

# НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ "ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА" держвидання

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України КВ № 6115 від 30.04.2002 р. Видання засновано Національним технічним університетом "Харківський політехнічний інститут" у 2002 р.

- -

.

### РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Клименко Б.В.	головний редактор,			
	д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків			
Баранов М.І.	д.т.н., НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ", Харків			
Батигін Ю.В.	д.т.н., професор, ХНАДУ, Харків	- F		
Біро Оскар	професор, Технічний університет,	Оме		
	м. І рац, Австрія	По		
ьоєв В.М.	д.т.н., професор, НТУ "ХПП", Харків			
Болюх В.Ф.	д.т.н., професор, НТУ "ХГП", Харків			
Буткевич О.Ф.	д.т.н., професор, гол.н.с. IEД НАНУ, КИВ			
Віницький Ю.Д.	д.т.н., професор, GERUS Москва, Росія			
Гурин А.Г.	д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків			
Данько В.Г.	голова редакційної ради,			
	д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків			
Долежел Іво	професор, Західно-чеський університет,			
	Пльзень, Чеська Республіка			
Жемеров Г.Г.	д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків			
Загірняк М.В.	д.т.н., професор, член-кор. НАПНУ,			
	ректор КрНУ, Кременчук			
Кириленко О.В.	д.т.н., професор, академік НАНУ,			
K	директор ІЕД НАНУ, КИІВ			
кравченко в.і.	I. д.т.н., професор, директор НДПКІ			
	молня ттэ лп, ларкв			
EDITORIAL	BOARD:			
Klymenko B.V.	Editor-in-Chief professor National			
	Technical University "Kharkiv Polytechnic			
	Institute" (NTU "KhPI"), Kharkiv, Ukraine			
Baranov M.I.	Dr.Sc. (Eng.), NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine			
Batygin Yu.V.	Professor, Kharkiv National Automobile			
	and Highway University, Kharkiv, Ukraine			
Bíró O.	Professor, Institute for Fundamentals and			
	Theory in Electrical Engineering, Graz, Austria			
Boev V.M.	Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine			
Bolyukh V.F.	Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine			
Butkevich O.F.	Professor, Institute of Electrodynamics			
	of NAS Ukraine, Kyiv			
Dan'ko V.G.	Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine			
Doležel I.	Professor, University of West Bohemia,			
	Pilsen, Czech Republic			
Gurin A.G.	Pilsen, Czech Republic Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine			
Gurin A.G. Kirilenko O.V.	Pilsen, Czech Republic Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, Institute of Electrodynamics of NAS	01-1		
Gurin A.G. Kirilenko O.V.	Pilsen, Czech Republic Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine, academician of NAS of Ukraine, Kyiv	Shi		
Gurin A.G. Kirilenko O.V. Kravchenko V.I.	Pilsen, Czech Republic Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine, academician of NAS of Ukraine, Kyiv Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine	Shi		
Gurin A.G. Kirilenko O.V. Kravchenko V.I. Masliev V.G.	Pilsen, Czech Republic Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine, academician of NAS of Ukraine, Kyiv Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine	Shi		
Gurin A.G. Kirilenko O.V. Kravchenko V.I. Masliev V.G. Mihaylov V.M.	Pilsen, Czech Republic Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine, academician of NAS of Ukraine, Kyiv Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine	Shi		
Gurin A.G. Kirilenko O.V. Kravchenko V.I. Masliev V.G. Mihaylov V.M. Milykh V.I. Namitokov K.K.	Pilsen, Czech Republic Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine, academician of NAS of Ukraine, Kyiv Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine	Shi		
Gurin A.G. Kirilenko O.V. Kravchenko V.I. Masliev V.G. Mihaylov V.M. Milykh V.I. Namitokov K.K.	Pilsen, Czech Republic Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine, academician of NAS of Ukraine, Kyiv Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Ukraine	Shi		
Gurin A.G. Kirilenko O.V. Kravchenko V.I. Masliev V.G. Mihaylov V.M. Milykh V.I. Namitokov K.K. Omel'vanenko V.I	Pilsen, Czech Republic Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine, academician of NAS of Ukraine, Kyiv Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine	Shi		
Gurin A.G. Kirilenko O.V. Kravchenko V.I. Masliev V.G. Mihaylov V.M. Milykh V.I. Namitokov K.K. Omel'yanenko V.I. Podoltsev O D	Pilsen, Czech Republic Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine, academician of NAS of Ukraine, Kyiv Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv, National University of Municipal Economy, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine	Shi		
Gurin A.G. Kirilenko O.V. Kravchenko V.I. Masliev V.G. Mihaylov V.M. Milykh V.I. Namitokov K.K. Omel'yanenko V.I. Podoltsev O.D.	Pilsen, Czech Republic Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine, academician of NAS of Ukraine, Kyiv Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Orofessor, Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine, Kviv	Shi Z		
Gurin A.G. Kirilenko O.V. Kravchenko V.I. Masliev V.G. Mihaylov V.M. Milykh V.I. Namitokov K.K. Omel'yanenko V.I. Podoltsev O.D.	Pilsen, Czech Republic Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine, academician of NAS of Ukraine, Kyiv Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv, National University of Municipal Economy, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Odessa National Polytechnic	Shi Z 7		



маслієв В.І.	д.т.н., професор, нту "Хгн", Харкв
Михайлов В.М.	д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
Мілих В.І.	д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
Намітоков К.К.	д.т.н., професор, ХНУМГ, Харків
) Омельяненко В.І.	д.т.н., професор, НТУ "ХПІ", Харків
Полопьцев О Л	лтн професор голнс ІЕЛ НАНУ Київ
Пуйпо Г В	
Райнін Б.Ю.	д.т.н., професор, московський
	енергетичний інститут, імосква, Росія
Рєзцов В.Ф.	д.т.н., професор, член-кор. НАНУ,
	заст. директора IBE НАНУ, Київ
Розанов Ю.К.	д.т.н., професор, Московський
	енергетичний інститут, Москва, Росія
Розов В.Ю.	д.т.н., професор, член-кор, НАНУ.
	лиректор ЛУ "ІТПМ НАН України" Харків
DVD2KOD B B	дти професор HTV "XПI" Харија
Гудаков Б.Б.	
COKOJI C.I.	
	проректор НТУ ХПІ, Харків
Сосков А.Г.	д.т.н., професор, ХНУМГ, Харків
Ткачук В.I.	д.т.н., професор, НУ "Львівська
	політехніка", Львів
Шинкаренко В.Ф.	д.т.н., професор, НТУУ "КПІ", Київ
Юферов В.Б.	д.т.н., професор, ННЦ ХФТІ, Харків
Rainin V F	Professor Moscow Power Engineering
itanini v.⊑.	Trolessor, moscow rower Engineering
	Institute Measury Dussia
	Institute, Moscow, Russia
Reztsov V.F.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute
Reztsov V.F.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine,
Reztsov V.F.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu. Rudakov V.V.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu. Rudakov V.V. Sokol Ye.I.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, corresponding member of NAS of
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu. Rudakov V.V. Sokol Ye.I.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Vice-rector of NTU "KhPI", Kharkiv,
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu. Rudakov V.V. Sokol Ye.I.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Vice-rector of NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu. Rudakov V.V. Sokol Ye.I. Soskov A.G.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Vice-rector of NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv National
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu. Rudakov V.V. Sokol Ye.I. Soskov A.G.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Vice-rector of NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Ukraine
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu. Rudakov V.V. Sokol Ye.I. Soskov A.G. Shinkarenko V.F.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Vice-rector of NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Ukraine Professor, National Technical University of
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu. Rudakov V.V. Sokol Ye.I. Soskov A.G. Shinkarenko V.F.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, OXTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Ukraine Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Ukraine
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu. Rudakov V.V. Sokol Ye.I. Soskov A.G. Shinkarenko V.F. Tkachuk V I	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Ukraine Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu. Rudakov V.V. Sokol Ye.I. Soskov A.G. Shinkarenko V.F. Tkachuk V.I.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Vice-rector of NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Ukraine Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine Professor, Lviv Polytechnic National University Ukraine
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu. Rudakov V.V. Sokol Ye.I. Soskov A.G. Shinkarenko V.F. Tkachuk V.I.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Vice-rector of NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Ukraine Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine Professor, Lviv Polytechnic National University, Ukraine
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu. Rudakov V.V. Sokol Ye.I. Soskov A.G. Shinkarenko V.F. Tkachuk V.I. Vinitzki Yu.D.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Vice-rector of NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Ukraine Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine Professor, Lviv Polytechnic National University, Ukraine Professor, GERUS, Moscow, Russia
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu. Rudakov V.V. Sokol Ye.I. Soskov A.G. Shinkarenko V.F. Tkachuk V.I. Vinitzki Yu.D. Yuferov V.B.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Vice-rector of NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Ukraine Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine Professor, Lviv Polytechnic National University, Ukraine Professor, GERUS, Moscow, Russia Professor, Kharkiv National Science Center
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu. Rudakov V.V. Sokol Ye.I. Soskov A.G. Shinkarenko V.F. Tkachuk V.I. Vinitzki Yu.D. Yuferov V.B.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Vice-rector of NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Ukraine Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine Professor, Lviv Polytechnic National University, Ukraine Professor, GERUS, Moscow, Russia Professor, Kharkiv National Science Center Institute of Physics and Technology, Ukraine
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu. Rudakov V.V. Sokol Ye.I. Soskov A.G. Shinkarenko V.F. Tkachuk V.I. Vinitzki Yu.D. Yuferov V.B. Zagirnyak M.V.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Vice-rector of NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Ukraine Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine Professor, Lviv Polytechnic Institute", Ukraine Professor, GERUS, Moscow, Russia Professor, Kharkiv National Science Center Institute of Physics and Technology, Ukraine
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu. Rudakov V.V. Sokol Ye.I. Soskov A.G. Shinkarenko V.F. Tkachuk V.I. Vinitzki Yu.D. Yuferov V.B. Zagirnyak M.V.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Vice-rector of NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Ukraine Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine Professor, GERUS, Moscow, Russia Professor, Kharkiv National Science Center Institute of Physics and Technology, Ukraine Professor, corresponding member of NAPS Ukraine, rector of Kremenchuk M.Ostrohradskii
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu. Rudakov V.V. Sokol Ye.I. Soskov A.G. Shinkarenko V.F. Tkachuk V.I. Vinitzki Yu.D. Yuferov V.B. Zagirnyak M.V.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Vice-rector of NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Ukraine Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine Professor, GERUS, Moscow, Russia Professor, Kharkiv National Science Center Institute of Physics and Technology, Ukraine Professor, corresponding member of NAPS Ukraine, rector of Kremenchuk M.Ostrohradskii National University, Kremenchuk, Ukraine
Reztsov V.F. Rozanov Yu.C. Rozov V.Yu. Rudakov V.V. Sokol Ye.I. Soskov A.G. Shinkarenko V.F. Tkachuk V.I. Vinitzki Yu.D. Yuferov V.B. Zagirnyak M.V.	Institute, Moscow, Russia Professor, Vice-director of Institute for Renewable Energy of NAS of Ukraine, corresponding member of NAS Ukraine, Kyiv Professor, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Director of State Institution "Institute of Technical Problems of Magnetism of the NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, corresponding member of NAS of Ukraine, Vice-rector of NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine Professor, O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy, Ukraine Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine Professor, GERUS, Moscow, Russia Professor, GERUS, Moscow, Russia Professor, corresponding member of NAPS Ukraine, rector of Kremenchuk M.Ostrohradskii National University, Kremenchuk, Ukraine Professor, NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine

Відповідальний секретар / Executive secretary: Гречко О.М. / Grechko O.M., тел. +38 067 3594696, e-mail: a.m.grechko@mail.ru

Адреса редакції / Editorial office address: Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна Dept. of Electrical Apparatuses, NTU "KhPI", Frunze Str., 21, Kharkiv, 61002, Ukraine тел. / phone: +38 057 7076281, e-mail: a.m.grechko@mail.ru ISSN (print) 2074-272X, ISSN (online) 2309-3404 © Національний технічний університет "ХПІ", 2014 Підписано до друку 24.08.2014 р. Формат 60 х 90 ½. Офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,25.

ідписано до друку 24.08.2014 р. Формат 60 х 90 ½. Офсетний. Друк – лазерний. Друк. арк. 9,25. Наклад 200 прим. Зам. № 66/172-04-2014. Ціна договірна.

Дизайн та оформлення обкладинки ФОП Тимченко А.М. 61124, Україна, м. Харків-124, a/c 2249

Надруковано ТОВ "Друкарня "Мадрид"", м. Харків, вул. Ольмінського, 11



# ЕЛЕКТРОТЕХНІКА І ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА ELECTRICAL ENGINEERING & ELECTROMECHANICS

Науково-практичний журнал Научно-практический журнал Scientific and practical journal



2014/4



Рекомендовано до видання Вченою радою Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Протокол № 6 від 26 червня 2014 р.

# ЗМІСТ

## Електротехніка. Визначні події. Славетні імена

<b>Баранов М.И.</b> Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 21: Искусственный интеллект и робототехника	3
Електричні машини та апарати	
<b>Милых В.И., Полякова Н.В.</b> Численно-полевая оценка эффективности укорочения обмотки статора турбогенератора	12
Силова електроніка	
<b>Власенко Р.В., Бялобржеський О.В.</b> Алгоритм прогнозуючого управління трифазного силового активного фільтру	17
Иванов В.Г. Анализ взаимной емкости и индуктивности печатного монтажа	22
Теоретична електротехніка	
Баранов М.И. Квантово-волновая природа электрического тока в металлическом проводнике и ее некоторые электрофизические макропроявления Кутковецький В.Я. Закон електромагнітної індукції	25 34
Техніка сильних електричних та магнітних полів	
Байда Е.И. Расчет электромагнитных сил, действующих на тонкую ферромагнитную пластину в процессе магнитно-импульсной обработки	40
с использованием объёмных высоковольтных импульсных разрядов: коронного и барьерного	44
Бондаренко А.Ю., Финкельштейн В.Б., Степанов А.А. Экспериментальная апробация электро- динамической системы с прямым пропусканием тока для внешней рихтовки автомобильных кузовов Гунько В.И., Лмитришин А.Я., Онишенко Л.И., Перекупка И.А., Топоров С.О. Создание	50
высоковольтных импульсных конденсаторов на основе комбинированного пленочного диэлектрика	53
магнитных проницаемостей листовых металлов	56
Ezermpului emeluii venevi i evenevu	

# Електричні станції, мережі і системи

Бедерак Я.С. Применение метода экспоненциального сглаживания для восстановления утерянных	
данных технического учета электроэнергии на промышленных предприятиях	61
Колиушко Г.М., Колиушко Д.Г., Руденко С.С. К вопросу повышения точности расчета нормируемых	
параметров заземляющих устройств действующих электроустановок	65
Нижевский И.В., Нижевский В.И., Шишигин С.Л. Исследование выравнивания электрических	
потенциалов по поверхности земли на занятой заземлителем территории	71

# TABLE OF CONTENTS

# Electrical Engineering. Events. Famous Names

Baranov M.I. An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 21:	
Artificial intelligence and robotics	. 3
Electrical machines and apparatus	
Milykh V.I., Polyakova N.V. Numerical field estimation of turbogenerator stator winding shortening efficiency	12
Power Electronics	
Vlasenko R.V., Bialobrzeski O.V. A predictive control algorithm for an active three-phase power filter Ivanov V.G. Analysis of mutual capacitance and inductance of printed circuit	17 22
Theoretical Electrical Engineering	
<b>Baranov M.I.</b> Quantum-wave nature of electric current in a metallic conductor and some of its electrophysical macro-phenomena	25
Kutkovetskyy V.J. The law of electromagnetic induction	<u>3</u> 4

# High Electric and Magnetic Field Engineering

<b>Baida E.I.</b> Calculations of electromagnetic forces acting on a thin ferromagnetic plate during magnetic-pulse treatment	40
Boyko M.I., Yevdoshenko L.S., Ivanov V.M., Koniaga S.F. Synthesis gas regeneration electrotechnology	
Bondarenko A.Yu., Finkelshtein V.B., Stepanov A.A. Experimental approbation of an electrodynamic direct	44
electric system for external automobile body repair.	50
<b>Gun'ko V.I., Dmitrishin A.Ya., Onishchenko L.I., Perekupka I.A., Toporov S.O.</b> Creation of high-voltage pulse capacitors on the basis of a composite film dielectric	53
Chaplygin E.A., Barbashova M.V., Sabokar O.S. Experimental approbation of sheet metal magnetic permeability measurement systems	56

### Power Stations, Grids and Systems

Bederak Ya.S. An exponential smoothing method application to restoring lost data on electric power	
technical record-keeping in industrial enterprises	61
Koliushko G.M., Koliushko D.G., Rudenko S.S. On the problem of increasing computation accuracy for rated	
parameters of active electrical installation ground grids.	65
Nizhevskyi I.V., Nizhevskyi V.I., Shishigin S.L. Research on electric potentials alignment on the ground surface	
within the grounding conductor territory.	71

### ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!

Науково-практичний журнал "Електротехніка і Електромеханіка" — передплатне видання. Звертаємо вашу увагу, що починаючи з 2006 року журнал виходить шість разів на рік. Вартість передплати на 2014 рік — 173,10 грн., на два місяці — 28,85 грн., на чотири місяці — 57,70 грн., на шість місяців — 86,55 грн., на вісім місяців — 115,40 грн., на десять місяців — 144,25 грн. Передплатний індекс: 01216.

### ШАНОВНІ АВТОРИ ЖУРНАЛУ!

Постановою президії ВАК України від 15 січня 2003 р. № 1-08/5 науково-практичний журнал "Електротехніка і Електромеханіка" внесено до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук та перереєстровано постановою президії ВАК України від 10 лютого 2010 р. № 1–05/1. Журнал зареєстровано як фаховий з № 1 2002 року.

Починаючи з 2005 року згідно з договором між редакцією журналу "Електротехніка і Електромеханіка" та Всеросійським інститутом наукової та технічної інформації Російської академії наук (ВИНИТИ РАН), інформація про статті з журналу за відбором експертів ВИНИТИ розміщується у Реферативному журналі (РЖ) та Базах даних (БД) ВИНИТИ.

Починаючи з №1 за 2006 р. згідно з Наказом МОН України №688 від 01.12.2005 р. журнал надсилається до УкрІНТЕІ.

Електронна копія журналу "Електротехніка і Електромеханіка", зареєстрованому у Міжнародній системі реєстрації періодичних видань під стандартизованим кодом ISSN 2074-272X, надсилається до Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського і, починаючи з 2005 р., представлена на сайті бібліотеки (nbuv.mon.gov.ua) в розділі "Наукова періодика України", а також на офіційному сайті журналу (eie.khpi.edu.ua).

Журнал "Електротехніка і Електромеханіка" включений у довідник періодичних видань Ulrich's Periodical Directory (ulrichsweb.serialssolutions.com), у всесвітній федеративний бібліотечний каталог OCLC WorldCat за  $N^{0}$  851561709 (worldcat.org), індексується у наукометричних базах Index Copernicus (indexcopernicus.com), Российский Индекс Научного Цитирования – РИНЦ (elibrary.ru), Google Scholar (scholar.google.com) та входить до баз даних DOAJ (www.doaj.org), BASE (basesearch.net), Scientific Indexing Services (sindexs.org), CiteFactor (citefactor.org), DRIVER (www.driverrepository.eu), CyberLeninka (cyberleninka.ru), UIF (uifactor.org), OAJI (oaji.net), DRJI (drji.org), PBN (pbn.nauka.gov.pl), Research Bible (journalseeker.researchbib.com).



Звертаємо увагу авторів на необхідність оформлення рукописів статей відповідно до Вимог, які наведені на офіційному сайті журналу (eie.khpi.edu.ua), розміщеному на платформі "Наукова періодика України" (journals.uran.ua). Статті, оформлені згідно з Вимогами, будуть публікуватися у першу чергу. УДК 621.3:537.311:910.4

М.И. Баранов

### АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 21: ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И РОБОТОТЕХНИКА

Наведено короткий нарис з всесвітньої історії винаходу роботів різного призначення і розвитку сучасної робототехніки.

Приведен краткий очерк из всемирной истории изобретения роботов различного назначения и развития современной робототехники.

#### ВВЕДЕНИЕ

В исследовании процессов обратной связи той или иной системы (того или иного объекта) и окружающей среды и заключаются методы кибернетики - науки об общих закономерностях процессов управления и передачи информации в разных системах, включающих машины, живые организмы и общество (социум) [1]. В [2] автором были описаны вкратце основные этапы зарождения в мире и достижения кибернетики, ставшей основой для появления такого нового научно-технического направления как робототехника. Оказывается, что еще древнегреческий мыслитель Платон пользовался термином "кибернетика" в исследованиях самоуправления человеческого общества [1]. В 1834 году великий французский физик Андре Мари Ампер (рис. 1) использовал понятие "cybernétique" в современном значении этого слова для обозначения науки управления в разработанной им системе классификации человеческих знаний [1].



