] *Edukacja ustawiczna dorosłych*, red. H. Bednarczyk, Radom.
- Prauzner T. (2013), *Information Technology in Contemporary Education – Individuals' Recherche*, "American Journal of Educational Research", Vol. 1, No. 10, Newark, United States.
- Prauzner T. (2012), *Zakłócenia elektromagnetyczne w elektronicznych systemach alarmowych*, „Przegląd Elektrotechniczny”, nr 12b.
- Prauzner T., Ptak P. (2011), *Programy symulacyjne w inżynierii bezpieczeństwa*, „Journal of Technology and Information Education”, red. J. Novotný, J. Zukerstein, Usti nad Labem.
- Prauzner T., Ptak P. (2010), *Rola i miejsce multimedialnych pomocy naukowych w edukacji technicznej* [w:] *Edukacja – Technika – Informatyka*, red. W. Walat, Rzeszów.
- Ptak P., Prauzner T. (2011), *Zastosowanie programów komputerowych w dydaktyce przedmiotów technicznych*, „Journal of Technology and Information Education”, ISSN 1803-537X (print), ISSN 1803-6805 (on-line).
- User's Guide V. 5.1 Students' QuickField – Finite Element Analysis System (2013), Tera Analysis, <http://www.QuickField.com>

Streszczenie

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania metody elementów skończonych w analizie i pomiarach wielkości opisujących pole magnetyczne.

Pomiary przeprowadzono w programie QuickField. Wykorzystanie metody symulacji w obrębie indukcyjności umożliwia ocenę pracy modelu w ustalonych warunkach zewnętrznych oraz wprowadzenie modyfikacji konstrukcyjnych układu. Program ten może być również środowiskiem dydaktycznym w kształceniu zdalnym i technicznym uczniów.

Słowa kluczowe: elektromagnetyzm, magnetyzm, metoda elementów skończonych, MES, dydaktyka.

The use of finite element method in modeling the magnetic field

Abstract

In the paper have been presented the possibility of using the finite element method in the analysis and measurements that describe the size of the magnetic field. Measurements were performed in program QuickField. The use of simulation methods within the inductance model allows evaluation of the work under specified conditions, external and structural modifications of the system. This program can be also using in environment educational in technical education students.

Key words: electromagnetism, magnetism, finite element method, MES, teaching.