Рис. 1. Великий французский ученый-физик Андре Мари Ампер (1775-1836 гг.), использовавший науку кибернетику в разработанной им классификации научных знаний [1]

Прежде чем рассматривать нам такое направление человеческой деятельности как робототехнику и наиболее значимые достижения в ней остановимся на некоторых особенностях становления кибернетики в бывшем СССР. Развитие кибернетики в СССР было начато в 1940-х годах [3]. 29 июня 1948 года вышло Постановление Совета Министров СССР № 2369 "Об организации Института точной механики и вычислительной техники АН СССР" [2]. Укажем, что в советских вузах в период 1940-1950-х годов кибернетика преподавалась как учебный курс "Теория автоматического управления". Тогда же в средствах массовой информации активно муссировалось определение кибернетики как "буржуазной реакционной лженауки" [3]. Хотя одновременно при этом, необходимость развития отечественной вычислительной техники критиками кибернетики не отрицалась. В 1956 году в СССР была опубликована научная монография известного российского ученого-электронщика А.И. Китова "Электронные цифровые машины", послужившая определенным информационным толчком к популяризации данного научного направления в широких кругах специалистов из различных областей науки и техники. В свое время "главный кибернетик" нашей страны, академик АН СССР Виктор Михайлович Глушков (1923-1982 гг.) подчеркивал, что своё первое знакомство с компьютерами он осуществлял именно по указанной выше книге А.И. Китова [3, 4]. В 1960-е годы А.И. Китов, служивший в Вооруженных силах СССР, пытался убедить руководство советской страны в создании общегосударственной компьютерной сети (Единой государственной сети вычислительных центров) для управления народным хозяйством и одновременно для решения военных задач оборонного характера. Эти его мотивированные попытки, подкрепленные необходимыми техникоэкономическими расчетами и разработанной документацией, оказались безуспешными. Мало того, за свою настойчивость в продвижении этого важного стратегического вопроса он был исключен из партии и уволен из рядов Вооруженных сил СССР [3]. Вот такой бывает благодарность зашоренных политических деятелей за активную постановку перед ними актуальных научно-технических задач общегосударственного значения. В ноябре 1962 года перед академиком АН СССР В.М. Глушковым и его Институтом точной механики и вычислительной техники АН СССР была поставлена задача по созданию Общегосударственной автоматизированной системы управления (ОГАСУ) советской экономикой [3]. Главными задачами ОГАСУ являлись сбор и обработка экономической информации со всех предприятий на территории СССР. Здесь следует напомнить читателю, что на Западе первая компьютерная сеть заработала лишь в 1965 году [3]. К середине 1964 года в рамках ОГАСУ был разработан эскизный проект "Единой государственной сети вычислительных центров" (проект В.М. Глушкова в отличие от проекта А.И. Китова рассматривал только гражданское хозяйство), который включал в себя 100 центров в крупных промышленных городах и экономических центрах страны, объединенных широкополосными каналами связи [3]. При этом научный руководитель данного проекта академик АН СССР В.М. Глушков считал, что его практическая реализация затянется на три-четыре пятилетки, а стоимость такой компьютерной сети для госбюджета составит больше стоимостей Атомного (создание атомной бомбы [5]) и Космического (запуск человека в космос [6]) проектов СССР вместе взятых. В 1965 году указанный проект В.М. Глушкова, направленный на создание в нашей стране огромной сети вычислительных центров, был отклонен правительством СССР, так как он был сочтён слишком дорогим. Отметим, что в дальнейшем в СССР были реализованы менее масштабные, чем ОГАСУ системы управления. Например, автоматическая система управления предприятиями (АСУП), автоматическая система управления технологическими процессами (АСУТП) и информационные системы банков [3]. В течение последних 30 лет кибернетика в соответствии с [1] прошла через свои взлёты и падения. Со временем она становилась всё более значимой в области изучения искусственного интеллекта и машинных интерфейсов, включая роботов (киборгов). Кстати, указанный нами выше термин "интерфейс" происходит от английского слова "interface" - "механическое или программное средство, обеспечивающее связь программ внутри компьютера или диалог между компьютером и человеком (пользователем)" [7]. Что касается понятия "робот", то оно получило свое название от чешского слова "robot" - "техническое устройство с антропоморфным (человекоподобным) действием, которое частично или полностью заменяет человека при выполнении однотипных работ в трудных и опасных для жизни условиях" [7-9].

### 1. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

Высокий уровень абстракции при рассмотрении кибернетических систем, служащих базовым понятием в классической кибернетике, позволяет находить с ее (этой науки) помощью общие методы подхода к изучению систем качественно различной природы (например, технических, биологических и даже социальных). Заметим, что абстрактная кибернетическая система представляет собой множество взаимосвязанных объектов, называемых элементами системы, которые способны воспринимать, запоминать и перерабатывать информацию, а также обмениваться этой информацией. Наглядными примерами кибернетических систем могут служить различного рода автоматические регуляторы в технике (например, автопилот самолета или автоматический регулятор, обеспечивающий поддержание постоянной температуры в помещении), электронные вычислительные машины (ЭВМ), человеческий мозг, биологические популяции и человеческое общество [8]. К кибернетическим системам относятся и создаваемые человеком технические системы (сложные устройства) с искусственным интеллектом, способные моделировать некоторые стороны интеллектуальной деятельности человека. Заметим, что термин "интеллект" происходит от латинского слова "intellectus" - "ум", обозначающего "разумную мыслительную способность того или иного физического объекта" [7, 10]. Искусственный интеллект (artificial intelligence) - это наука и технология создания интеллектуальных машин, особенно интеллектуальных компьютерных программ [10]. Она (эта наука и технология) связана со сходной задачей использования компьютеров (ЭВМ) для понимания человеческого интеллекта. При этом она не ограничивается правдоподобными биологическими методами. Учитывая возникшие трудности при определении, прежде всего, математиками-программистами вычислительных процедур интеллектуальными, в настоящее время под искусственным интеллектом в пределах рассматриваемой науки и технологии понимается только вычислительная составляющая способности достигать целей в окружающем мире [10]. Для объективности заметим, что сейчас в науке существует и такая точка зрения, согласно которой интеллект может быть только биологическим феноменом [10]. История искусственного интеллекта как нового научного направления начинается с середины 20-го века. Именно с того времени, когда [10]: а) нейрофизиологи и психологи разработали ряд теорий относительно работы человеческого мозга и процесса мышления; б) математики стали задаваться вопросами оптимальных расчётов и представления научных знаний о мире в формализованном виде; в) зародился фундамент математической теории вычислений - теории алгоритмов; г) были созданы первые компьютеры. В 1950 году один из пионеров в области вычислительной техники, известный английский учёный Алан Тьюринг, опубликовал свою популярную статью "Может ли машина мыслить?" [10]. В ней он описал эмпирическую процедуру, с помощью которой можно было определить момент, когда вычислительная машина (компьютер) сравнивается в плане разумности с человеком. У специалистов эта интеллектуальная процедура получила название "теста Тьюринга" (рис. 2).



Рис. 2. Схематическое изображение "теста Тьюринга" [10]

Стандартная интерпретация этого теста может быть охарактеризована следующим образом [10]: "Человек взаимодействует с одним компьютером и одним человеком. Участники теста не видят друг друга. На основании ответов на вопросы тестируемый человек должен определить, с кем он разговаривает: с человеком или компьютерной программой. Задача компьютерной программы – ввести тестируемого человека в заблуждение, заставив сделать им неверный выбор". Согласно "тесту Тьюринга" вычислительная машина станет разумной тогда, когда будет способна поддерживать с обычным человеком разговор, при котором тот не сможет понять, что говорит с машиной. Проблематика машинного обучения касается процесса самостоятельного получения знаний интеллектуальной технической системой в процессе её работы. Это направление в искусственном интеллекте является центральным с самого начала его развития. В настоящее время в рамках искусственного интеллекта ставятся и решаются задачи аппаратного или программного моделирования тех видов человеческой деятельности, которые традиционно считаются интеллектуальными. При этом в основе разумных машин находятся интеллектуальные системы, способные выполнять творческие функции, которые традиционно считаются прерогативой человека. Отметим, что интеллектуальная система - это техническая или программная система, умеющая решать задачи, традиционно считающиеся творческими и принадлежащие конкретным предметным областям, знания о которых хранятся в машинной памяти такой системы. Каждая интеллектуальная система машины включает в себя три основных блока - базу знаний, решатель и интеллектуальный интерфейс [10]. В СССР до 1970-х годов все исследования по искусственному интеллекту проводились в рамках кибернетики. Считается, что с конца этого временного периода на свет появилась новая наука - информатика, подчинившая себе целиком ее прародительницу - кибернетику. Именно тогда искусственный интеллект и стал одним из разделов информатики. В заключение укажем, что наука под названием "Искусственный интеллект" входит в комплекс компьютерных наук, а создаваемые на её основе технологии к информационным технологиям. Основной задачей этой науки является воссоздание с помощью вычислительных систем и иных искусственных устройств разумных рассуждений и действий.

#### 2. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РОБОТОТЕХНИКИ

Искусственный интеллект тесно связан с робототехникой, являющейся прикладной наукой, занимающейся разработкой автоматизированных технических систем [9]. Она опирается на такие дисциплины как кибернетика (информатика), электроника, механика и программирование. В настоящее время выделяют строительную, промышленную, бытовую, специальную или экстремальную (военную, космическую и подводную) робототехнику [9]. Несмотря на то, что многие столетия тому назад люди не знали указанных нами выше научных дисциплин, история робототехники своими разработками исчисляется не одним тысячелетием. Например, Архиту Тарентскому приписывают создание механического голубя еще в 400 году до н. э. [9]. Известно, что первый чертёж человекоподобного робота сделал еще великий итальянский мыслитель-изобретатель и художник Леонардо да Винчи (1452-1519 гг.) [11]. Он в 1495 году представил детальный макет механического рыцаря, способного сидеть, двигать руками и головой, а также поднимать свое забрало. В 1738 году французский механик-изобретатель Жак де Вокансон создал первое работающее человекоподобное устройство, которое играло на флейте [11]. В 1896 году великий хорватоамериканский электротехник-изобретатель Никола Тесла (1856-1943 гг.) разработал конструкцию и продемонстрировал работу удаленного от береговой зоны до 25 морских миль радиоуправляемого судна. Этими работами он заложил основы такого нового научнотехнического направления как радиотелемеханика [12]. В 1933 году в Великобритании был разработан первый беспилотный радиоуправляемый летательный аппарат многократного использования "Queen Bee" [9]. В СССР в 1940 году был создан первый телеуправляемый боевой танк типа TT-26. В ходе участия этих танков в боевых действиях на советско-финском фронте была обнаружена их неустойчивость к электромагнитным помехам, создаваемым высоковольтными линиями электропередачи [13]. Английский изобретатель У.Г. Уолтер был одним из первых, кто разработал и построил в 20-ом веке автономные роботы в помощь ученым по исследованию поведения животных [1]. На рис. 3 показаны боевые немецкие роботы-мины на гусеничном ходу, применявшиеся сухопутными подразделениями в ходе военных действий на полях сражений Второй мировой войны [9, 13].



Рис. 3. Британские военные у немецких самоходных мин "Голиаф" периода Второй мировой войны (1945 год) [9, 13]

Управляемые по электропроводным линиям немецкие роботы-мины "Голиаф" имели малую скорость (до 9,5 км/ч) и слабую броню (толщиной до 10 мм) [13]. Поэтому они не нашли широкого применения. "Холодная война" внесла новый виток в развитие боевых машин-роботов. У противоборствующих сторон появились интеллектуальные роботы, способные анализировать, видеть, слышать, чувствовать, различать некоторые химические вещества и автономно производить радиационно-химические анализы воздуха, воды и почвы. В 1948 году в США был создан разведывательный беспилотный летательный аппарат АОМ-34 [13]. В 1959 году в советском конструкторском бюро им. Лавочкина был разработан беспилотный самолёт-разведчик Ла-17Р [13]. В 1970-е годы в ходе Вьетнамской войны военно-воздушные силы США активно использовали беспилотные летательные аппараты "Файрби" и "Лайтнинг Баг". В марте 1971 года военно-промышленная комиссия при Совете Министров СССР приняла решение о развитии беспилотного самолётостроения [13]. В 1979 году в Московском техническом училище (ныне университете) им. Н.Э. Баумана был создан аппарат для обезвреживания взрывоопасных предметов - сверхлёгкий мобильный робот МРК-01 [13]. В 1996 году в России прошли испытания принципиально нового боевого танка, способного полностью работать в автономном режиме без экипажа на борту [13]. В 2000 году в России (Чечня) был успешно применён робот-разведчик "Вася" для обнаружения и обезвреживания радиоактивных веществ [13]. В 2005 году военно-морской флот России в Балтийском море успешно провел испытания подводного робота-разведчика "Гном" [13]. В 2007 году специалисты МВД России успешно провели в г. Перми натурные испытания тестового робота-милиционера Р-БОТ 001. В настоящее время многие страны мира увеличивают свои финансовые инвестиции в разработку новых технологий применительно к области робототехники. Так, по данным военного ведомства США – Пентагона на долгосрочную программу периода 2007-2013 годов по разработке подобных робототехнических устройств (рис. 4) до 2010 года было выделено уже 4 миллиарда долларов [13].



Рис. 4. Учебные испытания разрабатываемого США нового военного робота-транспортировщика BigDog (2010 год) [13]

На рис. 5 и 6 представлены высокотехнологические элементы приводов современных роботов [9, 11].



Рис. 5. Искусственная рука современного робота, мягко держащая своими механическими управляемыми пальцами обычную электрическую лампочку накаливания [9]

Данные рис. 5 и 6 свидетельствуют о значительном продвижении современной робототехники в создании механических приводов или "мышц" роботов. Самыми популярными двигателями в их приводах являются электрические, но применяются и движители, использующие химические вещества или сжатый воздух. В настоящий момент большинство роботов используют электродвигатели постоянного тока (например, шаговые двигатели и пьезодвигатели) [9, 13].



Рис. 6. Искусственная нога современного робота, работающая в управляемом режиме на воздушных "мышцах" [9]

Укажем, что в настоящее время классифицируют следующие основные типы роботов [9]: а) андроиды; б) промышленные роботы; в) боевые роботы; г) бытовые роботы. На кратком описании свойств, технических возможностей и областей применения данных типов роботов мы и остановимся в дальнейшем.

#### 3. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА

Андроиды – это человекоподобные роботы [10, 11]. С понятием андроида соприкасается значение термина "киборг", переводящееся как "кибернетический организм". На рис. 7 приведен внешний вид современного андроида ASIMO, созданного корпорацией Хонда (Центр фундаментальных технических исследований Вако, Япония) [11]. На рис. 8 показан робот "Актороид" [11], продемонстрированный публике японскими специалистами на международной выставке World Ехро, проходившей в 2007 году в Японии.



Рис. 7. Современный интеллектуальный гуманоидный робот ASIMO японской корпорации Honda (2009 год) [10, 11]



Рис. 8. Современный робот-гиноид "Актороид", продемонстрированный японскими специалистами на международной выставке Ехро-2007 (разработчики – ученые Осакского университета и инженеры фирмы Kokoro) [10, 11]

Аналогично "Актороиду" робот-девушка Repliee Q2 мог исполнять роль телевизионного интервьюера, взаимодействуя при этом с людьми. В этом роботе были установлены всенаправленные телекамеры, микрофоны и датчики, которые позволяли Repliee Q2 без особых трудностей определять человеческую речь и жестикуляцию [11]. Одним из самых продвинутых современных андроидов является робот Ибн Сина (2010 год), названный в честь знаменитого древнего арабского философа и врача Ибн Сины. Говорящий на арабском языке робот Ибн Сина способен самостоятельно найти свое место в самолете и обшаться с людьми [11]. Он распознает выражение лица говорящего человека и прибегает в соответствующей ситуации к мимике. Его губы двигаются еще монотонно. Отмечается, что весьма хорошо у него получается поднимать брови и прищуривать глаза. Современные интеллектуальные роботы способны к разумным действиям и участию в простейших играх (рис. 9) [10].



Рис. 9. Современные интеллектуальные роботы, участвующие на игровом поле в машинном состязании [10]

Приведенные в этом разделе шагающие роботы, содержащие внутри себя бортовой *миникомпьютер*, способны к перемещению на двух ногах и самостоятельному преодолению незначительных препятствий (например, подъема или спуска по лестнице). Следует заметить, что для этого ученым и инженерам пришлось решить сложную задачу динамики их движения. Перемещение по пересечённой местности для данных роботов является пока нерешенной задачей. Применяются сейчас интеллектуальные роботы в основном для решения разных исследовательских задач.

#### 4. ПРОМЫШЛЕННАЯ РОБОТОТЕХНИКА

Промышленные роботы – это автоматические программно-управляемые системы, предназначенные для работы во многих технологических процессах и позволяющие создавать безлюдные технологии [7, 9]. На рис. 10 приведен внешний вид промышленных роботов FANUC модели R2000iB, встроенных в состав заводской технологической линии [14]. В составе каждого промышленного робота есть механическая часть и система управления данной частью, получающая сигналы от его программной части. Механическая часть этого типа роботов делится на манипуляционную систему и систему передвижения [15].



Рис. 10. Промышленные роботы FANUC модели R2000iB, работающие в составе технологической линии [14]

Данные роботы базируются на механических манипуляторах и системах программирования, содержащих числовое программное управление. Это управление может быть программным или адаптивным. При программном управлении в таких роботах отсутствует сенсорная часть, а все их действия жёстко фиксированы и регулярно повторяются. Для программирования таких роботов могут применяться среды программирования VxWorks/Eclipse или такие языки программирования как Forth, Оберон, Компонентный Паскаль, Си [15]. В качестве аппаратного обеспечения обычно используются промышленные компьютеры в мобильном исполнении типа PC/104 и реже MicroPC. Могут применяться и персональные компьютеры или программируемые логические контроллеры [14]. При адаптивном управлении роботы оснащены сенсорной частью. Сигналы, передаваемые их датчиками, анализируются в этой части и в зависимости от получаемых результатов принимается решение о дальнейших действиях робота или его перехода к следующей стадии действий. Промышленных роботы, являющиеся программируемыми манипуляторами, используются для выполнения разнообразных технологических операций. Среди наиболее распространённых действий, совершаемых промышленными роботами, можно назвать следующие [14]: 1) загрузка или разгрузка технологических машин, деталей и станков; 2) манипулирование деталями (например, укладка, сортировка, транспортировка и ориентация); 3) перемещение деталей и заготовок от станка к станку или от станка к транспортно-контейнерным системам; 4) выполнение сварных швов и точечная сварка; 5) сборка механических и электрических деталей; 6) сборка электронных деталей; 7) покраска деталей; 8) укладка кабелей и проводов; 9) выполнение на станках операций резания материалов с движением рабочего инструмента-резца по сложной траектории. Поэтому можно заключить, что практическое использование промышленных роботов позволяет облегчить или вовсе заменить человеческий труд на производстве, в строительстве, при различной рутинной работе, при работе с тяжёлыми грузами и вредными материалами, а также в других тяжёлых или небезопасных для человека условиях.

### 5. СПЕЦИАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА

Боевые (военные) роботы – это автоматические устройства, заменяющие человека в боевых ситуациях для сохранения человеческой жизни или для работы в условиях, несовместимых с возможностями человека в военных целях (разведка, боевые действия, разминирование и др.) [13]. Боевыми роботами являются не только автоматические устройства с антропоморфным действием, которые частично или полностью заменяют человека, но и действующие в воздушной и водной средах, не являющихся непосредственной средой обитания человека (например, авиационные беспилотные с дистанционным управлением, подводные аппараты и надводные корабли). В настоящее время большинство боевых роботов являются устройствами телеприсутствия. Лишь немногие модели подобных роботов имеют возможность выполнять некоторые специальные задачи автономно без вмешательства человека-оператора. Этот тип роботов может быть электромеханическим, пневматическим, гидравлическим или комбинированным. Они могут быть воздушного, сухопутного и морского (надводного и подводного) назначения. На рис. 11 приведен российский беспилотный летательный аппарат Ту-143 "Рейс" [13].



Рис. 11. Современный российский беспилотный радиоуправляемый летательный аппарат Ту-143 "Рейс" [13]

На рис. 12 показана американская специальная боевая система наблюдения и разведки Swords [13].



Рис. 12. Военный американский робот Swords на гусеничном ходу, являющийся боевой системой наблюдения и разведки сухопутных подразделений спецназначения [13]

На рис. 13 изображен американский мобильный робот для обезвреживания мин [13]. Известны и современные российские мобильные робототехнические комплексы МРК-27Х, МРК-25 "Кузнечик", МРК-25УТ, МРК-25М, МРК-46, МРК "ЧХВ-2" и "Мобот-Ч-ХВ" (разработчик – Специальное конструкторскотехнологическое бюро "Прикладной робототехники" Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана) [13]. Робот "Мобот-Ч-ХВ" может работать в условиях повышенной радиации [9].



Рис. 13. Военный американский робот Mark V-A1 на колесном ходу для обезвреживания мин различного типа (разработчик – фирма Northrop Grumman Corporation, США) [13]

Укажем здесь и российский мобильный робототехнический комплекс легкого класса для обезвреживания взрывоопасных предметов (разработчик – Российский научный центр "Курчатовский институт", г. Москва) [13]. Сейчас существует ряд внедренных разработок в области создания водных боевых роботов. Основными задачами роботов подобного типа являются автоматическое патрулирование, разведка, охрана береговой линии и портов, поиск и уничтожение мин. Наиболее известными подводными роботами, разработанными для военных целей, являются "*Transphibian*" (этот необитаемый подводный аппарат предназначен для поиска мин, охраны портов и осуществления автоматизированного надзора), "*Гном*" (телеуправляемый малогабаритный подводный аппарат для проведения поисково-спасательных работ в море) и "*REMUS*" (радиоуправляемый с надводного корабля робот-лодка, работающий на морской глубине до 100 м) [13]. К рассматриваемому классу роботов относится и советский робот космического назначения — "Луноход-1" (рис. 14), успешно проработавший в 1970-х годах на поверхности спутника Земли – Луны [16].



Рис. 14. Внешний вид космического робота с движителем колесного типа для перемещения по твердой поверхности планет нашей Вселенной – советского "Лунохода-1" [13]

### 6. БЫТОВАЯ РОБОТОТЕХНИКА

Бытовые роботы – это роботы, предназначенные для помощи человеку в его повседневной жизни [17]. Несмотря на незначительное распространение сейчас бытовых роботов, специалисты-футурологи предполагают их широкое распространение в обозримом будущем. В 2006 году известный американский компьютерщик и бизнесмен Билл Гейтс опубликовал свою статью "Робот в каждом доме", в которой указывал на значительный потенциал этого типа роботов для социума. Все бытовые роботы подразделяются на социальные роботы, роботы-игрушки и роботыпомощники. В сентябре 2005 года в свободную продажу впервые поступили первые человекообразные роботы "Вакамару" производства японской фирмы Mitsubishi [17]. Эти роботы (стоимость - 15 тысяч долларов) были способны узнавать человеческие лица, понимать некоторые фразы на японском языке, давать справки, выполнять ряд секретарских функций и следить за помещением. Известен и социальный робот российской разработки - R.Bot 100, предполагаемый для использования в ближайшем будущем в социально значимых учреждениях [17]. На рис. 15 приведен внешний вид мобильного социального робота, словесно общающегося с девочкой. В настоящее время эти роботы способны самостоятельно перемещаться в помещении и возвращаться по мере необходимости на зарядную станцию для своей подзарядки.

Одним из первых примеров удачной массовой промышленной реализации роботов-игрушек стала собачка AIBO (рис. 16) известной японской корпорации Sony [9, 17]. Английской компанией WowWee выпускаются сейчас и такие роботы-игрушки как шагающий робот Robosapien и робот-динозавр Pleo [17].



Рис. 15. Мобильный бытовой робот, перемещающийся по полу и словесно общающийся с любопытной девочкой [17]





В настоящее время в массовую культуру людей удачно вошли бытовые роботы-пылесосы, имеющие элементную базу для подзарядки своих *аккумуляторов*. На рис. 17 показан один из типов таких роботов-помощников [9]. Следует указать, что сейчас в мире уже разработаны технологии, позволяющие роботам-помощникам самостоятельно осуществлять свою электрическую подзарядку, находя при этом в помещении стационарную зарядную станцию и подсоединяясь к ней. Отметим, что в настоящий момент во многих лабораториях мира проходят испытания различных систем, обеспечивающих бесконтактную подзарядку пока в помещениях аккумуляторов роботов-помощников (например, направленным мощным инфракрасным лазером или индукционным путем) [17].



Рис. 17. Серийно выпускающийся робот-пылесос Roomba (производитель – фирма iRobot Corporation, 2005 год) [17]

Шаробот (Ballbot) – это подвижный робот, использующий для своего передвижения единственное сферическое колесо-шар и постоянно самобалансирующий на нём как в движении, так и в покое [18]. На рис. 18 представлен внешний вид такого вида бытового робота. Благодаря единственной точке контакта своего шарообразного колеса с твердой поверхностью, шаробот одинаково легко передвигается во всех направлениях. Он является чрезвычайно подвижным, манёвренным и естественным в движениях роботом в сравнении с обычным наземным транспортом [18].



Рис. 18. Шаробот Rezero, устойчиво балансирующий и перемещающийся по твердой плоской поверхности (полу) [18]

Проектирование надёжных в работе роботов с узкой колёсной базой на примере шаробота, обладающего улучшенной манёвренностью в ограниченных, переполненных и динамичных средах (например, в узких коридорах и заполненных передвигающимися людьми помещениях), стало возможным благодаря теоретическим наработкам ученых в области теории динамической стабильности и теории управления. Шаробот Rezero (см. рис. 18), разработчиком которого является Швейцарская высшая техническая школа, содержит колесо-шар, три электромотора, приводящие в движение три балансировочные колеса и основной корпус, в котором размещены микропроцессор, блок инерциальных измерений, блок питания и аккумуляторная батарея. Шароботы изначально неустойчивы и используют исполнительные устройства для поддержания себя в равновесии. Это приводит к небольшим, но постоянным смещениям шаробота по неподвижному твердому основанию. Данное неустойчивое, но стабильное состояние, называемое динамической стабильностью, на практике является намного более устойчивым к внешним динамическим воздействиям (например, боковым толчкам) состоянием, чем статическая стабильность [18]. Именно динамическая стабильность шароботов позволяет использовать их в условиях большого количества внешних толчкообразных помех. Наглядными примерами подобных условий являются корабли и поезда, а также помещения с большими скоплениями людей (например, вокзалы, музеи и другие общественные учреждения). Всенаправленность шаробота и его способность к быстрому изменению направления своего движения позволяет ему быстро двигаться в помещениях коридорного типа. Высокое расположение в нем центра тяжести позволяет удобно располагать его органы управления и интерфейс пользователя. На данный момент времени, по мнению специалистов-робототехников, наиболее привлекательным видится использование шароботов для информирования людей в общественных учреждениях, а также в качестве ежедневного бытового робота-помощника [18]. Необходимо заметить, что сейчас шароботы являются в области мировой робототехники объектом активных исследований и поэтому области их применения пока весьма ограничены.

Определенное распространение в мире получили четырех – и двухколесные роботы. В двухколёсных роботах для определения угла наклона корпуса робота и выработки управляющего напряжения для электроприводов робота с целью удержания его равновесия и выполнения на твердом покрытии пола (дороги) необходимых перемещений, как правило, используются гироскопы. К таким балансирующим двухколесным роботам относится *Сегвей*, приведенный на рис. 19.



Рис. 19. Современный двухколесный робот для перевозки человека по твердому покрытию дороги (Сегвей), экспонируемый в японском музее роботов (г. Нагои, Япония) [9, 10]

При разработке Сегвея японским робототехникам пришлось решить сложную задачу удержания равновесия двухколёсного робота, связанную с динамикой обратного маятника. На базе транспортной платформы Сегвея специалисты Национального агентства США по аэронавтике (НАСА) недавно создали робот "Робонавт", предназначенный для космических исследований [6, 9]. В настоящее время в области робототехники для перемещения по неровным поверхностям, траве и каменистой местности разрабатываются шестиколёсные роботы. Ещё большее сцепление с грунтом обеспечивают шасси гусеничного типа. Примерами подобных роботов могут служить разработанные американским НАСА робот Urban Robot и компанией iRobot роботы Warrior и PackBot [9, 17].

В области робототехники разрабатываются и змееподобные роботы (рис. 20), выполняющие в быту роль игрушек и помощников спасателей при поиске людей, попавших под обломки рухнувших зданий [9].



Рис. 20. Внешний вид змееподобных роботов (левый робот оснащен 64-мя электроприводами, а правый – десятью) [9]

Разработаны также змееподобные роботы, способные перемещаться в воде. Примером таких конструкций роботов может служить японский робот АСМ-R5 [9]. Сейчас существует много разработок роботов, перемещающихся в воде и подражающих движениям рыб. Повышенная эффективность их перемещения в воде и отсутствие шума являются причиной высокого интереса исследователей к роботам, движущимся подобно рыбам. Примерами здесь являются такие роботы компании Festo как Aqua Ray (имитирует движение ската) и Aqua Jelly (имитирует движение медузы) [9]. Известны и роботы, перемещающиеся по вертикальным поверхностям (например, разработанный в Стэнфордском университете США робот Capuchin). Анализ представленного здесь материала показывает, что в совершенствовании методов управления современными роботами различных типов огромное значение имеет дальнейшее развитие в мире технической кибернетики и теории автоматического управления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. http://ru.wikipedia.org/wiki/Кибернетика.

2. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 20: Изобретение компьютера и информационной сети Интернет // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – №3. – С. 3-13.

3. http://ru.wikipedia.org/wiki/Кибернетика\_в\_СССР.

4. Основы кибернетики. Теория кибернетических систем / Под ред. проф. К.А. Пупкова. – М.: Высшая школа, 1976. – 408 с.

5. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 7: Создание ядерного и термоядерного оружия // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №2. – С. 3-15.

6. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 18: Ракетная техника и покорение ближнего космоса // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – №1. – С. 3-14.

 Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.

8. http://bse.sci-lib.com/article060914.html.

9. http://ru.wikipedia.org/wiki/Робототехника.

10. http://ru.wikipedia.org/wiki/Искусственный\_интеллект.

11. http://ru.wikipedia.org/wiki/Андроид.

12. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся

физики мира. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2008. – 252 с. 13. http://ru.wikipedia.org/wiki/Боевой \_робот.

14. http://ru.wikipedia.org/wiki/Промышленный робот.

15. Белянин П.Н. Промышленные роботы. – М.: Машиностроение, 1975. – 398 с.

16. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 19: Изучение и покорение дальнего космоса // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – №2. – С. 3-13.

17. http://ru.wikipedia.org/wiki/Бытовой\_робот.

18. http://ru.wikipedia.org/wiki/Шаробот.

**REFERENCES:** 1. Kibernetika (Cybernetics) Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Кибернетика (accessed 31 August 2012). 2. Baranov M.I. An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 20: Invention of computer and the Internet information network. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2014, no.3, pp. 3-13. 3. Kibernetika v SSSR (Cybernetics in USSR) Available at: <u>http://ru.wikipedia.org/wiki/Кибернетика в</u> CCCP (accessed 31 August 2012). 4. Osnovy kibernetiki. Teorija kiberneticheskih system. Pod red. prof. K.A. Pupkova [Foundations of cybernetics. Cybernetic systems theory. Under edit. prof. K.A. Pupkova]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1976. 408 p. 5. Baranov M.I. An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 7: Nuclear and thermonuclear weapon creation. Elektrotekhnika i elektromekhanika -Electrical engineering & electromechanics, 2012, no.2, pp. 3-15. 6. Baranov M.I. An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 18: Rocket engineering and near-space exploration. Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electrome-chanics, 2014, no.1, pp. 3-14. 7. Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. 8. Available at: http://bse.scilib.com/article060914.html (accessed 31 August 2012). 9. Robototehnika (Technique of robots) Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Робототехника (accessed 31 August 2012). 10. Iskusstvennyj intellekt (Artifical intelligence) Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Искусственный\_интеллект (accessed 31 August 2012). 11. Android (Android) Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Андроид (accessed 31 August 2012). 12. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 1: Elektrofizika i vydajushhiesja fiziki mira [Selected topics of electrophysics: Monographs in 2 vols. Vol.1: Electrophysics and outstanding physics of the world]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2008. 252 p. 13. **Boevoi** robot (Battle robot) Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Боевой робот (accessed 31 August 2012). (Industrial 14. Promvshlennvj robot robot) Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Промышленный робот (accessed 31 August 2012). 15. Beljanin P.N. Promyshlennye roboty [Industrial robots]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 398 p. 16. Baranov M.I. An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 19: Deep space study and exploration. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2014, no.2, pp. 3-13. 17. Bytovoj robot [Domestic robot] Available at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Бытовой робот (accessed 31 August 2012). [Ball robot] Available 18. Sharobot at: http://ru.wikipedia.org/wiki/Шаробот (accessed 31 August 2012).

Поступила (received) 31.08.2012

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с., НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ", 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47 тел/phone +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov

Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" 47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine

An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 21: Artificial intelligence and robotics. A brief essay on the history of invention of various-application robots and development of state-of-the-art robotics is given.

*Key words* – history, artificial intelligence, invention of robots.

УДК 621.313

В.И. Милых, Н.В. Полякова

### ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УКОРОЧЕНИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

На основе численных расчетов вращающегося магнитного поля проведена оценка турбогенератора в случаях укороченной и диаметральной обмотки статора. Сравниваемыми параметрами являются форма и гармонический состав ЭДС этой обмотки, переменная составляющая магнитного поля на поверхности ротора, пульсации электромагнитного момента.

На основі чисельних розрахунків магнітного поля, що обертається, проведена оцінка турбогенератора у випадках укороченої і діаметральної обмотки статора. Порівнюваними параметрами є форма і гармонійний склад ЕРС цієї обмотки, змінна складова магнітного поля на поверхні ротора, пульсації електромагнітного моменту.

Введение. В электрических машинах (ЭМ) переменного тока эффективным средством улучшения формы координатной функции МДС и временной функции ЭДС обмотки статора является ее распределение и укорочение [1]. Классически оценка качества разных схем обмоток проводится на основе гармонического анализа указанных функций, построенного на ряде серьезных допущений, в том числе, на использовании ступенчатой функции распределения МДС в зазоре. Однако, как показано в [2], традиционный способ гармонического анализа в ЭМ не дает адекватных числовых результатов - это проверено на основе численно-полевых расчетов вращающихся магнитных полей (МП). Последнее позволяет оценить и другие сопутствующие явления, которые влияют на качество работы ЭМ и изменяются с изменением схемы обмотки. Это особенно важно для таких ответственных ЭМ, как крупные турбогенераторы (ТГ), и становится актуальным в связи с попытками отказаться от укорочения трехфазной обмотки статора по соображениям технологии и электробезопасности.

Цель работы. Данная работа посвящена оценке эффективности укорочения обмотки статора мощного турбогенератора на основе численно-полевых расчетов вращающихся магнитных полей. Это проводится посредством временных функций ЭДС обмотки статора, переменной составляющей магнитного поля (ПСМП) на поверхности вращающегося ротора и пульсаций электромагнитного момента (ЭММ).

С развитием численных методов расчета МП [3, 4] проблема достаточно точного определения указанных величин становится в значительной мере решенной, т.к. при этом уже нет ограничений на учет реальных конструктивных форм машин в целом и их элементов, на учет насыщения магнитопровода.

Объект исследования. Демонстрация расчетных результатов проводится на трехфазном ТГ [5], сравниваемые варианты электромагнитной системы которого даны на рис. 1. Он имеет номинальные: мощность  $P_N$ =340 MBT; фазные напряжение  $U_{sN}$ =11547 В и ток  $I_{sN}$ =11547 А; коэффициент мощности  $\cos\varphi_{sN}$ = 0,85; частоту  $f_s$ =50 Гц. Его число пар полюсов p=1; активная длина  $I_a$ =5,308 м; немагнитный зазор – 77,5 мм; радиус ротора – 0,56 м; числа витков его фазной обмотки – 10, обмотки ротора – 126. Сравниваемые расчетные модели отличаются обмоткой

статора: на рис. 1,а она имеет относительное укорочение  $\beta_s=0,8$  (вариант ТГ-1), на рис. 1,б – выполнена диаметральной, т.е.  $\beta_s=1$  (вариант ТГ-2).



Рис. 1. Расчетные модели турбогенератора

На рис. 1 фазные зоны обмотки статора A-A', B-B' и C-C' выделены разным затемнением. Направления координат (r,  $\alpha$ ) полярной системы, угловой скорости ротора и магнитных полей  $\Omega$ , токов в обмотках определяются по системе, введенной в [6]. Здесь направления токов соответствуют режиму нагрузки в начальный момент времени t, с которого рассматриваются искомые и представляемые далее временные функции. Теоретические основы расчета электромагнитных величин. Значения заявленных величин ЭДС, ПСМП и ЭММ получаются на основе расчета МП ТГ, а их временные функции – многопозиционными такими расчетами МП [2, 4, 7] для задаваемого с шагом  $\Delta t$  временного ряда

$$t_k = \Delta t \cdot (k-1); k=1, 2, ..., K,$$
 (1)

с вращением ротора посредством его установки в угловые позиции

$$\alpha_k = \Delta \alpha \ (k-1); \ k=1, 2, ..., K,$$
 (2)

и с синхронным вращением МП поля статора вычислением симметричной системы фазных токов в стержнях его обмотки в моменты времени  $t_k$  (1):

$$i_{A} = I_{m} \cos(\omega t_{k} + \beta); \quad i_{B} = I_{m} \cos(\omega t_{k} - \frac{2}{3}\pi + \beta);$$
$$i_{C} = I_{m} \cos(\omega t_{k} + \frac{2}{3}\pi + \beta), \quad (3)$$

где K – число позиций, позволяющее сформировать конкретные временные функции на их периоде изменения;  $\Delta \alpha = \Omega \cdot \Delta t$  – угловой шаг вращения ротора;  $\omega = 2\pi f_s$  – угловая частота;  $\Omega = \omega/p$  – угловая скорость;  $I_m = \sqrt{2}I_s$  – амплитуда и  $I_s$  – действующее значение фазного тока;  $\beta$  – угловое смещение оси, по которой действует МДС трехфазной обмотки статора, по отношению к продольной оси ротора d [6].

Электромагнитные процессы в ТГ рассматриваются в режиме номинальной нагрузки (HH) при фазных токах статора  $I_{sN}$ . Ток возбуждения  $I_f$ =3151,4 A и угол  $\beta$ =-160,47° получены методом из [8]. В базовом варианте ТГ (рис. 1,а) эти значения после расчета магнитного поля обеспечивают заданные номинальные напряжение и коэффициент мощности.

Для исследования электромагнитных процессов в активной части ТГ МП рассчитывалось в двухмерной постановке в его поперечном сечении (рис. 1). Поле описывается общеизвестным дифференциальным уравнением [3, 4] через векторный магнитный потенциал и рассчитывается численным методом конечных элементов с учетом насыщения магнитопровода по общедоступной программе FEMM [9]. Картины МП в режиме НН в исходный момент времени представлены на рис. 1 силовыми линиями.

Искомые временные функции разных величин на их периодах формировались в процессе вращения МП согласно (1) – (3), как это представлено в [2, 4, 7]. Все операции при работе программы FEMM выполнялись управляющей программой, написанной на алгоритмическом языке Lua [9].

В итоге временные функции электромагнитных величин представлялась дискретными числовыми массивами типа  $\Gamma(t_k)$ ; k=1,2,...,K, где пока использован некий абстрактный символ  $\Gamma$ .

Магнитное потокосцепление и ЭДС фазной обмотки статора. Как уже представлялось в [4], основой для ЭДС является временная функция магнитного потокосцепления (МПС) фазной обмотки статора. Для этого, в процессе уже объясненных здесь расчетов вращающегося МП (угол поворота ротора  $\Delta \alpha$  составлял 1°), была сформирована дискретная временная функция МПС  $\Psi_s(t_k)$ , k=1,2,...,K. Она имеет тот же период *T*, что и токи (3), и сформирована по числу точек *К*=360. Получение значений МПС после расчета МП не представляет труда и осуществляется посредством специальной опции, имеющейся в программе FEMM.

Функция  $\Psi_s(t_k)$  раскладывается аналогично [2, 4] по известным правилам в гармонический ряд из нечетных гармоник вплоть до номера  $N_g$ :

$$\Psi_s = \sum_{\nu=1,3,5...}^{N_g} \Psi_{m,\nu} \cos(\nu \,\omega t + \gamma_{\nu}), \qquad (4)$$

что позволяет, на основании закона электромагнитной индукции, перейти к ЭДС фазной обмотки:

$$e_s = -\frac{d\Psi_s}{dt} = \sum_{\nu=1,3,5...}^{N_g} \nu \omega \Psi_{m,\nu} \sin(\nu \,\omega t + \gamma_{\nu}), \qquad (5)$$

откуда получаются амплитуды гармоник  $E_{m,v} = v \omega \Psi_{m,v}$ .

На рис. 2 представлены найденные временные функции ЭДС (5) для двух вариантов ТГ, изображенных на рис. 1.



Рис. 2. Временные функции фазной ЭДС

Очевидно, что график ЭДС для варианта ТГ-1, благодаря укорочению обмотки, имеет более близкую к синусоиде форму. Это же подтверждает гармонический состав функции ЭДС (5), представленный в табл.1 для вариантов ТГ-1 и ТГ-2. Здесь максимум ЭДС  $E_{s max}$  и амплитуда первой гармоники  $E_{m,1}$  даны в абсолютном измерении, а амплитуды высших гармоник – в относительной форме  $E_{m,v,*} = E_{m,v}/E_{m,1}$ .

Таблица 1

Гармонический состав ЭДС обмотки статора					
	$E_{s max}$ , кВ	<i>Е</i> <sub><i>m</i>,1</sub> , кВ	$E_{m,3,*}$	$E_{m,5,*}$	
ТΓ-1	17,07	16,87	0,065	0,005	
ТΓ-2	17,48	17,03	0,105	0,036	
ТΓ-3	17,30	16,86	0,101	0,040	
	$E_{m,7,*}$	$E_{m,9,*}$	$E_{m,11,*}$	$d_{dist}$	
ТΓ-1	0,008	0,007	0,003	0,998	
ТΓ-2	0,033	0,007	0,005	0,993	
ТΓ-3	0,030	0,006	0,004	0,994	

0.70

Для ТГ-2 без укорочения обмотки статора форма кривой ЭДС и гармонический состав существенно хуже, так как повышается удельный вес высших гармоник (начиная с третьей и далее). Соответственно уменьшается и коэффициент искажения

$$d_{dist} = \frac{E_{m,1}}{\sqrt{\sum_{\nu=1}^{N_g} E_{m,\nu}^2}},$$
 (6)

который для "чистой" синусоиды равен единице.

Т.е. при диаметральной обмотке основная функция ТГ – генерирование электроэнергии, ухудшается. Известно [1], что в ТГ при соединении обмотки по схеме звезда в линейных напряжениях исчезают гармоники ЭДС, кратные трем. Насколько при этом изменится форма временных функций ЭДС, иллюстрирует рис. З. Визуально можно заметить, что форма кривых ЭДС по сравнению с рис. 2 несколько улучшилась для обоих вариантов ТГ. Причем для базового варианта с укорочением обмотки статора график ЭДС достаточно близок к синусоиде, а вот для варианта без укорочения график явно отличается от синусоиды.



Рис. 3. Временные функции фазной ЭДС без гармоник, кратных трем

Переменная составляющая магнитной индукции на поверхности вращающегося ротора. Эта величина интересует проектировщиков ТГ в связи с тем, что она приводит к вихревым токам, дополнительным потерям мощности и нагреву поверхностного слоя ротора [11]. ПСМИ зависит от структуры обмотки статора, поэтому она здесь и принята к анализу.

Конкретно, для точек, связанных с вращающимся ротором, в процессе уже объясненных здесь расчетов вращающегося МП, была сформирована дискретная временная функция радиальной составляющей магнитной индукции  $B_r(t_k)$ , k=1,2,...,K. В таких функциях присутствуют как постоянная, так и переменная составляющие.

Из полных значений *B<sub>r</sub>* выделяется ПСМИ и получается в виде числового массива соответствующая ее дискретная временная функция:

$$B_{rt}(t_k) = B_r(t_k) - B_{rav}; \ k=1,2,...,K,$$
(7)

где среднее полное значение МИ (постоянная составляющая) для конкретно рассматриваемой точки по-

верхности ротора: 
$$B_{rav} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} B_{r,k}$$

Графики функции ПСМИ для точки, находящейся посредине большого зуба ротора на расстоянии 4мм от его поверхности, даны для двух вариантов обмотки статора ТГ на рис. 4. Здесь также дан фрагмент рис. 1 в зоне большого зуба ротора – названная точка имеет обозначение т2. Период изменения временных функций ПСМИ, как показано в [10], составляет  $T_t=0,5 \cdot T/m_s$ , где  $m_s$  – число фаз обмотки статора.

Очевидно, что при отсутствии укорочения обмотки статора ПСМИ достигает существенно больших значений. Сопоставление значений ПСМИ дано также в табл. 2 для трех точек у поверхности большого зуба ротора, которые обозначены на рис. 4.

Для указанных точек даны средние значения магнитной индукции  $B_{rav}$  и максимумы ПСМИ  $B_{rt max}$ . Ясно, что  $B_{rt max}$  в ТГ без укорочения обмотки в 2,4 – 4,8 раза больше, чем при нормально укороченной обмотке, а потери мощности от соответствующих вихревых токов, как известно [1, 11], пропорциональны квадрату магнитной индукции, т.е. вывод очевиден.



Рис. 4. Временные функции ПСМИ на их двух периодах  $T_t$  в точке т2 на поверхности вращающегося ротора

Таблица 2

Магнитная индукция в точках на поверхности вращающегося ротора

Магнитная индукция	В <sub>гаν</sub> , Тл		гная В <sub>гау</sub> , Тл В <sub>rt max</sub> , мТл			
Точки	т1	т2	т3	т1	т2	т3
ΤΓ-1	1,57	0,93	1,05	30,6	46,1	40,1
ΤΓ-2	1,54	0,86	0,97	74,4	174,3	191,5
ΤΓ-3	1,54	0,88	1,02	76,8	174,1	185,4

Электромагнитный момент, действующий на ротор, и его пульсации. От структуры обмотки статора зависят пульсации ЭММ, которые могут вызывать шум и вибрации ТГ в процессе его работы.

Для определения ЭММ в программе FEMM [9] предусмотрена процедура, которая в кольцевом слое зазора формирует совокупность контуров, и ЭММ определяется через угловую составляющую тензора магнитного натяжения [12]  $f_{T\alpha} = \mu_0^{-1} (B_r \cdot B_\alpha)$ , Н/м<sup>2</sup>, как поверхностный интеграл по площади  $S_\delta$  поперечного сечения такого слоя, распространяющегося на аксиальную длину ТГ:

$$M_{em} = \frac{l_a}{(r_s - r_r)} \int_{S_{\delta}} r \cdot f_{T\alpha} \cdot dS =$$
  
=  $\frac{l_a}{\mu_0(r_s - r_r)} \int_{0}^{2\pi r_s} \int_{r_r} r \cdot B_r \cdot B_{\alpha} r \cdot dr \cdot d\alpha$ , (8)

где  $r_r$  и  $r_s$  – радиусы цилиндрических поверхностей, ограничивающие площадь  $S_\delta$  сечения зазора со сторон ротора и статора;  $\mu_0=4\cdot\pi\cdot10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $B_r$ ,  $B_\alpha$  – радиальная и угловая координатные составляющие магнитной индукции.

Расчеты, проведенные в заданные моменты времени (1), дали дискретную временную функцию ЭММ  $M_{em}(t_k)$ , k=1,2,...,K. В ТГ эта функция достаточно стабильна с определяющей ролью среднего значе-

ния 
$$M_{emav} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} M_{em,k}$$
, которое для сравниваемых

вариантов ТГ-1 и ТГ-2 дано в табл. 3.

Это значение проверено через электромагнитную мощность  $P_{em}=M_{em\ av}$ . Она составила 341 МВт для ТГ-1, что весьма близко к номинальной мощности рассматриваемого ТГ, и 364 МВт для ТГ-2. Повышение ЭММ и мощности на 6,7 % может быть положительным явлением, но оно отягощено пульсациями ЭММ – его переменной составляющей.

	Значения Э	ММ, кН∙м	
Модель ТГ	ΤΓ-1	ТΓ-2	ΤΓ <b>-</b> 3
M <sub>emav</sub>	1085	1158	1088
$dM_{em max}$	8,2	31,4	31,4
$dM_{em\ min}$	-8,0	-28,4	-27,9
$\Delta M_{em}$	16,2	59,8	58,3

Таблица 3

Временную функцию переменной составляющеей ЭММ выделили из функции  $M_{em}(t_k)$ :

$$dM_{em}(t_k) = M_{em}(t_k) - M_{emav}, \quad k=1,2,...,K, \quad (9)$$

которая имеет период повторения  $T_6$ , составляющий шестую часть от глобального периода T.

Число *К* для функции (9) на ее период  $T_6$  составило 60, ее несущая частота  $f_{s6} = 6_5 f_s$ .

График функции (9) дан на рис. 5 на протяжении шести периодов  $T_6$ .



Рис. 5. Переменная составляющая ЭММ

В табл. 3 для переменной составляющей ЭММ (9) представлены максимум  $dM_{em\ max}$  и минимум  $dM_{em\ min}$ , а также размах колебаний  $\Delta M_{em}=dM_{em\ max}-dM_{em\ min}$ .

Значения  $\Delta M_{em}$  составляют 1,5 % от  $M_{emav}$  для варианта ТГ-1, а вот для ТГ-2 увеличиваются в 3,5 раза, достигая 5,2 %, что уже может создавать угрозу долговременной работе ТГ из-за его вибрации.

Сравнение вариантов ТГ при одинаковых номинальных параметрах. Рассмотренный вариант ТГ-2 без укорочения обмотки статора дал увеличение первой гармоники ЭДС на 0,95 % (табл. 3), а также названное уже повышение ЭММ (табл. 3) и электромагнитной мощности, по сравнению с базовым вариантом ТГ-1. Однако в реальных условиях – при работе на сеть бесконечной мощности – должно быть обеспечено на зажимах ТГ номинальное напряжение и прочие номинальные параметры. Поэтому был рассмотрен еще вариант ТГ-3 опять без укорочения обмотки статора, но с выходом на заданные номинальные величины  $U_{sN}$ ,  $I_{sN}$  и соз  $\phi_{sN}$ , а значит и на  $P_N$ .

Методом, представленным в [8], для ТГ-3 были определены ток возбуждения  $I_f$ =3205 А и угол сдвига  $\beta$ =-162,14°. Как ни странно, ток  $I_f$  даже чуть повысился, несмотря на некоторое понижение ЭДС и напряжения по сравнению с вариантом ТГ-2. Но это объясняется тем, что с увеличением угла  $\beta$  (в варианте ТГ-2 было –160,47°) увеличилась продольная размагничивающая составляющая МП реакции якоря, поэтому  $I_f$  и увеличился для ее компенсации. Для варианта ТГ-3 результаты расчетов даны в тех же табл. 1–3 и они свидетельствуют, что, в целом, отрицательные явления – ухудшенный гармонического состава ЭДС, увеличенные значения ПСМИ на большом зубе ротора и пульсации ЭММ сохранились примерно такими же, как и для варианта ТГ-2.

Для подтверждения этого на рис. 6 даны графики временных функций ЭДС для варианта ТГ-3. Здесь кроме графиков для полного гармонического состава (кривая 1) и такого же состава, но без гармоник, кратных трем (кривая 2), дан график для первой гармоники (кривая 3). Здесь очевидно отличие первых двух графиков от "чистой" синусоиды.



Рис. 6. Временные функции фазной ЭДС для модели ТГ-3: 1 – полная функция; – 2 – без гармоник, кратных трем; 3 – первая гармоника

На рис. 7 даны графики ПСМИ для варианта ТГ-3 – уже для трех точек на поверхности ротора, указанных на рис. 4. Очевидно, что графики для точки т2 для ТГ-2 (рис. 4) и ТГ-3 (рис. 7) практически совпадают.



Рис. 7. Временные функции ПСМИ для модели 11-3 для трех точек на поверхности большого зуба ротора

То, что касается переменной составляющей ЭММ, то для ТГ-3 график практически такой же, как и на рис. 5 для ТГ-2, что подтверждают конкретные значения ЭММ в табл. 3, но вот значение  $M_{emav}$  в варианте ТГ-3 вернулось, как и задавалось, на номинальный уровень, который был характерен для варианта ТГ-1.

Выводы. 1. Численный расчет вращающегося МП является эффективной основой для определения и анализа широкого спектра электромагнитных явлений в ЭМ, в том числе, для исследуемого ТГ – временных функций электромагнитных величин, на которые влияет укорочение обмотки статора.

2. При переходе от нормально укороченной обмотки статора к диаметральной обмотке существенно ухудшается форма и гармонический состав ЭДС обмотки статора, значительно увеличивается переменная составляющая магнитной индукции на поверхности вращающегося ротора, а также сильно повышаются пульсации электромагнитного момента, посредством которого взаимодействуют ротор и статор. Да еще в случае сохранения номинальных выходных данных ТГ ток возбуждения не только не снизился, а даже чуть возрос.

3. Отмеченные в предыдущем пункте явления имеют однозначно негативный характер и должны учитываться при выборе схемы обмотки статора – в противовес возможным другим положительным факторам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

2. Милых В.И., Полякова Н.В. Гармонический анализ электромагнитных величин трехфазной обмотки статора турбогенератора на основе классических и численно-полевых методов // Технічна електродинаміка. – 2013. – №3. – С. 40-49.

3. Bianchi Nicola. Electrical Machine Analysis Using Finite Elements (Copyrighted Material) // CRC Press, Taylor & Francis Group, University of West Florida, 2005. – 276 p.

4. Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 2. – С. 40-46.

5. Зозулін Ю.В., Антонов О.Є., Бичік В.М., Боричевський А.М., Кобзар К.О., Лівшиць О.Л., Ракогон В.Г., Роговий І.Х., Хаймович Л.Л., Чередник В.І. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій. – Харків: ПФ "Колегіум", 2011.– 228 с.

6. Милых В.И., Полякова Н.В. Система направлений и фазовых соотношений электромагнитных величин при численных расчетах магнитных полей в турбогенераторе // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №5. – С. 33-38.

7. Милых В.И., Полякова Н.В. Расчетный и гармонический анализ магнитных полей в активной зоне турбогенератора в режиме нагрузки // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №6. – С. 40-45.

8. Милых В.И., Полякова Н.В. Организация численного расчета магнитного поля турбогенератора в режиме нагрузки с обеспечением заданных его выходных параметров // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №1. – С. 36-41.

9. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit Executable (10 Oct 2010) [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://www.femm.info/wiki/Download.

10. Милых В.И., Полякова Н.В. Сравнительный анализ переменного магнитного поля на поверхности ротора турбогенераторов с разным числом зубцов статора в режиме нагрузки // Технічна електродинаміка. – 2014. – №2. – С. 29-36.

11. Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А., Вартаньян Г.П., Заславский Д.И., Смотров И.А. Турбогенераторы. – Л.: Энергия, 1967. – 895 с.

12. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. – М.: Высшая школа, 1989. – 312 с.

REFERENCES: 1. Voldek A.I. Elektricheskie mashinv [Electrical machines]. Leningrad: Energiya Publ., 1978. 832 p. 2. Milykh V.I., Polyakova N.V. Harmonious analysis of electromagnetic sizes three-phase winding of stators of turbogenerator on basis classic and numeral field methods. Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics, 2013, no.3, pp. 40-49. 3. Bianchi Nicola. Electrical Machine Analysis Using Finite Elements (Copyrighted Material). CRC Press, Taylor & Francis Group, University of West Florida, 2005. 276 p. 4. Milykh V.I., Polyakova N.V. Determination of the electromagnetic parameters of electrical machines on the basis of the numeral calculations of the magnetic fields. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2006, no.2, pp. 40-46. 5. Yu.V. Zozulin, O.Ye. Antonov, V.M. Bychik, A.M. Borychevs'kyy, K.O. Kobzar, O.L. Livshyts', V.H. Rakohon, I.Kh. Rohovyy, L.L. Khaymovych, Cherednyk V.I. Stvorennja novyh typiv ta modernizacija dijuchyh turbogeneratoriv dlja teplovyh elektrychnyh stancij [Creation of new types and modernization of the existing turbogenerators for the thermal electric stations]. Kharkiv, PF "Kolehium" Publ., 2011. 228 p. 6. Milykh V.I., Polyakova N.V. System of directions and phase relations of electromagnetic values at the numeral calculations of the magnetic fields in turbogenerator. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2011, no.5, pp. 33-38. 7. Milykh V.I., Polyakova N.V. Calculated and harmonic analysis of the magnetic fields in the active zone of the turbogenerator in the load mode. Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2013, no.6, pp. 40-45. 8. Milykh V.I., Polyakova N.V. Organization of the numerical calculation of the magnetic field of turbogenerator in load mode with providing of prescribed its output parameters. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2012, no.1, pp. 36-41. 9. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. FEMM 4.2 32 bit Executable. Available at: http://www.femm.info/wiki/Download (accessed 10 October 2004). 10. Milykh V.I., Polyakova N.V. Comparative analysis of the variable magnetic field on the surface of the rotor of turbogenerators with different numbers of stator teeth in the load condition. Tekhnichna elektrodynamika - Technical electrodynamics, 2014, no.2, pp. 29-36. 11. Titov V.V., Hutoreckij G.M., Zagorodnaja G.A., Vartan'jan G.P., Zaslavskij D.I., Smotrov I.A. Turbogeneratory [Turbogenerators]. Leningrad, Energiia Publ., 1967. 895 p. 12. Ivanov-Smolenskiy A.V. Elektromagnitnye sily i preobrazovanie energii v elektricheskikh mashinakh [Electromagnetic forces and energy conversion in electrical machines]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1989. 312 p.

#### Поступила (received) 26.03.2014

Милых Владимир Иванович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,

Полякова Наталия Владимировна<sup>1</sup>, ассистент,

<sup>1</sup> Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт",

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,

тел/phone +38 057 7076514, e-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua

V.I. Milykh<sup>1</sup>, N.V. Polyakova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

# Numerical field estimation of turbogenerator stator winding shortening efficiency.

On the basis of numerical calculations of rotating magnetic field, a turbogenerator is evaluated for cases of a shortened stator winding and a diametric one. The parameters compared are the shape and harmonic composition of the winding EMF, the alternating component of the magnetic field on the rotor surface, and the electromagnetic torque ripple.

*Key words* – numerical-field method, turbogenerator, stator winding, shortening, time functions, electromotive force, alternating magnetic field on the rotor surface, electromagnetic torque ripple.

УДК 621.316.761.2

#### Р.В. Власенко, О.В. Бялобржеський

## АЛГОРИТМ ПРОГНОЗУЮЧОГО УПРАВЛІННЯ ТРИФАЗНОГО СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРУ

В роботі розглянуто схеми підключення активних фільтрів до мережі, структури систем управління силових активних фільтрів і методи, що ґрунтуються на визначенні складових повної потужності. Проаналізовано існуючі структури систем управління силовими активними фільтрами та корегування алгоритму управління для зменшення комутаційних втрат вентилів. Запропоновано алгоритм прогнозуючого управління трифазним силовим активним фільтром.

В работе рассмотрены схемы подключения активных фильтров к сети, структуры систем управления силовых активных фильтров и методы, основанные на определении составляющих полной мощности. Проанализированы существующие структуры систем управления силовыми активными фильтрами и корректировки алгоритма управления для уменьшения коммутационных потерь вентилей. Предложен алгоритм прогнозирующего управления трехфазным силовым активным фильтром.

#### ВСТУП

Впровадження останнім часом напівпровідникової техніки в електротехніці стало приводити до зростання нелінійного навантаження, що загострило проблему забезпечення якості електроенергії. Негативна дія нелінійного навантаження полягає в тому, що воно призводить до високого коефіцієнту несинусоїдальності струму, споживаного перетворювачами з мережі. Такий струм навантаження характеризується високим рівнем гармонік, негативний вплив яких призводить до економічних збитків, зумовлених погіршенням енергетичних показників та інше [1]. Останніми досягненнями силової перетворювальної техніки і найбільш ефективними технічними рішеннями в області компенсації неактивних складових потужностей навантажень є силові активні фільтри [1].

#### МЕТА РОБОТИ

Аналіз структури систем управління силовими активними фільтрами та корегування алгоритму управління для зменшення комутаційних втрат вентилів.

По типу підключення активного фільтру до мережі розрізняють: активний фільтр, що включається паралельно навантаженню (рис. 1) та підключений послідовно (рис. 2) в лінію.



Рис. 1 Схема підключення паралельного активного фільтру до мережі: АІН – автономний інвертор напруги; СУ САФ – система управління силового активного фільтру; М – мережа; Л – лінія; КВ – керований випрямляч; Н – навантаження; Р – реактор

Активний фільтр, що включається паралельно навантаженню, застосовується, в основному, для зниження рівня гармонік струму, компенсації реактивної потужності, що викликаються наявністю нелінійних пристроїв, які входять до складу навантаження. Увімкнений послідовно в лінію активний фільтр, окрім основної функції зниження гармонік струму, може використовуватися для регулювання напруги основної гармоніки у вузькому діапазоні значень, а також для демпфування порушень якості електроенергії – несиметрії напруг і флікер при роботі в мережі таких споживачів, як дугові печі або потужні електродвигуни з частими пусками.



Рис. 2 Схема підключення послідовного активного фільтру до мережі: АІН – автономний інвертор напруги; СУ САФ – система управління силового активного фільтру; М – мережа; Л – лінія; КВ – керований випрямляч; Н – навантаження;

Тр – трансформатор

Для виділення складових потужності, які підлягають компенсації чи фільтрації використовують різноманітні методи, що грунтуються на визначенні складових повної потужності, зокрема теорія за Фрізе; *p-q* теорії миттєвої потужності і її модернізацією *d-q* методом.

Польський вчений Станіслав Фрізе запропонував метод визначення складових повної потужності [2] шляхом розкладання їх на дві ортогональні складові в часовій області. Він запропонував розкласти струм i на активну  $i_a$  (повторює форму напруги мережі) і пасивну  $i_{\Pi}$  (нев'язки до струму) складові:

$$i = i_a + i_{\Pi}. \tag{1}$$

Через загальноприйняті формули визначаються потужності, середньоквадратична напруга і струм за довільний інтервал розгляду:

$$P = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} u \cdot i dt, \qquad (2)$$

<sup>©</sup> Р.В. Власенко, О.В. Бялобржеський

$$U^{2} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} u^{2} dt,$$
 (3)

$$I^{2} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} i^{2} dt.$$
 (4)

Активна і пасивна складова струму визначаються зі співвідношень:

$$i_a = \frac{P}{U^2} \cdot u, \tag{5}$$

$$i_{\Pi} = i - i_a . \tag{6}$$

Оскільки пасивні складові не споживають енергії [2], то Фрізе запропонував їх компенсувати.

*P-q* теорія миттєвої потужності була вперше запропонована японськими вченими Н. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae. Застосовується вона в трифазних мережах без нульового проводу [3, 7]. В *p-q* теорії миттєву активну і реактивну потужність визначають при синусоїдальній симетричній системі напруг мережі. Визначаються миттєві потужності із співвідношень в  $\alpha\beta$ -координатах, які отримуються в результаті перетворень Кларка.

Коли напруга живлячої мережі спотворена використовують корекцію p-q теорії, яку автори F. Z. Peng, J. S. Lai назвали d-q методом [7]. Метод d-q заснований на використанні перетворень Парка і обертової системи координат.

Для формування імпульсів управління ключами перетворювача з метою відпрацювання розрахованих за вище наведеними методами потужності застосовують методи формування імпульсів: періодичної дискретизації (рис. 3,а), релейного управління (рис. 3,б) і широтно-імпульсної модуляції (рис. 3,в).



Рис. 3 Блоки керування ключами перетворювача: а) періодична дискретизація; б) релейне управління; в) широтно-імпульсна модуляція

Метод періодичної дискретизації забезпечує перемикання ключів силового активного фільтру залежно від стану релейного елементу та синхронізуючих сигналів визначених фіксованою частотою [4]. Основною перевагою цього методу є те, що мінімальний час між переходами перемикання обмежений періодом тактових імпульсів, недоліком – частота вихідних імпульсів чітко не визначена та додатково зумовлюється помилкою між заданим та поточним значенням параметру управління. Релейне управління забезпечує перемикання силових ключів, коли похибка перевищує фіксовану величину – зону гістерезису [4]. У цьому випадку частота перемикання не фіксована, але вона може бути визначена [4]. Перевагою системи управління є її простота, недоліком – виникнення субгармонік.

Широтно-імпульсна модуляція передбачає порівняння похибки параметру регулювання з фіксованою амплітудою і частотою опорного сигналу. Похибка подається на вхід пропорційно-інтегрального ПІрегулятору перед порівнянням з опорним сигналом. Параметри регулятора розраховуються у відповідності з абсолютним значенням критерію оптимальності [4]. Перевагою є те, що імпульси комутації короткої тривалості, недоліком – спотворення форми струму [4].

Втрати потужності в перетворювачі складаються із статичних і динамічних втрат потужності [5], які є складними функціями поточних значень: струмів, що протікають через вентилі і шунтуючі їх діоди; прямого падіння напруги на вентилях у відкритому стані і зворотного падіння напруги на шунтуючих діодах; та частоти модуляції (перемикання).

Електротехнічні установки працюють в режимах в яких можна виділити квазістаціонарні часові інтервали електроспоживання, при цьому використання швидкодіючої системи управління активним фільтром нераціонально. Підвищена частота комутації вентилів на таких інтервалах знижує ефективність використання фільтру. У той же час перехід електротехнічної установки від одного квазістаціонарного стану до іншого може відбуватись досить швидко (наприклад керовані випрямлячі), при цьому потрібна висока швидкодія активного фільтру.

Відповідно до [6] режими роботи активного фільтру розділяють на сталий і динамічний режим роботи. Під сталим режимом роботи перетворювача слід розуміти його роботу при малих значеннях відхилень  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  проекцій струму на стороні змінного струму перетворювача (які не перевищують допустимої для них області h), а під динамічним режимом — роботу перетворювача при відхиленнях  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  проекцій струму, що перевищують припустиму область відхилень.

Алгоритм прогнозуючого управління силовим активним фільтром в трифазній мережі змінного струму реалізується наступним чином (рис. 4).

Контролюють напругу *U*<sub>DC</sub> на стороні постійного струму перетворювача.

Задають припустиму область відхилень проекцій струму h [6].

Вимірюють струми навантаження  $i_{H\_abc}$ , струми компенсатора  $i_{K\_abc}$  та фазні напруги мережі  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$  на стороні змінного струму перетворювача.

Виконують перетворення фазних напруг мережі  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$ , струмів навантаження  $i_{H\_abc}$ , і струмів компенсатора  $i_{K\_abc}$  на стороні змінного струму перетворювача в нерухому систему координат " $\alpha$ - $\beta$ " [7].

Визначають миттєву активну і реактивну потужності навантаження в нерухомій системі координат " $\alpha$ - $\beta$ " [7].

Розділяють миттєві активну і реактивну потужності на дві складові: постійну (середню, шляхом інтегрування) та змінну:

$$p_l = P_l + \widetilde{p}_l,$$

$$q_l = Q_l + \widetilde{q}_l.$$
(7)

Корисною складовою приймають тільки постійну активну потужність  $P_l$  з урахуванням, що в трифазній симетричній системі напруг в сталому режимі постійні складові активної  $P_l$  і реактивної  $Q_l$  потужності визначаються основною гармонікою струму мережі прямої послідовності, а змінні складові  $\tilde{p}_l$  і  $\tilde{q}_l$  визначаються гармоніками струму навантаження, відмінними від основної гармоніки, і струмами основної гармоніки зворотної послідовності, виділяють  $\tilde{p}_l$  і  $\tilde{q}_l$ .

Визначають заданий струм компенсатора в нерухомій системі координат " $\alpha$ - $\beta$ " [7]. Перетворюють фактичний струм компенсатора  $i_{K\_abc}$  на стороні змінного струму перетворювача в нерухому систему координат " $\alpha$ - $\beta$ ".

Розраховують кут повороту вектора струму мережі  $\theta$  [6]. Формують тригонометричні функції соз $\theta$ , sin $\theta$  від аргументу  $\theta$  ортогональної обертової координатної системи "*d*-*q*".

Виконують перетворення фактичного струму компенсатора і заданого струму компенсатора із системи координат " $\alpha$ - $\beta$ " до обертової ортогональної системи координат "d-q" [7].

Визначають прогнозовані значення проекцій  $U_d(m)$ ,  $U_q(m)$  вектора напруги, створюваного на стороні змінного струму перетворювача при даних можливих комбінаціях його відкритих і закритих силових ключів, виходячи з прогнозованих значень, згідно з таблицею [6], проекцій вектора вихідної напруги  $U_a(m)$ ,  $U_\beta(m)$  на осі нерухомої ортогональної координатної системи " $\alpha$ - $\beta$ ", з використанням наступних співвідношень:

$$\begin{bmatrix} U_d(m) \\ U_d(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha(m) \\ U_\beta(m) \end{bmatrix}, \quad (8)$$
  
m = 1,2...8.

Виконують перетворення фазних напруг мережі координатної системи "α-β" в систему координат "d-q".

Розраховують у вигляді різниці прогнозованих проекцій  $U_d(m)$ ,  $U_q(m)$  вектора напруги проекцій  $u_d$ ,  $u_q$ вектора напруги мережі u прогнозовані значення проекцій  $\Delta U_d(m)$ ,  $\Delta U_q(m)$  результуючого вектора напруги при всіх можливих комбінаціях відкритих і закритих силових ключів перетворювача:

$$\Delta U_d(m) = U_d(m) - u_d,$$
  

$$\Delta U_q(m) = U_q(m) - u_q.$$
(9)

Визначають відхилення  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  між заданими  $i^*_{Kd}$ ,  $i^*_{Kq}$  й фактичними  $i_d$ ,  $i_q$  значеннями проекцій (на осі зазначеної ортогональної обертової координатної системи "*d*-*q*") вектора струму *i*:

$$\Delta i_d = i_d^* - i_d,$$
  

$$\Delta i_q = i_q^* - i_q.$$
(10)

Через обчислені проєкції  $\Delta U_d(m)$ ,  $\Delta U_q(m)$  прогнозуючого вектора результуючої напруги і через відхилення  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  проєкцій струму розраховують для всіх можливих комбінацій відкритих і закритих силових ключів перетворювача значення  $F_1(m)$  першого прогнозуючого функціонала:

$$F_1(m) = K_1 f_q \Delta U_q(m),$$

$$K_1 = 1 + sign[f_d \Delta U_d(m)],$$
(11)

де  $f_d$ ,  $f_q$  – гістерезисного типу релейні функції від відхилень проекцій струму.

З розрахованих значень  $F_1(m)$  першого прогнозуючого функціонала знаходять екстремальне значення  $F_1^0$  даного функціонала у вигляді його максимуму, яке відповідає швидкодіючому регулюванню струму на стороні змінного струму перетворювача у динамічних режимах його роботи:

$$F_1^0 = \max\{F_1(m)\}$$
 при  $m = m_1$ . (12)

де *т* й *m*<sub>1</sub> – відповідно можлива й відповідна екстремальному значенню першого функціонала комбінація відкритих і закритих силових ключів перетворювача.

Задають припустиму область (яка характеризується границею h) відхилень проекцій вектора струму на стороні змінного струму перетворювача, що відповідає сталим режимам роботи цього перетворювача, з якою порівнюють відхилення  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  проекцій вектора струму i. Причому, якщо відхилення  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  проекцій вектора струму i. Причому, якщо відхилення  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  проекцій вектора струму виходять за межі припустимої області задають значення  $m^* = m_1$  комбінації відкритих і закритих силових ключів перетворювача таким, яке відповідає знайденому екстремальному значенню  $F^0_1$  першого прогнозуючого функціонала й забезпечує, швидкодіюче регулювання струму на стороні змінного струму перетворювача у динамічних режимах роботи.

Якщо по закінченні динамічного режиму регулювання струму на стороні змінного струму перетворювача хоча б одне з відхилень  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  проекцій струму досягає границі припустимої області відхилень, то встановлюють значення  $\Delta U_{d0}(m)$ ,  $\Delta U_{q0}(m)$ , що відповідають значенням проекцій  $U_d(m)$ ,  $U_q(m)$  прогнозованих результуючих векторів напруги на границі припустимої області відхилень h, установлюють значення  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  відхилень  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  проекцій струму, які належать границям припустимої області відхилень h відповідно до співвідношення:

$$\Delta i_d = \Delta i_{d0} - \frac{\Delta U_{d0}(m)}{L_{d\phi}} \cdot t,$$

$$\Delta i_q = \Delta i_{q0} - \frac{\Delta U_{q0}(m)}{L_{d\phi}} \cdot t.$$
(13)

Розраховують для всіх можливих комбінацій (m = 1, 2, ..., 8) відкритих і закритих силових ключів перетворювача значення  $F_2(m)$  другого прогнозуючого функціонала, задаючи наступні залежності:

$$F_{2}(m) = \min\{F_{2d}(m), F_{2q}(m)\}$$

$$F_{2d}(m) = \frac{\Delta i_{d0} + \{sign[\Delta U_{d0}(m)]\}h}{\Delta U_{d0}}, \quad (14)$$

$$F_{2q}(m) = \frac{\Delta i_{q0} + \{sign[\Delta U_{q0}(m)]\}h}{\Delta U_{q0}}.$$

з яких знаходять екстремальне значення  $F_2^0$  даного функціонала, що відповідає мінімально можливій частоті перемикань силових ключів перетворювача для сталих режимів роботи й досягається при комбінації  $m_2$ відкритих і закритих силових ключів перетворювача:

$$F_2^0 = \min\{F_2(m)\}$$
 при  $m = m_2$ . (15)

де *m*<sub>2</sub> – відповідна екстремальному значенню другого функціоналу комбінація відкритих та закритих силових ключів перетворювача.

ISSN 2074-272X. Електротехніка і Електромеханіка. 2014. №4



Рис. 4 Алгоритм прогнозуючого управління активним фільтром

Після входження відхилень  $\Delta i_d$ ,  $\Delta i_q$  проекцій струму усередину припустимої області відхилень h (яка відповідає сталому режиму роботи перетворювача) задають комбінацію  $m^*$  відкритих і закритих силових ключів перетворювача рівної згаданому значенню  $m_2$ , яке відповідає екстремальному значенню  $F^0_2$  другого прогнозуючого функціонала й забезпечує мінімально можливу частоту перемикання силових ключів цього перетворювача в сталих режимах роботи.

#### ВИСНОВОК

Розділення режиму роботи трифазного силового активного фільтру на статичний і динамічний режими роботи, із використанням алгоритму прогнозуючого управління з визначенням двох функціоналів, яким відповідає комбінація відкритих та закритих силових ключів перетворювача, дозволяє зменшити частоту комутації останніх.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
 Лохов С.М. Энергетические составляющие мощности вентильных преобразователей: учебное пособие. Ч.1. – Челябинск: ЮУрГУ, 1999. – 106 с.

3. Бурлака В.В., Поднебенная С.К., Дьяченко М.Д. Обзор методов управления активными фильтрами // Вісник ПДТУ. – 2011 – №22.

4. Juan YY. Dixon, Sebastian Tepper M., Luis Moran T. Analysis and evaluation of different modulation techniques for active power filters. IEEE, Chile, 1994, no.5/94, pp. 894-900.

5. Волков А.В., Скалько Ю.С. Потери мощности в системе "Автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией – асинхронный двигатель" // Электромашиностроение и электрооборудование. – Одесса: ОНПУ. – 2006. – №66 – С. 309-310.

6. Пат. 44892 U Україна. МПК (51) Н02Р 7/00, Н02Р 21/00. Спосіб векторного регулювання струму на стороні змінного струму трифазного чотириквадрантного перетворювача / О.В. Волков, В.О. Волков, М.Л. Антонов – №200900025 Заявлено 05.01.09; Опубл. 26.10.09. Бюл. №20. – 38 с.

7. Домнин И.Ф. Полупроводниковые компенсаторы неактивных составляющих полной мощности: автореф. дис. ... д. техн. наук: 05.09.12 / Домнин Игорь Феликсович; НТУ "ХПИ". – Х., 2008. – 36 с.

REFERENCES: 1. Zhelezko Yu.S. Poteri elektroenergii. Reaktivnaia moshchnost', Kachestvo elektroenergii [Electricity losses, Reactive power. power quality]. Moscow, ENAS Publ., 2009. 456 p. 2. Lokhov S.M. Energeticheskie sostavliaiushchie moshchnosti ventil'nykh preobrazovatelei: uchebnoe posobie. Ch.1 [Energy components for power rectifier converters: study guide. Part 1]. Chelyabinsk, South Ural State University Publ., 1999. 106 p. 3. Burlaka V.V., Podnebennaia S.K., D'iachenko M.D. Obzor metodov upravleniia aktivnymi fil'trami [Review of active filters control methods]. Visnyk Pryazovs'kogo derzhavnogo tehnichnogo universytetu – Bulletin of Pryazovskyi State Technical University, 2011, no.22. 4. Juan YY. Dixon, Sebastian Tepper M., Luis Moran T. Analysis and evaluation of different modulation techniques for active power filters. IEEE, Chile, 1994, no.5/94, pp. 894-900. 5. Volkov A.V., Skalko Yu.S. Power losses in system "voltage source inverter with pulse-width modulation - induction motor". Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie – Electrical machine-building and electrical equipment, 2006, no.66, pp. 309-310. 6. Volkov O.V., Volkov V.O., Antonov M.L. Sposob vektornogo regulirovaniia toka na storone peremennogo toka trekhfaznogo chetyrekhkvadrantnogo preobrazovatelia [Method for vector control of current for AC side of three-phase four-quadrant converter]. Patent UA, no.44892, 2009. 7. Domnin I.F. Poluprovodnikovye kompensatory neaktivnykh sostavliaiushchikh polnoi moshchnosti. Autoref. diss. dokt. techn. nauk [Semiconductor components inactive compensators apparent power. Abstracts dr. techn. sci. diss.]. Kharkiv, 2008. 36 p.

Надійшла (received) 05.12.2013

Власенко Руслан Володимирович<sup>1</sup>, аспірант,

Бялобржеський Олексій Володимирович<sup>1</sup>, к.т.н., доц., <sup>1</sup> Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, 39600, Полтавська обл., Кременчук, вул. Першотравнева, 20,

тел/phone +38 066 7588712,

e-mail: vla-ruslan@yandex.ru, seemAl@kdu.edu.ua

#### R.V. Vlasenko<sup>1</sup>, O.V. Bialobrzeski<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University 20, Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine **A predictive control algorithm for an active three-phase power filter.** 

The paper deals with grid connection circuits for active filters, structures of active power filter control systems, and methods based on full capacity components determination. The existing structures of active power filter control and control algorithm adjustment for valve commutation loss reduction are analyzed. A predictive control algorithm for an active three-phase power filter is introduced.

*Key words* – active power filter, predictive control, *P-Q* theory, reactive power compensation, modulation techniques.

#### УДК 658.5

#### В.Г. Иванов

## АНАЛИЗ ВЗАИМНОЙ ЕМКОСТИ И ИНДУКТИВНОСТИ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА

У статті проаналізована взаємна ємність і індуктивність друкованого монтажу, запропоновано спосіб оцінки міжпровідникових ємностей при трасуванні електричних з'єднань, який орієнтований на багатошарову канальну модель.

В статье проанализирована взаимная емкость и индуктивность печатного монтажа, предложен способ оценки межпроводниковых емкостей при трассировке электрических соединений, который ориентирован на многослойную канальную модель.

С ростом степени интеграции и быстродействия микроэлектронных устройств все большее значение приобретает обеспечение помехоустойчивости топологии. Помехи при работе устройства могут возникать в силу ряда причин, однако наибольшее значение здесь играют паразитные межпроводниковые емкости. Для устройств большой степени интеграции встает задача оценки паразитных емкостей непосредственно в процессе проектирования, которая в настоящее время не решена.

В цифровой электронике взаимная емкость и взаимная индуктивность обычно создают нежелательные перекрестные помехи, с которыми приходится бороться. Собственная емкость и собственная индуктивность могут принести как пользу, так и вред, в зависимости от конкретной схемы.

Между цепями всегда существует взаимная емкостная связь. Электрические поля, создаваемые напряжениями, действующими в одной цепи, воздействуют на другую цепь. Между любыми электрическими цепями существует взаимная связь через электрическое поле, – с увеличением расстояния между цепями коэффициент взаимной связи быстро уменьшается. Коэффициент взаимной электрической связи двух цепей называется их взаимной емкостью и измеряется в фарадах или (A×C)/В. Взаимная емкостная связь двух цепей, А и В, это, по существу, паразитная емкость, включенная между ними.

Взаимная емкость  $C_M$  обусловливает появление в цепи В тока  $I_M$ , мгновенное значение которого пропорционально скорости изменения напряжения в цепи А, в соответствии со следующей формулой:

$$I_M = C_M \, \frac{dV_A}{dt} \,. \tag{1}$$

Данная формула является простой приближенной формулой оценки фактической величины тока помехи, вызванной взаимной связью цепей. Точная формула должна была бы учитывать разницу напряжений в цепях A и B и влияние емкости  $C_M$  да режим работы обоих цепей. Данное приближение справедливо при выполнении следующих условий.

1. Ток связи через емкость  $C_M$  значительно меньше тока основного сигнала в цепи А. Поэтому емкость  $C_M$  не нагружает цепь А.

2. Напряжение помехи, создаваемой за счет емкостной взаимной связи в цепи В, меньше, чем напряжение основного сигнала в цепи А. Тогда при расчете тока помехи можно пренебречь небольшим напряжением, возникающим в цепи В за счет взаимной связи и принять разность напряжений между цепями A и B равной  $V_A$ .

3. Реактивное сопротивление конденсатора превышает реактивное сопротивление цепи В по отношению к земле. Напряжение помехи за счет взаимной связи в этом случае будет равно произведению тока  $I_M$  на реактивное сопротивление цепи В по отношению к земле. В этом случае мы не учитываем влияние взаимной емкости на режим работы цепи В [1].

В случае, когда амплитуда напряжения помехи, вызванной взаимной связью цепей, составляет менее 10 % амплитуды полезного импульсного сигнала, погрешность оценки, полученной с помощью этой приближенной формулы, составляет примерно 10 %. Такой точности вполне достаточно для того, чтобы установить, на какие эффекты следует обратить внимание. Если же напряжение помехи, вызванной взаимной связью, превышает 10 % уровня полезного сигнала, то погрешность оценки, обеспечиваемой данным приближением, становится выше, но при 10 %-ом уровне перекрестной помехи цифровая схема, вероятно, окажется неработоспособной и добиваться повышения точности расчета будет просто ни к чему.

Между контурами с током обязательно возникает взаимная индуктивность. Магнитное поле, создаваемое током, протекающим в одном из контуров, воздействует на другой контур. Между проводящими контурами с током существует взаимная связь, быстро ослабевающая с увеличением расстояния между ними. Количественной мерой взаимной связи между проводящими контурами с током является параметр, который называется взаимной индуктивностью. Взаимная индуктивность измеряется в Генри или (Вольт×секунда)/Ампер. Взаимная индуктивная связь между цепями действует аналогично крошечному трансформатору, включенному между цепями А и В. Где бы ни оказались по соседству друг с другом два контура с током, они взаимодействуют подобно первичной и вторичной обмоткам трансформатора, и между ними возникает взаимная индуктивность.

Взаимная индуктивность  $L_M$  вызывает появление в цепи В помехи, мгновенное напряжение которой Y связано со скоростью изменение силы тока в цепи A следующей формулой:

$$Y = L_M \frac{dI_A}{dt}.$$
 (2)

Резкие изменения тока в цепи А индуцируют в цепи В большие напряжения, поэтому учет взаимной индуктивной связи имеет важное значение при конструировании высокоскоростных цифровых устройств.

Приведенная формула является первым приближением фактической величины напряжения помехи, вызванной взаимной индуктивностью цепей. Точная формула должна была бы учитывать разницу токов в цепях А и В и влияние собственной индуктивности "первичной" и "вторичной" обмоток на режим работы обоих цепей. Приближение справедливо при выполнении следующих условий: 1. Напряжение помехи, наводимое на индуктивности  $L_M$  мало по сравнению с напряжение первичного сигнала в цепи А. Таким образом взаимная индуктивность  $L_M$  не влияет на режим работы цепи А. Напряжение помехи, возникающей в цифровых схемах за счет взаимной индуктивности, всегда меньше напряжения сигнала, создающего эту помеху.

2. Ток помехи в цепи В меньше тока сигнала в цепи А. Таким образом, током помехи в цепи В можно пренебречь и принять разницу токов в первичной и вторичной цепях равной просто току I<sub>A</sub>.

3. Предполагается, что вносимый импеданс, обусловленный взаимной индуктивностью, мал по сравнению с собственным импедансом цепи В по отношению к земле. Это позволяет просто добавить напряжение помехи, вызванной взаимной индуктивной связью цепей, к напряжению полезного сигнала в цепи В. В этом приближении не учитывается влияние, оказываемое взаимной индуктивностью на режим работы цепи В.

В цифровых схемах взаимная индуктивность, как и взаимная емкость, обычно вызывает появление нежелательной перекрестной связи между цепями:

1. Ток, протекающий в проводящем контуре А, возбуждает в пространстве, окружающем проводник, магнитное поле. Чем больше сила тока, тем выше напряженность возбуждаемого им магнитного поля в пространстве, окружающем контур А.

2. Вычислим полный поток силовых линий магнитного поля, создаваемого током, протекающим в контуре А, через площадь, охваченную контуром В. Полный поток силовых линий магнитного поля через площадь, охваченную контуром В, называемый потоком магнитной индукции через контур В, зависит от расстояния между контурами А и В, их физических размеров, взаимной ориентации и прямо пропорционален силе тока, текущего по контуру А. Чем больше сила тока, протекающего в контуре А, тем больше поток магнитной индукции через контур В.

3. Изменение силы тока в контуре A вызывает пропорциональное изменение величины потока магнитной индукции через контур В.

4. Согласно закону электромагнитной индукции величина напряжения, индуцируемого в контуре В, пропорциональна скорости изменения потока магнитной индукции, пронизывающего его.

Объединяя воедино соображения, изложенные в этих четырех пунктах, приходим к выводу о том, что величина напряжения, индуцируемого в проводящем, контуре В, пропорциональна скорости изменения силы тока в контуре А. Коэффициент пропорциональности называется взаимной индуктивностью цепей А и В.

Поскольку магнитное поле является векторной величиной, то при развороте контура В противоположной стороной к контуру А происходит изменение полярности потока магнитной индукции. В результате происходит также изменение полярности напряжения, индуцируемого в контуре В. Аналогичный разворот контура А, вызовет точно такой же эффект.

Если сориентировать контур В так, чтобы он лежал в плоскости, параллельной силовым линиям магнитного поля, то поток магнитной индукции через контур В станет равен нулю и, соответственно, индуктивная связь между контурами исчезнет.

Помеха, вызванная взаимной индуктивной связью, в отличие от случая взаимной емкостной связи, может иметь полярность, противоположную полярности осуждающего ее сигнала. Кроме того, величина взаимной индуктивной связи очень сильно зависит от взаимной ориентации контуров [1].

Основное влияние на сбои работы больших микросхем (БИС) дает паразитная емкость печатного монтажа [2].

Известен ряд обзорных работ по методам расчета емкостей [3, 4]. Все методы расчета емкостей могут быть разделены на две основные группы (рис. 1): методы непосредственного определения емкостей и методы, основанные на решении системы уравнений Максвелла, требующие, в свою очередь, решения задачи расчета электростатического поля.



Рис. 1. Классификация методов расчета емкостей

Методы непосредственного определения емкостей не требуют расчета электростатического поля. К этому классу относятся методы конформных преобразований, аналитической аппроксимации электростатического поля, определения емкостей по геометрическим параметрам. Метод конформных преобразований основан на свойстве емкости сохранять неизменным свое значение при конформных преобразованиях плоскопараллельных систем.

Суперпозицией конформных преобразований система проводников приводится к виду, для которого известно аналитическое выражение емкости. На геометрию проводников накладываются существенные ограничения, поэтому метод получил ограниченное применение. Метод аналитической аппроксимации электростатического поля позволяет дать двустороннюю опенку значения емкости проводников произвольной формы. Аналитическое приближенное задание эквипотенциальных поверхностей и силовых линий электростатического поля проводников позволяет получить неравенства для определения границы интервала, в котором содержится искомое значение емкости. Наиболее простым путем определения пределов истинного значения емкости является оценка емкости проводников непосредственно по их геометрическим параметрам.

Основными методами здесь являются методы частей симметризации и интегральных геометрических параметров. Емкости проводников в этом случае оцениваются по длине проводника, длине параллельного участка двух проводников, длине "теневого участка".

Непосредственное определение емкости носят, как правило, оценочный характер. Более точно значения емкостей системы проводков могут быть получены решением системы уравнений Максвелла, связывающих заряды на проводниках, потенциалы и потенциальные коэффициенты. Однако при этом требуется произвести расчет электростатического поля - решить соответствующую краевую задачу в частных производных. Решается либо прямая задача определения потенциалов по известному распределению зарядов, либо обратная – распределение зарядов по заданному значению потенциалов. Обратная задача решается методом площадок, использующим, в свою очередь, метод функций Грина.

Прямая задача решается, как правило, в предположении о равномерном распределении зарядов по поверхности каждого проводника методом Хоу. Такое предположение не является адекватным и, поэтому, рассчитанные значения емкостей получаются несколько заниженными. Однако данный вопрос подвергнут дополнительному исследованию, показано, что распределение заряда пленочного проводника существенно отличается от распределения заряда уединенной прямоугольной пластины. Следовательно, предположение о равномерном распределении заряда по длине и ширине проводников микроэлектронных устройств можно считать допустимым.

Распределение потенциала электростатического поля описывается уравнением Лапласа. Соответствующая краевая задача решается либо аналитическими, либо численными методами. Аналитические методы можно условно разделить на "точные" и "при-ближенные". "Точные" методы строят решение задача в виде суммы бесконечного ряда. Точность получаемого на практике решения определяется количеством реально суммируемых членов ряда и погрешностью вычислений. К данной группе относятся метод Гринберга и наиболее часто применяемый метод Фурье (разделения переменных). Следует отметить, что использование цилиндрических координат при определении потенциала прямоугольных проводников создает дополнительные вычислительные трудности, связанные с расчетом значении координатных функций (функций Бесселя первого ряда нулевого порядка). Использование цилиндрических координат явилось скорее традиционным, так как выражение для значения потенциала получались интегрированием выражения для потенциала точечного заряда. Более предпочтительным представляется использование декартовых координат и соответствующих тригонометрических координатных функций.

В приближенных методах находится наилучшее в смысле некоторой нормы приближение решения краевой задачи линейной комбинацией заданного набора функций. К этой группе относятся методы Ритца, Галеркиня, коллокации, граничной коллокации, регионально-структурный метод.

Численные метолы находят решение в виде числовых значений функции в некоторых заданных числовых значениях аргумента. Наиболее часто используемые методы – конечных разностей и конечных элементов. В методах конечных разностей область непрерывного изменения аргумента заменяют дискретным множеством узлов. Частные производные заменяются разностными соотношениями, краевая задача сводится к системе разностных алгебраических уравнений (разностной схеме). В методах конечных элементов область аргумента с помощью сетки разбивают на отдельные подобласти конечные элементы. Решение при этом аппроксимируется дискретной моделью, которую строят на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечных элементах. Общий недостаток численных методов - высокая размерность результирующей системы алгебраических уравнений.

В заключение отметим, если методы непосредственного определения емкостей отличаются невысокой точностью и ограниченней областью применения, то методы, связанные с расчетом электростатического поля характеризуются большой сложностью, высокими временными затратами. Второй класс методов в чистом виде может использоваться только для однократных оценок полностью спроектированной топологии. Многократные оценки проводников в процессе проектирования печатного монтажа возможны лишь на основе некоторой разумной комбинации методов первого и второго классов на основе учета технологических особенностей микроэлектронных устройств.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reed J., Sangiovanni-Vincentelli A., Santomauro M. A new symbolic channel router: YACBR2. IEEE Trans. On Computer-aided design, 1985, vol. CAD-4, no.1, pp. 25-35.

2. Klelnhans J.M. Efficient algorithms for two- and three-layer channel routing. Proc. Int. Conf. Comput. Technol. Syst. and Appl., 1987, pp. 629-632.

3. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. Перевод с англ. – М.: Мир, 1978. – 432 с.

4. Селготин В.А. Автоматизированное проектирование топологии БИС. – М.: Радио и связь, 1983. – 112 с.

**REFERENCES:** *I.* Reed J., Sangiovanni-Vincentelli A., Santomauro M. A new symbolic channel router: YACBR2. *IEEE Trans. On Computer-aided design*, 1985, vol. CAD-4, no.1, pp. 25-35. *2.* Klelnhans J.M. Efficient algorithms for two- and three-layer channel routing. *Proc. Int. Conf. Comput. Technol. Syst. and Appl.*, 1987, pp. 629-632. *3.* Kristofides N. *Teoriia grafov. Algoritmicheskii podkhod. Perevod s angl.* [Graph theory. An algorithmic approach. Translated from English]. Moscow, Mir Publ., 1978. 432 p. *4.* Selgotin V.A. *Avtomatizirovannoe proektirovanie topologii BIS* [Computer-aided design topology of BIS]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1983. 112 p.

Поступила (received) 19.11.2013

Иванов Виталий Геннадьевич, к.т.н., Институт химических технологий Восточноукраинского национального университета им. Владимира Даля,

93009, Луганская обл., Рубежное, ул. Ленина, 31, тел/phone +38 06453 50156, e-mail: vetgen@e-mail.ua

V.G. Ivanov

Chemical Technology Institute of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University 31, Lenin Str., Rubizhne, Lugansk region, 93009, Ukraine

Analysis of mutual capacitance and inductance of printed circuit.

The article analyzes the mutual capacitance and inductance of printed circuit and introduces an evaluation technique for conductor-to-conductor capacitance under electrical connections tracing, the technique based on a multi-layer channel model. *Key words* – **mutual capacitance and mutual inductance, multi-channel model.** 

УДК 621.3.022:537.311.8

М.И. Баранов

### КВАНТОВО-ВОЛНОВАЯ ПРИРОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПРОВОДНИКЕ И ЕЕ НЕКОТОРЫЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МАКРОПРОЯВЛЕНИЯ

Представлені результати теоретичних і експериментальних досліджень хвилевого подовжнього і радіального розподілів вільних електронів, що дрейфують, в круглому однорідному металевому провіднику з імпульсним аксіальним струмом свідчать про квантово-хвилевий характер протікання електричного струму провідності в даному провіднику, що приводить до виникнення в його внутрішній структурі явища квантованої періодичної макролокалізації вільних електронів.

Представленные результаты теоретических и экспериментальных исследований волнового продольного и радиального распределений дрейфующих свободных электронов в круглом однородном металлическом проводнике с импульсным аксиальным током свидетельствуют о квантово-волновом характере протекания электрического тока проводимости в рассматриваемом проводнике, приводящем к возникновению в его внутренней структуре явления квантованной периодической макролокализации свободных электронов.

#### ВВЕДЕНИЕ

Как известно, согласно классическим научным положениям теории электричества ток проводимости в металлическом проводнике представляет собой направленное перемещение коллективизированных свободных электронов в его внутренней кристаллической микроструктуре [1]. Кроме того, в нерелятивистской физике известно и то, что свободные электроны как элементарные частицы образуются из валентных электронов квантовым образом энергетически возбужденных атомов твердого материала проводника [2]. В металлическом проводнике всегда существует огромное количество свободных электронов с массой покоя  $m_e=9,108\cdot10^{-31}$  кг и объемной плотностью (концентрацией) n<sub>e</sub>, численно составляющей для основных проводниковых материалов величину, равную порядка  $10^{29}$  м<sup>-3</sup> [2, 3]. В случае, когда металлический проводник своими концами не включен в электрическую цепь с источником электропитания, то его свободные электроны перемещаются в трехмерном межатомном пространстве проводника хаотично. При приложении же к металлическому проводнику неизменяющейся или произвольно изменяющейся во времени t разности электрических потенциалов (электрического напряжения) данные элементарные носители электричества начинают в нем направленно дрейфовать (в одну сторону при приложенном постоянном и импульсном униполярном электрическом напряжении или в обе стороны при приложенном к нему переменном биполярном электрическом напряжении внешнего источника электропитания). Именно данный дрейф свободных электронов проводника и будет определять протекающий по нему электрический ток проводимости.

Не менее известным научным положением в области классической и квантовой физики является то, что электроны как элементарные частицы, имеющие соответственно корпускулярные свойства, обладают также и волновыми свойствами [2-4]. Этот факт как раз наглядно демонстрирует нам их дуалистичность (двойственность). Хорошо известно, что корпускулярно-волновой дуализм электронов удовлетворяет фундаментальному принципу дополнительности, сформулированному в XX веке выдающимся датским физиком-теоретиком Нильсом Бором [2, 3]. Поэтому электрический ток проводимости в металлическом проводнике представляет распространение электронных (дебройлевских) волн длиной  $\lambda_e$  в межатомном пространстве его кристаллического материала [2-4]. Причем, для длины  $\lambda_e$  электронной волны в металле проводника выполняется фундаментальное соотношение из области волновой механики выдающегося французского физика-теоретика Луи де Бройля [3]:

$$\lambda_e = h/(m_e v_e), \tag{1}$$

где  $h=6,626\cdot10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;  $v_e$  – скорость дрейфа электрона в материале проводника.

Усредненная скорость  $v_e$  дрейфа свободных электронов в металле проводника с током  $i_0(t)$  определяется из следующего классического соотношения [2]:

$$v_e = \delta_0 / (e_0 n_e), \tag{2}$$

где  $\delta_0$  – плотность электрического тока в проводнике;  $e_0=1,602\cdot 10^{-19}$  Кл – электрический заряд электрона.

Что касается скорости vem хаотичного (теплового) движения свободных электронов в металле проводника без тока, определяемой согласно квантовой статистике Ферми-Дирака энергией Ферми  $E_F$ , то она для меди принимает численное значение около 1,6·10<sup>6</sup> м/с [5]. Подставив это значение скорости v<sub>em</sub> в (1), находим, что ей будет соответствовать длина λ<sub>e</sub> электронной волны в медном токопроводе, равная примерно 0,5.10<sup>-9</sup> м. Видно, что в этом случае величина λ<sub>е</sub> будет несоизмеримо малой по сравнению с геометрическими макроразмерами реальных проводников, участвующих в передаче электрической энергии. В этой связи для свободных электронов, перемещающихся в межатомном пространстве твердого макропроводника с указанной тепловой скоростью vem, их волновые свойства не будут играть существенной роли и соответственно оказывать заметного влияния на протекающие в нем электрофизические процессы.

Из (1) и (2) при  $\delta_0=10^6$  А/м<sup>2</sup> для медного проводника ( $n_e=16,86\cdot10^{28}$  м<sup>-3</sup>;  $v_e=0,37\cdot10^{-4}$  м/с [6]) находим, что величина длины  $\lambda_e$  электронной волны в нем будет составлять уже значение, равное около 19,6 м. При бо́льших значениях  $\delta_0$ , характерных для сильноточных электрических цепей высоковольтной техники (при плотностях тока  $10^9$  А/м<sup>2</sup> и более) [6, 7], длина  $\lambda_e$  дебройлевской волны в основных металлах токонесущих частей изолированных проводов и кабелей

(меди и алюминии, для которых  $v_e \ge 37 \cdot 10^{-3}$  м/с) будет принимать значение около 19,6 мм и менее. Это обстоятельство является определяющим для электрофизиков при экспериментальном изучении в весьма ограниченных условиях высоковольтной научной лаборатории волновых процессов, сопровождающих формирование и распространение тока проводимости  $i_0(t)$ в металлических проводниках, реальная длина которых при этом может не превышать 1 м. Приведенные выше оценочные данные свидетельствуют о том, что из-за относительно малых значений скоростей дрейфа *v<sub>e</sub>* свободных электронов (значительно меньше 1 м/с) в основных проводниковых материалах токопроводов длины λ<sub>e</sub> электронных волн в них становятся соизмеримыми с их габаритными макроразмерами (длиной, шириной, высотой или диаметром). Поэтому для прикладного электротехнического случая, связанного с протеканием электрического тока различного вида (постоянного, переменного или импульсного) по металлическим проводникам, волновые свойства дрейфующих по ним свободных электронов начинают играть существенную роль в процессах пространственного распределения в них этих носителей электричества и соответственно джоулева тепловыделения.

Из области математической физики (например, для краевых задач о механических колебаниях струны или мембраны [8]) известно, что аналитическое решение дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих большинство физических процессов, обычно представляется собственными функциями, имеющими собственные значения и соответственно собственные числа (например, целые числа n=1,2,3,...) [9]. Укажем, что в квантовой физике, занимающейся теоретическим изучением поведения различных микрообъектов (например, электронов, протонов, нейтронов и др.) в тех или иных физических полях, описываемого волновыми дифференциальными уравнениями в частных производных, собственные числа n получили название квантовых чисел [3, 4].

С учетом вышеизложенного и известных фундаментальных научных положений современной физики для реальных физических микрообъектов и элементарных микрочастиц [1-4] становится ясным, что в металлических проводниках с электрическим током проводимости  $i_0(t)$  при определенных условиях и амплитудно-временных параметрах (АВП) указанного тока могут проявляться как волновые, так и квантовые свойства дрейфующих в их проводящем материале свободных электронов. Исследование этих условий и АВП электрического тока проводимости и соответственно изучение его квантово-волновой природы и ее возможных как слабоизученных, так и новых макропроявлений является на сегодня в области теоретической электротехники и электрофизики и прикладной электродинамики актуальной научной задачей.

#### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ КВАНТОВО-ВОЛНОВОЙ ПРИРОДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПРОВОДНИКЕ

Рассмотрим далее упрощенный случай, когда по тонкому прямолинейному круглому сплошному цилиндрическому проводнику радиусом  $r_0$  и длиной

 $l_0 >> r_0$  протекает аксиальный импульсный ток  $i_0(t)$  произвольных АВП с большой плотностью (рис. 1).



Рис. 1. Схематический вид исследуемого металлического проводника радиусом  $r_0$  и длиной  $l_0$  с аксиальным импульсным током  $i_0(t)$  большой плотности  $\delta_0(t)$ , содержащего квантованные относительно "горячие" шириной  $\Delta z_{nc}$  и "холодные" шириной  $\Delta z_{nx}$  продольные проводящие участки

Принимаем, что радиус r<sub>0</sub> нашего проводника меньше толщины токового скин-слоя в его изотропном материале, а протекающий по нему ток  $i_0(t)$  распределен по его поперечному сечению S<sub>0</sub> с усредненной в нем плотностью  $\delta_0(t) = i_0(t)/S_0$ . Влиянием дрейфующих свободных электронов друг на друга и ионов кристаллической решетки материала проводника на эти коллективизированные электроны пренебрегаем. Используемое нами приближение соответствует известному приближению Хартри-Фока, положенному в основу классической зонной теории металлов [3, 4]. Отметим, что данное одноэлектронное приближение, не учитывающее электронно-ионных взаимодействий во внутренней структуре проводника, неприемлемо для исследования случая идеальной электронной проводимости металлов (явления их сверхпроводимости), когда требуется рассмотрение корреляционного движения электронных пар и для которого характерна сверхтекучесть свободных электронов с присущим ей отсутствием рассеяния электронных волн де Бройля на тепловых колебаниях ионов (фононах) кристаллической решетки металлического проводника [2, 3]. Предположим, что пространственные распределения по координатам z и r свободных электронов в материале исследуемого проводника с импульсным током  $i_0(t)$  будут приближенно подчиняться соответствующим одномерным волновым уравнениям Шредингера [3]. Тогда для рассматриваемых носителей электричества физический смысл будут иметь только их вероятностные характеристики, а понятие местонахождения свободного электрона в металлическом проводнике с импульсным током  $i_0(t)$  нам приходиться заменить на понятие вероятности его обнаружения в том или ином элементе цилиндрического объема проводника. Требуется на основе квантовомеханического подхода в приближенном виде описать волновые продольные и радиальные распределения дрейфующих свободных электронов в исследуемом проводнике с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$ , установить с их помощью основные признаки квантово-волновой природы этого тока проводимости и выполнить с использованием мощного высоковольтного генератора апериодических импульсных токов экспериментальную проверку предложенного автором квантовомеханического подхода и некоторых полученных с его помощью результатов приближенного расчета в нем продольного распределения электронных волн де Бройля и обусловленных их рассеянием на тепловых колебаниях ионов кристаллической решетки металлического проводника особенностей его температурного поля.

#### 2. ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ВОЛНОВОГО ПРОДОЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОВОДНИКЕ С ТОКОМ

Ранее в [6, 10, 11] автором на основе решения нерелятивистского одномерного временно́го волнового уравнения Шредингера, являющегося дифференциальным уравнением в частных производных и определяющего динамическое распространение в пространстве и времени *t* той или иной плоской волны вещества, было показано, что в металлическом проводнике с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$  квантованная волновая  $\psi_{nz}$ -функция, описывающая в первом приближении продольно-временно́е распределение в его микроскопической структуре нерелятивистских дрейфующих свободных электронов, имеет вид:

 $\psi_{nz}(z,t) = A_{0z} \cdot \sin(k_{nz}z) \cdot (\cos \omega_{enz}t - i \sin \omega_{enz}t)$ , (3) где  $A_{0z} = [2/(l_0S_0)]^{1/2}$  – амплитуда n – моды собственной продольной волновой функции  $\psi_{nz}(z,t)$  с квантованной круговой частотой  $\omega_{enz} = \pi n^2 h/(4m_e l_0^2)$ ;  $k_{nz} = \pi n/l_0$  – квантованное продольное волновое число; z – текущее значение продольной координаты в материале проводника;  $i=(-1)^{1/2}$  – мнимая единица;  $n=1,2,3,\ldots,n_m$  – целое квантовое число, равное номеру моды собственной волновой пси-функции  $\psi_{nz}(z,t)$ ;  $n_m$  – максимальное значение квантового числа n.

Из анализа стационарного волнового уравнения Шредингера и его граничных условий, использованных в [10, 11] при получении (3), следует, что в рассматриваемом нами проводнике дрейфующие свободные электроны распределяются вдоль его продольной оси *OZ* так, что на длине  $l_0$  проводника всегда умещается целое квантовое число *n* волновых пси-функций  $\psi_{nz}(z,t)$  для данных электронов или электронных полуволн де Бройля, удовлетворяющих соотношению [12]:  $n\lambda_{enz}/2=l_0$ , (4)

где  $\lambda_{enz} = h/(m_e v_{enz})$  — квантованная длина продольной волны свободного электрона, равная длине стоячей волны де Бройля [3];  $v_{enz} = \omega_{enz} \lambda_{enz} / \pi = nh/(2m_e l_0)$  — квантованная продольная скорость дрейфующего свободного электрона [10].

Исходя из (4), нам можно сформулировать следующее **правило квантования I** продольных волновых функций  $\psi_{nz}(z,t)$  или электронных (дебройлевских) волн в исследуемом проводнике с током  $i_0(t)$  произвольных АВП: на длине  $l_0$  металлического проводника с электрическим током  $i_0(t)$  различных видов и АВП должно укладываться целое квантовое число п плоских электронных полуволн де Бройля длиной  $\lambda_{enz}/2$ .

Согласно [13] для определения в (1) значения квантового числа  $n_m$  при выборе волновых функций  $\psi_{nz}(z,t)$ , квадрат модуля которых определяет плотность вероятности нахождения свободных электронов в том или ином месте межатомного пространства проводника [3], можно использовать следующую формулу:

$$n_m = 2n_k^2, \tag{5}$$

где  $n_k$  – главное квантовое число, равное числу электронных оболочек в каждом идентичном атоме ме-

талла рассматриваемого проводника и соответственно номеру периода в периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева, которому этот металл исследуемого проводника принадлежит [2].

В пользу приближенного выбора по (5) максимального значения квантового числа n может свидетельствовать [2, 3]: во-первых, наличие у твердого вещества (металла) проводника широкой области поглощения внешнего электромагнитного излучения, потенциально приводящей к определенным различиям в электронно-энергетических конфигурациях отдельных атомов материала проводника; во-вторых, выполнение для электронных конфигураций атомов материала проводника фундаментального принципа Паули (каждое энергетическое состояние в атоме вещества может быть занято только одним электроном [3, 4]), согласно которому квантовое число  $n_m$  может указывать на наибольшее число энергетических состояний валентных электронов указанных атомов.

Суперпозиция квантованных (дискретных) мод волновых функций  $\psi_{nz}(z,t)$  для каждого из значений квантового числа *n*=1,2,3,... и каждого дрейфующего свободного электрона в материале исследуемого проводника с импульсным током  $i_0(t)$  аналогично широко известному в физике (волновой оптике) явлению интерференции (наложения) когерентных волн (волн, согласованно изменяющихся во времени) [2, 3] приводит к формированию во внутренней проводящей структуре проводника квантованных волновых электронных пакетов (ВЭП) [3, 14]. Физическими аргументами в пользу наступления такого наложения волновых функций  $\psi_{nz}(z,t)$  в проводящем материале проводника является: во-первых, когерентность продольных (но по своей физической сути поперечных и линейно поляризованных) электронных волн в проводнике для рассматриваемых носителей электричества; во-вторых, выполнение согласно (4) необходимых основных условий максимального усиления и ослабления когерентных продольных электронных волн при их наложении [3]. Так как квантованные длины λ<sub>епz</sub> электронных волн во внутренней структуре проводника с током  $i_0(t)$  характеризуются макроскопическими величинами (см. раздел Введение), то и геометрические размеры ВЭП будут также носить макроскопический характер. Порядок размытости границ квантованных ВЭП вдоль проводника (порядок интерференции [3] квантованных продольных электронных волн проводника) будет определяться степенью монохроматичности квантованных электронных волн де Бройля и соответственно квантованных волновых функций  $\psi_{nz}(z,t)$ . Для наблюдения в металлических проводниках с электрическим током  $i_0(t)$  интерференции квантованных продольных электронных волн большого порядка или ВЭП с четкими границами эти волны должны быть практически монохроматичными. В зонах ВЭП будет происходить резкое возрастание (усиление) рассматриваемых волновых функций  $\psi_{nz}(z,t)$ , а вне их ширины – уменьшение (ослабление) соответствующих выражению (3) продольных псифункций  $\psi_{nz}(z,t)$  [14]. В связи с тем, что квадрат модуля квантованных волновых функций (например, псифункций  $\psi_{nz}(z,t)$  согласно (3) до их интерференции) соответствует плотности вероятности (например, вида  $\rho_{we} = [2/(l_0 S_0)] \sin^2(\pi nz/l_0)$  до интерференции указанных волновых функций) пребывания в том или ином месте проводника дрейфующих свободных электронов, то в зонах квантованных ВЭП ("горячих" продольных участков) проводника с током  $i_0(t)$  будет наблюдаться увеличение плотности ner дрейфующих свободных электронов по сравнению с их первоначальной плотностью n<sub>e0</sub> (до протекания по проводнику электрического тока), а вне зон квантованных ВЭП (для "холодных" продольных участков проводника) - уменьшение плотности nex дрейфующих свободных электронов. В [6, 15] автором было показано, что при *n*=*n*<sub>m</sub> для металлического проводника с током выполняется приближенное соотношение  $n_{ez}/n_{ex} \approx 4/(\pi - 2) \approx 3.5$ . Именно указанное продольное изменение плотности  $n_e$ дрейфующих свободных электронов в проводящем материале проводника и приводит к пространственному перераспределению выделяемой в нем удельной тепловой энергии. В зонах квантованных ВЭП (в области "горячих" продольных участков) с повышенной плотностью *n<sub>ez</sub>* дрейфующих свободных электронов плотность тепловой энергии будет увеличиваться, а вне зон квантованных ВЭП (в области "холодных" продольных участков) с пониженной плотностью n<sub>ex</sub> дрейфующих свободных электронов плотность тепловой энергии будет уменьшаться [15, 16]. Эта впервые теоретически установленная автором для металлического проводника с электрическим током  $i_0(t)$  особенность тепловыделения находится в полном согласии с известным классическим положением о том, что при наложении когерентных плоских электромагнитных волн в местах их интерференционных максимумов плотность электромагнитной энергии увеличивается, а в местах их интерференционных минимумов плотность электромагнитной энергии уменьшается [2-4].

Далее необходимо указать, что отмеченное выше изменение плотности n<sub>e</sub> дрейфующих свободных электронов вдоль продольной оси OZ исследуемого проводника с током  $i_0(t)$  согласно полученным квантованным волновым функциям  $\psi_{nz}(z,t)$  по (3) и правилу их квантования (4) будет носить периодический характер, соответствующий порядку чередования образующихся вдоль проводника его относительно "горячих" и "холодных" продольных участков. При этом "горячие" продольные участки шириной  $\Delta z_{n_2}$  будут размещаться в зонах образования ВЭП проводника, а "холодные" внутренние продольные участки шириной  $\Delta z_{nxe}$  – между зонами ВЭП (см. рис. 1) [6]. На концах проводника (в местах их подключения к силовой электрической цепи с переменным (постоянным) током  $i_0(t)$  или высоковольтному генератору биполярного (униполярного) импульсного тока большой плотности б<sub>0</sub>) между крайними ВЭП и обоими концами проводника будут размещаться "холодные" крайние продольные участки шириной  $\Delta z_{nx\kappa}$  [6]. Продольные координаты середин зон крайних ВЭП или середин ширин  $\Delta z_{n2}$  "горячих" крайних продольных участков проводника могут быть рассчитаны по формуле [17]:

$$z_{nk} = l_0 / (2n).$$
 (6)

Что касается квантованных продольных координат середин "горячих" внутренних продольных участков, то расстояния между ними и серединами "горячих" крайних продольных участков с координатами по (6) определяются из следующего выражения [17]:

Из (6) и (7) следует, что центры ВЭП и "горячих" продольных участков исследуемого проводника четко соответствуют амплитудам квантованных волновых функций 
$$\psi_{nz}(z,t)$$
 или квантованных электронных полуволн де Бройля длиной  $\lambda_{enz}/2$ , определяемой по (4). При этом для краевых зон рассматриваемого проводника с током будет выполняться соотношение [17]:

$$\lambda_{enz} / 2 = \Delta z_{nz} + 2 \Delta z_{nx\kappa} = l_0 / n.$$
(8)

Для внутренних зон проводника с током  $i_0(t)$  будет справедливо квантованное соотношение вида [17]:  $\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}} -$ 

$$\lambda_{enz} / 2 = \Delta z_{nz} + \Delta z_{nxe} = l_0 / n.$$
(9)

Для расчетного определения входящей в (8) и (9) ширины  $\Delta z_{n2}$  "горячих" крайних и внутренних продольных участков используем фундаментальное в квантовой физике (волновой механике) соотношение неопределенностей Гейзенберга [3, 4]. Тогда для минимального значения ширины  $\Delta z_{n2}$  получаем [6, 17]:

$$\Delta z_{ne} = e_0 n_{e0} h \ (m_e \delta_{0m})^{-1} [8 + (\pi - 2)^2]^{-1}, \qquad (10)$$

где  $\delta_{0m}$  – амплитуда усредненной плотности тока  $i_0(t)$ , протекающего в проводнике (в первом приближении  $\delta_{0m}=I_{0m}/S_0$ );  $I_{0m}$  – амплитуда тока  $i_0(t)$  проводника.

С учетом (8) и (10) для расчетного значения квантованной ширины  $\Delta z_{nxk}$  "холодных" крайних продольных участков проводника с током  $i_0(t)$  имеем [6]:

 $\Delta z_{nx\kappa} = 0.5 [l_0/n - e_0 n_{e0} h (m_e \delta_{0m})^{-1} [8 + (\pi - 2)^2]^{-1}].$ (11)

Из (9) и (10) для квантованной ширины "холодных" внутренних продольных участков рассматриваемого проводника с током  $i_0(t)$  получаем [17]:

 $\Delta z_{nxe} = l_0 / n - e_0 n_{e0} h \ (m_e \delta_{0m})^{-1} [8 + (\pi - 2)^2]^{-1}. \ (12)$ 

Из атомной физики известно, что значение первоначальной плотности  $n_{e0}$  свободных электронов в металле проводника, входящее в (10)–(12), равно концентрации его атомов  $N_0$ , умноженной на его валентность, определяемую числом неспаренных электронов на внешних (валентных) электронных слоях атомов материала проводника (например, для меди, цинка и железа валентность равна двум [2, 3]). Расчетная величина концентрации  $N_0$  (м<sup>-3</sup>) атомов в металле проводника с массовой плотностью  $d_0$  до протекания по нему импульсного тока  $i_0(t)$  определяется формулой [3]:

$$N_0 = d_0 (M_a \cdot 1,6606 \cdot 10^{-27})^{-1}, \qquad (13)$$

где  $M_a$  – атомная масса материала проводника, входящая в данные периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева и практически равная массовому числу ядра атома металла проводника (одна атомная единица массы равна 1,6606·10<sup>-27</sup> кг [2, 3]).

#### 3. ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ВОЛНОВОГО РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОВОДНИКЕ С ТОКОМ

Для приближенного описания поведения вероятностным образом движущихся, в том числе и вдоль текущей радиальной координаты r к наружной поверхности металлического проводника с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$ , нерелятивистских дрейфующих свободных электронов воспользуемся ранее полученным автором аналитическим решением соответствующего одномерного временно́го волнового уравнения Шредингера, имеющим следующий вид [6, 18]:

$$\psi_{nr}(r,t) = A_{0r} \cdot \sin(k_{nr}r) \cdot \exp(-i\omega_{enr}t),$$
 (14)  
где  $A_{0r} = (\pi l_0 r_0 r)^{-1/2}$  – амплитуда собственной радиаль-

ной волновой функции  $\psi_{nr}(r,t)$ ;  $k_{nr}=\pi n/r_0$  – квантованное радиальное волновое число;  $\omega_{enr}=\pi n^2 h/(4m_e r_0^2)$  – квантованная круговая частота собственной радиальной волновой функции  $\psi_{nr}(r,t)$ ;  $n=1,2,3,...,n_m$  – целое квантовое число, равное номеру моды собственной радиальной волновой пси-функции  $\psi_{nr}(r,t)$ .

Согласно [18] при расчетной оценке квантованных радиальных скоростей  $v_{enr}=\omega_{enr}\lambda_{enr}/\pi$  дрейфующих электронов, где  $\lambda_{enr}=h/(m_e v_{enr})$  – квантованная длина радиальной волны (плоской волны де Бройля) для свободного электрона [3], можно воспользоваться соотношением:

$$v_{enr} = nh/(2m_e r_0)$$
 (15)

С учетом (14) и того, что  $k_{nr}=2\pi/\lambda_{enr}$  можно записать следующее квантовомеханическое соотношение для радиальных волновых пси-функций и электронных полуволн де Бройля в исследуемом проводнике:

$$n\lambda_{enr}/2 = r_0. \tag{16}$$

Поэтому на основании (16) аналогично (4) **правило квантования II** радиальных волновых функций  $\psi_{nr}(r,t)$  в исследуемом проводнике с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$  следует сформулировать в таком виде: на радиусе  $r_0$  металлического проводника с электрическим током  $i_0(t)$  различных видов и АВП должно укладываться целое квантовое число п плоских электронных полуволн де Бройля длиной  $\lambda_{enr}/2$ .

В связи с когерентностью плоских радиальных электронных (дебройлевских) полуволн длиной  $\lambda_{enr}/2$  они, как и продольные электронные полуволны де Бройля длиной  $\lambda_{enz}/2$  в кристаллической микроструктуре проводника, в результате суперпозиции или интерференции (взаимного наложения) будут образовывать вдоль внешнего радиуса  $r_0$  проводника ВЭП. Процесс образования вдоль радиуса  $r_0$  данных ВЭП ("горячих" радиальных участков) будет носить периодический характер, радиальный шаг которого на длине  $\lambda_{enr}/2$  для центральных и наружных зон проводника аналогично (8) может быть представлен в таком виде:

$$\lambda_{enr}/2 = \Delta r_{n2} + 2 \Delta r_{nx\kappa} = r_0/n, \qquad (17)$$

где  $\Delta r_{nz}$ ,  $\Delta r_{nxk}$  – соответственно ширина относительно "горячих" и "холодных" крайних радиальных участ-ков проводника с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$ .

Для внутренних проводящих зон проводника рассматриваемый нами шаг периодизации образования вдоль радиуса  $r_0$  ВЭП может быть записан в виде:

$$\lambda_{enr}/2 = \Delta r_{nz} + \Delta r_{nxe} = r_0/n, \qquad (18)$$

где  $\Delta r_{nxe}$  — ширина "холодных" внутренних радиальных участков проводника с импульсным током  $i_0(t)$ .

Для расчетного определения в (17) и (18) величины  $\Delta r_{ne}$  воспользуемся соотношением неопределенностей Гейзенберга применительно к локализующимся на "горячих" радиальных участках (ВЭП) проводника дрейфующих свободных электронов в виде [3]:

$$\Delta r_{n2} \Delta p_{nr} \ge h/(4\pi) , \qquad (19)$$

где  $\Delta p_{nr} = m_e v_{enr} = nh/(2r_0)$  – квантованная радиальная проекция импульса дрейфующих в кристаллической микроструктуре проводника свободных электронов.

Тогда на основании (19) для квантованной минимальной ширины  $\Delta r_{ne}$  "горячих" радиальных участков или ширины квантованных радиальных ВЭП металлического проводника с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$  в принятом электрофизическом приближении получаем следующее расчетное выражение:

$$\Delta r_{n2} = r_0 / (2\pi n) \,. \tag{20}$$

Из (20) видно, что ширина  $\Delta r_{n2}$  "горячих" радиальных участков или ширина радиальных ВЭП проводника оказывается как минимум (при n=1) в  $2\pi$  раз меньше его внешнего радиуса  $r_0$ . Кстати, такая же математическая зависимость характерна и для квантованной ширины  $\Delta z_{n2}$  "горячих" продольных участков по отношению к длине  $l_0$  проводника с током  $i_0(t)$ .

Используя (17) и (20), для квантованной наибольшей ширины  $\Delta r_{nxk}$  "холодных" крайних радиальных участков исследуемого проводника находим:

$$\Delta r_{nx\kappa} = (2\pi - 1)r_0 / (4\pi n) . \tag{21}$$

Из (18) и (20) для квантованной наибольшей ширины  $\Delta r_{nxs}$  "холодных" внутренних радиальных участ-ков исследуемого проводника с током  $i_0(t)$  получаем:

$$\Delta r_{nxe} = (2\pi - 1)r_0 / (2\pi n) . \qquad (22)$$

Из соотношений (20)–(22) следует, что "холодные" внутренние радиальные участки металлического проводника с электрическим током по ширине ровно в два раза превышают "холодные" крайние радиальные участки и в  $(2\pi-1)\approx 5,3$  раз больше (шире) его "горячих" радиальных участков. По аналогии с (6) радиальные координаты середин ширин  $\Delta r_{ne}$  "горячих" крайних радиальных участков проводника равны:

$$r_{nk} = r_0 / (2n).$$
 (23)

Расстояние между серединами ширин "горячих" внутренних и крайних радиальных участков проводника будет определяться квантовым соотношением:

$$r_{nb} = r_0 / n. \tag{24}$$

Для "горячих" и "холодных" радиальных участков исследуемого металлического проводника, как и для соответствующих им по названию и рассмотренных чуть выше его продольных участков, будет также выполняться следующая характерная электрофизическая особенность: плотность как дрейфующих свободных электронов, так и плотность тепловой энергии на "горячих" радиальных участках или радиальных ВЭП металлического проводника будет заметно выше, чем на его "холодных" радиальных участках.

Приведенные выше выражения (20)-(24) с учетом заметно отличающихся температур относительно "горячих" и "холодных" радиальных участков однозначно указывают на возможность радиального расслоения проводящих плазменных продуктов, образующихся от круглого цилиндрического металлического проводника при явлении его электрического взрыва (ЭВ). Следует заметить, что эффект радиального расслоения "металлической" плазмы как раз реально и наблюдается при ЭВ даже тонких металлических проволочек [19]. Кроме того, полученные согласно выражениям (4)-(12) и (16)-(24) приближенные расчетные данные могут говорить о том, что возникающие при ЭВ круглых металлических проволочек радиальные фракции указанной плазмы будут примерно в  $l_0/r_0$  раз меньше ее продольных фракций.

#### 4. ЯВЛЕНИЕ КВАНТОВАННОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ МАКРОЛОКАЛИЗАЦИИ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПРОВОДНИКЕ С ТОКОМ Расчетная оценка по (10) ширины Δz<sub>ne</sub> "горячих"

Расчетная оценка по (10) ширины  $\Delta z_{n_2}$  горячих крайних и внутренних продольных участков металли-

ческого проводника с импульсным током  $i_0(t)$  показывает, что для медного провода ( $n_{e0}$ =16,86·10<sup>28</sup> м<sup>-3</sup> [6]) при плотности тока  $\delta_{0m}$ =2 А/мм<sup>2</sup>, характерной для электрических сетей переменного тока частотой 50 Гц [20], величина  $\Delta z_{n2}$  принимает значение, равное около 1,06 м. При  $\delta_{0m}$ =200 А/мм<sup>2</sup>, характерной для сильноточной высоковольтной импульсной техники [5, 7], рассматриваемая ширина  $\Delta z_{n2}$  становится равной уже примерно 10,6 мм. Из этих приведенных нами количественных данных становится понятным, что экспериментально выявить проявление волновых свойств дрейфующих свободных электронов в металлических проводниках можно путем явного обнаружения в них мест формирования макроскопических ВЭП и соответственно "горячих" крайних и внутренних продольных участков, а также проявляющихся на их фоне "холодных" крайних и внутренних продольных участков. Понятным становится и то, что для подобного обнаружения в лабораторных условиях квантованных величин  $\Delta z_{nz}$ ,  $\Delta z_{nx\kappa}$  и  $\Delta z_{nx\kappa}$  соответственно для "горячих" и "холодных" продольных участков проводника необходимо использовать мощное высоковольтное электрооборудование, способное генерировать в электрической цепи с исследуемым металлическим проводником сравнительно большие импульсные токи. Причем, такие токи, протекание которых через металлический проводник вызывало бы интенсивный нагрев его материала и особенно проводящей кристаллической структуры в зоне его квантованных ВЭП.

Приведенные выше в разделах 2 и 3 теоретические результаты указывают на процессы периодической макролокализации дрейфующих свободных электронов в зонах продольных и радиальных ВЭП исследуемого проводника с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$ . Характерным для данной электронной макролокализации является то, что она носит квантованный характер, математически определяемый согласно выражениям (3) и (14) значением квантового числа *n*, а физически – энергетическим состоянием свободных электронов, оказавшихся в микроструктуре материала проводника в момент подачи на него электрического напряжения и начала протекания по нему электрического тока того или иного вида. Поэтому значение квантового числа *п* для продольных  $\psi_{nz}(z,t)$  и радиальных  $\psi_{nr}(r,t)$  волновых функций, а также для плоских продольных и радиальных полуволн де Бройля длиной  $\lambda_{enz}/2$  и  $\lambda_{enr}/2$  в микроструктуре металлического провода с импульсным током  $i_0(t)$ будет носить вероятностный (стохастический) характер. Очевидным для автора является то, что практически численное значение квантового числа *n* будет всегда равно числу макроскопических "горячих" продольных участков (ВЭП) шириной  $\Delta z_{n2}$ , периодически образующихся вдоль рассматриваемого металлического проводника длиной  $l_0$  с аксиальным током  $i_0(t)$ .

### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЛНОВОГО ПРОДОЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПРОВОДНИКЕ С ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ

Для осуществления опытной проверки представленных в разделах 2 и 3 расчетных результатов квантованных волновых распределений дрейфующих свободных электронов в цилиндрическом проводнике с импульсным аксиальным током  $i_0(t)$  наиболее простым, надежным и соответственно целесообразным путем может служить экспериментальное исследование в нем продольного волнового распределения данных электронов. В проводимых экспериментах используем жестко закрепленный в разрядной цепи высоковольтного генератора импульсных токов ГИТ-5С [22] круглый оцинкованный (с толщиной защитного покрытия  $\Delta_0=5$  мкм) стальной провод [23], имеющий следующие геометрические характеристики (рис. 2): r<sub>0</sub>=0,8 мм; l<sub>0</sub>=320 мм; S<sub>0</sub>=2,01 мм<sup>2</sup>. Разряд предварительно заряженной до постоянного зарядного напряжения U<sub>31</sub>=-3,7 кВ емкости C<sub>1</sub>=45,36 мФ (при запасаемой электрической энергии W<sub>I</sub>=310 кДж) конденсаторной батареи генератора ГИТ-5С обеспечивал протекание через исследуемый стальной провод апериодического импульса тока  $i_0(t)$ , характеризуемого следующими АВП: амплитудой I<sub>0m</sub>=-745 А; временной формой  $t_m/\tau_p=9$  мс/576 мс, где  $t_m$  – время, соответствующее токовой амплитуде I<sub>0m</sub>, а т<sub>p</sub> - полная длительность импульса тока; модулем усредненной плотности импульсного тока, равным  $|\delta_{0m}|=0,37 \text{ кA/мм}^2$  [6].



Рис. 2. Общий вид круглого прямолинейного оцинкованного стального провода (*r*<sub>0</sub>=0,8 мм; *l*<sub>0</sub>=320 мм; Δ<sub>0</sub>=5 мкм;

стальної провода ( $r_0$ -0,6 мм,  $r_0$ -320 мм,  $\Delta_0$ -3 мкм,  $\Delta_0$ -3 мкм,  $S_0$ =2,01 мм<sup>2</sup>), размещенного в воздухе над теплозащитным асбестовым полотном, до протекания по нему в разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-5С апериодического импульса аксиального тока  $i_0(t)$  большой плотности [6, 17]

На рис. З приведены результаты одного из воздействий указанного апериодического импульса аксиального тока временной формы 9 мс/576 мс на используемый в экспериментах металлический провод.



Рис. 3. Внешний вид теплового состояния оцинкованного стального провода ( $r_0$ =0,8 мм;  $l_0$ =320 мм;  $\Delta_0$ =5 мкм;  $S_0$ =2,01 мм<sup>2</sup>) с одним "горячим" (зоной ВЭП шириной  $\Delta z_{nz}$ =7 мм посередине провода) и одним "холодным" крайним левым (шириной  $\Delta z_{nxx}$ =156,5 мм; второй "холодный" крайний правый участок подвергся частичной сублимации) продольными участками после протекания по нему апериодического импульса тока  $i_0(t)$  временной формы 9 мс/576 мс большой плотности ( $I_{0m}$ =-745 A;  $|\delta_{0m}|$ =0,37 кА/мм<sup>2</sup>; n=1) [6, 17]

Из данных рис. 3 следует, что на длине  $l_0=320$  мм интенсивно нагреваемого униполярным импульсным током ( $|\delta_{0m}|=0,37$  кА/мм<sup>2</sup>) оцинкованного стального провода (для его стального основания согласно (13)

 $n_{e0}$ =2 $N_0$ =16,82·10<sup>28</sup> м<sup>-3</sup> [3]) в исследуемом случае имеется один "горячий" продольный участок (одна ярко светящаяся вспученная сферообразная зона ВЭП посередине провода, однозначно указывающая на то, что n=1) шириной  $\Delta z_{nc}=7$  мм (при его расчетной ширине по (10) в 5,7 мм) и два крайних "холодных" продольных участка (цилиндрические перешейки по обоим краям провода, один из которых подвергся частичной сублимации) шириной  $\Delta z_{nxk}$ =156,5 мм (при их расчетной ширине по (11) в 157,1 мм). Металлографические исследования остывшей посередине провода сферообразной зоны ВЭП показали, что она содержит затвердевшие фракции вскипевшего (вспученного) цинкового покрытия (при температуре кипения для цинка в 907 °С [3]) и расплавленного стального основания провода (при температуре его плавления примерно в 1535 °C [3]). О данном высоком уровне температуры в сферообразной зоне ВЭП (на единственном "горячем" продольном участке провода) свидетельствует ее белый цвет каления (не менее 1200 °С [3]) и обнаруженные под ней прожоги теплозащитного покрытия из хризотил-асбеста толщиной 3 мм с температурой его плавления примерно 1500 °С [3, 6]. На основании полученных в этом случае (n=1) опытных данных и выполненных для него расчетных квантовофизических оценок можно заключить, что в кристаллической микроструктуре оцинкованного стального провода происходит суперпозиция квантованных продольных волновых функций  $\psi_{nz}(z,t)$ , моды которых характеризуются одним квантовым числом *n*=1. В результате существования в проводе таких мод псифункций на его длине  $l_0=320$  мм умещается лишь одна электронная полуволна де Бройля, для которой выполняется равенство  $\lambda_{enz}/2=320$  мм и в зоне ее амплитуды (при продольной координате по (6) z<sub>nk</sub>=160 мм) формируется только один ВЭП или один "горячий" продольный участок шириной около  $\Delta z_{n2}=7$  мм.

На рис. 4 показаны опытные результаты очередного воздействия на оцинкованный стальной провод  $(r_0=0.8 \text{ мм}; l_0=320 \text{ мм}; \Delta_0=5 \text{ мкм}; S_0=2.01 \text{ мм}^2)$  униполярного импульса аксиального тока  $i_0(t)$  временной формы  $t_m/\tau_p=9$  мс/576 мс большой плотности ( $I_{0m}=-745$  A;  $|\delta_{0m}|=0,37$  кА/мм<sup>2</sup>;  $U_{3\Gamma}=-3,7$  кВ;  $W_I=310$ кДж [6, 17]). Видно, что в данном опытном случае вдоль интенсивно нагретого стального провода (для его покрытия  $n_{e0}=2N_0=13,08\cdot10^{28}$  м<sup>-3</sup> [3]) размещаются уже четыре ВЭП или четыре "горячих" (опытной шириной  $\Delta z_{nz}=7$  мм при их расчетной по (10) ширине в 5,7 мм) и два внутренних "холодных" (опытной шириной  $\Delta z_{nxe}$ =26,9 мм при их расчетной по (12) ширине для n=9 в 29,9 мм) продольных участка. Следует отметить, что здесь пять "горячих", два крайних и шесть внутренних "холодных" продольных участков исследуемого провода подверглись полной сублимации. Наличие в этом экспериментальном случае на испытываемом стальном проводе высокотемпературных зон ВЭП также шириной  $\Delta z_{nz}=7$  мм может свидетельствовать о достоверности расчетной формулы (10).

Согласно (6) продольные координаты  $z_{nk}$  "холодных" крайних продольных участков при этом составили около  $z_{nk}$ =320 мм/18=17,8 мм, а расчетные координаты  $z_{nb}$  по (7) для "горячих" продольных участков будут примерно равны 35,6 мм. Величина  $n \cdot z_{nb}$  должна в рассматриваемом случае (n=9) приближаться к длине  $l_0=320$  мм исследуемого стального провода. Из полученных расчетных и опытных данных видно, что подобное геометрическое условие выполняется. Результаты последнего опыта также наглядно показывают, что в исследуемом стальном проводе имеет место периодическая макролокализация дрейфующих свободных электронов, вызывающая появление в его проводящей макроструктуре неоднородного периодического продольного температурного поля. Опытный шаг продольной квантованной периодизации такого теплового поля в указанном стальном проводе оказался примерно равным ( $\Delta z_{nxe}+\Delta z_{nz}$ )=31,6 мм и немного меньшим соответствующего соотношениям (8) и (9) расчетного шага, составляющего около  $l_0/n=35,6$  мм.



Рис. 4. Внешний вид рабочего стола генератора ГИТ-5С и теплового состояния оцинкованного стального провода  $(r_0=0,8 \text{ мм}; l_0=320 \text{ мм}; \Delta_0=5 \text{ мкм}; S_0=2,01 \text{ мм}^2)$  с четырьмя "горячими" (зонами ВЭП шириной  $\Delta z_{nxe}=7 \text{ мм}$ ) и двумя "холодными" внутренними (шириной  $\Delta z_{nxe}=26,9 \text{ мм}$ ) продольными участками после очередного воздействия на него апериодического импульса тока  $i_0(t)$  временной формы 9 мс/576 мс большой плотности ( $I_{0m}=-745 \text{ A}; |\delta_{0m}|=0,37 \text{ кА/мм}^2; n=9;$  остальные пять "горячих" и восемь "холодных"

продольных участков исследуемого оцинкованного стального провода подверглись полной сублимации) [6, 17]

#### 6. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И ПРИЗНАКИ КВАНТОВО-ВОЛНОВОЙ ПРИРОДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПРОВОДНИКЕ

1. Подчинение электрофизических процессов, сопровождающих протекание электрического тока проводимости в металлических проводниках, фундаментальным научным положениям как классической физики, так и нерелятивистской квантовой физики (волновой механики) применительно к его носителям электричества – дрейфующим свободным электронам. В соответствии с этими классическими положениями указанные электроны обладают волновыми свойствами, которые, как показано выше, в металлических проводниках с электрическим постоянным, переменным или импульсным током различной плотности  $\delta_0$  могут оказывать существенное влияние на протекающие в них макроскопические процессы формирования и пространственного распределения в их однородном материале тока проводимости  $i_0(t)$ . Благодаря выполнению данных физических закономерностей электромагнитная энергия, переносимая в кристаллической микроструктуре исследуемых проводников дрейфующими свободными электронами, представляется соответствующими квантами (порциями) с определенной длиной электронной волны (полуволны), а поведение рассматриваемых электронов в материале металлических проводников и их пространственно-временные распределения описываются соответствующими **квантованными волно**выми  $\psi_n$ -функциями (например,  $\psi_{nz}(z,t)$  и  $\psi_{nr}(r,t)$  [6]).

2. Наличие во внутренней кристаллической микроструктуре материала исследуемого металлического проводника с электрическим током различного вида квантованных электронных полуволн де Бройля, распространяющихся вдоль его продольной z и радиальной *г* координат. Существование данных плоских дебройлевских электронных полуволн в материале проводника вытекает из расчетных соотношений (4) и (16). Для прикладного случая продольного волнового распределения в круглом оцинкованном стальном проводе ( $r_0=0.8$  мм;  $l_0=320$  мм) апериодического импульса аксиального тока большой плотности ( $\delta_{0m}=370$ A/мм<sup>2</sup>) существование данных электронных полуволн де Бройля было подтверждено автором опытным путем на основе результатов выполненных высокотемпературных экспериментов, приведенных в [17, 21].

3. Проявление в материале исследуемого металлического проводника с электрическим током эффекта суперпозиции (интерференции) квантованных электронных полуволн де Бройля, приводящего к периодическому возникновению вдоль продольной *z* и радиальной *r* координат проводника *квантованных макроскопических ВЭП*. Данные ВЭП, в свою очередь, порождают появление в материале проводника относительно "горячих" и "холодных" продольных и радиальных участков макроскопических размеров. Пространственный шаг периодизации продольных и радиальных ВЭП проводника согласно соотношениям (8), (9), (17) и (18) равен соответствующим квантованным длинам λ<sub>enz</sub>/2 и λ<sub>cmr</sub>/2 электронных полуволн.

4. Возникновение в проводящей структуре исследуемого металлического проводника с электрическим током  $i_0(t)$  в зонах указанных выше продольных и радиальных ВЭП *явления квантованной периодической макролокализации дрейфующих свободных электронов*, характеризующегося заметным различием плотностей дрейфующих свободных электронов, плотностей тепловой энергии и соответственно температур на относительно горячих" и "холодных" продольных и радиальных участках рассматриваемого проводника. Данное явление приводит к возникновению в материале металлического проводника с электрическим током неоднородных периодических продольных и радиальных температурных полей, которые можно реально зафиксировать и исследовать.

#### ВЫВОДЫ

1. Полученные данные свидетельствуют о том, что в прямолинейном однородном круглом металлическом проводнике с электрическим аксиальным током из-за волновых свойств дрейфующих в нем свободных электронов, обуславливающих существование в его внутренней микроскопической структуре определенным образом *квантованных электронных полуволн де Бройля*, и процессов суперпозиции (взаимного наложения) данных дебройлевских электронных полуволн по всему проводящему объему проводника происходит периодическое формирование *квантованных продольных и радиальных ВЭП* макроскопических размеров. Возникающие при этом ВЭП характеризуются повышенными по отношению к исходной усредненной электронной плотности  $n_{e0}$  проводника плотностями дрейфующих свободных электронов и соответственно увеличенными на них значениями плотностей тепловой энергии и температуры. Подобное продольное и радиальное перераспределение в объеме проводника указанных носителей электричества приводит к появлению в его макроструктуре *неоднородного периодического температурного поля*.

2. Представленные результаты теоретических и экспериментальных исследований волновых электрофизических процессов, сопровождающих протекание электрического тока проводимости различного вида (постоянного, переменного или импульсного) в рассматриваемом металлическом проводнике, однозначно указывают на то, что во внутренней кристаллической структуре исследуемого проводника из-за волнового характера продольного и радиального распределений в ней дрейфующих электронов возникает явление квантованной периодической макролокализации свободных электронов. Степень и характер проявления данного квантовофизического явления по длине и радиусу металлического проводника с током  $i_0(t)$  различных АВП определяется плотностью электрического тока в нем и энергетическим состоянием его свободных электронов в момент приложения к проводнику электрического напряжения и соответственно начала протекания по нему тока проводимости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1976. – 616 с.

2. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с.

3. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.

4. Солимар Л., Уолш Д. Лекции по электрическим свойствам материалов: Пер. с англ. / Под ред. С.И. Баскакова. – М.: Мир, 1991. – 504 с.

5. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач.– Харьков: Изд-во "Точка", 2010. – 407 с.

6. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач.– Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2009. – 384 с.

7. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.

8. Мэтьюз Дж., Уокер Р. Математические методы физики / Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1972. – 392 с.

9. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров: Пер. с франц. / Под общ. ред. К.С. Шифрина. – М.: Наука, 1965. – 780 с.

10. Баранов М.И. Волновое распределение свободных электронов в проводнике с электрическим током проводимости // Электротехника. – 2005. – №7. – С. 25-33.

11. Баранов М.И. Энергетический и частотный спектры свободных электронов проводника с электрическим током проводимости // Электротехника. – 2006. – №7. – С. 29-34.

12. Баранов М.И. Новые физические подходы и механизмы при изучении процессов формирования и распределения электрического тока проводимости в проводнике // Технічна електродинаміка. – 2007. – №1. – С. 13-19.

13. Баранов М.И. Эвристическое определение максимального числа электронных полуволн де Бройля в металлическом проводнике с электрическим током проводимости // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – №6. – С. 59-62. 14. Баранов М.И. Волновой электронный пакет проводника с электрическим током проводимости // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – №3. – С. 49-53.

15. Баранов М.И. Основные характеристики вероятностного распределения свободных электронов в проводнике с электрическим током проводимости // Технічна електродинаміка. – 2008. – №1. – С. 8-12.

16. Баранов М.И. Квантовомеханический подход при расчете температуры нагрева проводника электрическим током проводимости // Технічна електродинаміка. – 2007. – №5. – С. 14-19.

17. Баранов М.И. Теоретические и экспериментальные результаты исследований по обоснованию существования в микроструктуре металлического проводника с током электронных дебройлевских полуволн // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – №3. – С. 45-49.

18. Баранов М.И. Волновое радиальное распределение свободных электронов в цилиндрическом проводнике с переменным электрическим током // Технічна електродинаміка. – 2009. – №1. – С. 6-11.

19. Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии / Под ред. В.Н. Карнюшина. – Минск: Наука и техника, 1983. – 151 с.

20. Электротехнический справочник. Производство и распределение электрической энергии / Под общей ред. И.Н. Орлова и др. – М.: Энергоатомиздат, Том 3, Кн. 1, 1988. – 880 с.

21. Баранов М.И. Расчетно-экспериментальное обоснование существования дебройлевских электронных полуволн в металлическом проводнике с импульсным током большой плотности // Вісник НТУ "ХПІ". – 2013. – №60(1033). – С. 3-12.

22. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – №3. – С. 81-85.

23. Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник / Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакян, А.И. Яковлева; Под ред. Н.И. Белоруссова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.

REFERENCES: 1. Tamm I.E. Osnovy teorii jelektrichestva [Fundamentals of electricity theory]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 616 p. 2. Javorskij B.M., Detlaf A.A. Spravochnik po fizike [Handbook of physics]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 624 p. 3. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. 4. Solymar L., Walsh D. Lekcii po jelektricheskim svoistvam materialov [Lectures on the electrical properties of materials]. Moscow, Mir Publ., 1991. 504 p. 5. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 2, Kniga 2: Teorija elektrofizicheskih effektov i zadach [Selected topics electrophysics: Monographs in 2 vols. Vol.2, Book 2: The theory of electrophysical effects and tasks]. Kharkov, Tochka Publ., 2010. 407 p. 6. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 1: Teorija elektrofizicheskih effektov i zadach [Selected topics electrophysics: Monographs in 2 vols. Vol.2, Book 1: The theory of electrophysical effects and tasks]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2009. 384 p. 7. Tehnika bol'shih impul'snyh tokov i magnitnyh polej. Pod red. V.S. Komel'kova [Technique large pulsed currents and magnetic fields. Edition by V.S. Komel'kov]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970. 472 p. 8. Matthews J., Walker R. Matematicheskie metody fiziki [Mathematical methods of physics]. Moscow, Atomizdat Publ., 1972. 392 p. 9. Ango A. Matematika dlja elektro- i radioinzhenerov [Mathematics for electro- and radioengineers]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 780 p. 10. Baranov M.I. Volnovoe raspredelenie svobodnyh elektronov v provodnike s elektricheskim tokom provodimosti [Wave distribution of free electrons in conductor with electric current of the conductivities]. Elektrotehnika -Electrical Engineering, 2005, no.7, pp. 25-33. 11. Baranov M.I. Energeticheskij i chastotnyj spektry svobodnyh elektronov provodnika s jelektricheskim tokom provodimosti [Energy and frequency spectrs of the free electrons conductor with electric current conduction]. Elektrotehnika - Electrical Engineering, 2006, no.7, pp. 29-34. 12. Baranov M.I. Novye fizicheskie podhody i mehanizmy pri izuchenii processov formirovanija i raspredelenija elektricheskogo toka provodimosti v provodnike [New physical mechanisms and approaches in the study of the formation and distribution of the electric conduction current in the conductor]. Tekhnichna elektrodynamika - Technical electrodynamics,

2007, no.1, pp. 13-19. 13. Baranov M.I. Evristicheskoe opredelenie maksimal'nogo chisla jelektronnyh poluvoln de Brojlja v metallicheskom provodnike s elektricheskim tokom provodimosti [Heuristic determination of the maximum number of de Broglie electronic halfwaves in a metallic conductor with conduction current]. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2007, no.6, pp. 59-62. 14. Baranov M.I. Volnovoj elektronnyj paket provodnika s elektricheskim tokom provodimosti [Wave electronic package of a conductor with electric conduction current]. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2006, no.3, pp. 49-53. 15. Baranov M.I. Osnovnye harakteristiki verojatnostnogo raspredelenija svobodnyh elektronov v provodnike s elektricheskim tokom provodimosti [Main characteristics of the probability distribution of free electrons in a conductor with electrical current conduction]. Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics, 2008, no.1, pp. 8-12. 16. Baranov M.I. Kvantovomehanicheskij podhod pri raschete temperatury nagreva provodnika elektricheskim tokom provodimosti [Quantum-mechanical approach in the calculation of those temperature heating wire electric conduction current]. Tekhnichna elektrodynamika Technical electrodynamics, 2007, no.5, pp. 14-19. 17. Baranov M.I. Teoreticheskie i eksperimental'nye rezul'taty issledovanij po obosnovaniju sushhestvovanija v mikrostrukture metallicheskogo provodnika s tokom elektronnyh debrojlevskih poluvoln [Theoretical and experimental results of research into explanation of de Broglie half-wave existence in the microstructure of an active metallic conductor]. Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2014, no.3, pp. 45-49. 18. Baranov M.I. Volnovoe radial'noe raspredelenie svobodnyh elektronov v cilindricheskom provodnike s peremennym elektricheskim tokom [Characteristic radial distribution of free electrons in a cylindrical conductor with varying electric current]. Tekhnichna elektrodynamika - Technical electrodynamics, 2009, no.1, pp. 6-11. 19. Stolovich N.N. Elektrovzryvnye preobrazovateli energii [Electroexplosion energy converters]. Minsk, Nauka & Tehnika Publ., 1983. 151 p. 20. Elektrotehnicheskij spravochnik. Proizvodstvo i raspredelenie elektricheskoj energii. Tom 3, Kniga 1 [Electrotechnical directory. Production and distribution of electric energy. Vol.3, Book 1]. Moscow, Ener-goatomizdat Publ., 1988. 880 p. **21.** Baranov M.I. Raschetno-eksperimental'noe obosnovanie sushhestvovanija debrojlevskih elektronnyh poluvoln v metallicheskom provodnike s impul'snym tokom bol'shoj plotnosti [Numerical and experimental justification for the existence of de Broglie electronic half-waves in a metallic conductor with a pulse current of high density]. Visnyk NTU "KhPI" - Bulletin of NTU "KhPI", 2013, no.60 (1033), pp. 3-12. 22. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzelskyi O.S., Dnyschenko V.N. Generator toka iskusstvennoj molnii dlja naturnyh ispy-tanij tehnicheskih ob'ektov [A current generator of the artificial lightning for full-scale tests of technical objects]. Pribory i tekhnika eksperimenta - Instruments and experimental techniques, 2008, no.3, pp. 81-85. 23. Belorussov N.I., Saakjan A.E., Jakovleva A.I. Elektricheskie kabeli, provoda i shnury: Spravochnik [Electrical cables, wires and cords: Directory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 536 p.

Поступила (received) 05.02.2014

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с., НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ", 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47 тел/phone +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

#### M.I. Baranov

Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" 47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine

Quantum-wave nature of electric current in a metallic

**conductor and some of its electrophysical macro-phenomena.** The paper presents results of theoretical and experimental research on wave longitudinal and radial distribution of drifting free electrons in a round homogeneous metallic conductor with a pulse axial current. The studies reveal quantum-wave character of electric conduction current flow in the conductor examined, which results in a phenomenon of quantized periodic macro-localization of free electrons in the conductor inner structure.

*Key words* – metallic conductor, electric current, drifting free electrons, electronic half-waves, phenomenon of macro-localization of electrons.

В.Я. Кутковецький

# ЗАКОН ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

Математичні моделі закону електромагнітної індукції, які не ураховують обмеження Фарадея, не у повній мірі відповідають фізичному явищу і тому не є законами. Їх неповна відповідність реальним пристроям приводить до "парадоксів": необмеженої величини магнітного поля уніполярних генераторів, нескінченним розмірам індукторів модельованих машин постійного та змінного струму тощо.

Математические модели закона электромагнитной индукции, которые не учитывают ограничения Фарадея, не в полной мере соответствуют физическому явлению и поэтому не являются законами. Их неполное соответствие реальным устройствам приводит к "парадоксам": неограниченной величине магнитного поля униполярных генераторов, бесконечным размерам индукторов моделируемых машин постоянного и переменного тока и т.д.

"На нас (вчених) лежить обов'язок потурбуватись про розповсюдження і розвиток не лише істинних наукових принципів, але й духу здорового критицизму при розгляді даних, на яких базуються твердження, що здаються науковими".

Дж. К. Максвелл.

#### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У сучасних виданнях [1, 3-6, 14, 16, 17] згідно закону електромагнітної індукції для розрахунку електрорушійної сили (ЕРС) використовується формула, яка зветься "законом Фарадея"

$$e_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt},\tag{1}$$

де  $d\Phi_1$  – зміна магнітного потоку контуру, що викликана будь-якою причиною; dt – крок у часі.

Стаття присвячена аналізу фізичних та математичних неузгодженостей, які випливають з формули (1):

1. Формула (1) не у повній мірі відповідає фізичним умовам створення ЕРС за Фарадеєм, бо стосовно її в [1, 3-6, 14, 16, 17] не згадується основне лінгвістичне обмеження, яке сформулював Фарадей – ЕРС створюється <u>при перетинанні провідниками контуру</u> магнітних силових ліній.

2. Наведена в [1, 3-6, 14, 16, 17] формула (1) насправді суперечить деяким експериментам [12, с. 83-86].

3. Для уніполярного генератора з формули

$$e_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} = E = \text{const}$$
(2)

отримуємо відомий <u>"*napadokc*"</u> зростання у часі до нескінченності магнітного потоку  $\Phi_2$ .

4. "Закон Фарадея" (1) прямо суперечить експерименту, <u>проведеному Фарадеєм у 1831 р.</u> на "<u>диску</u> <u>Фарадея</u>" (уніполярному генераторі, у якому мідний диск обертався у магнітному полі постійного магніту), бо в цій машині при дотриманні рівності (2) магнітний потік у "<u>диску Фарадея</u>" є мінімальним і не змінюється у часі ( $\Phi_2 \approx 0 = \text{const}$ ).

5. При  $d\Phi_1 > 0$  та  $dt > 0 \in <u>математичним "пара-</u>$  $<u>доксом"</u> отримання з формули (1) значення <math>e_1 = 0$ , що спостерігається у деяких експериментах [12, с. 83-86].

6. При зміні часу у межах  $t = 0...\infty$  і дотриманні рівності (2) таким же <u>математичним "парадоксом"</u> є отримання для уніполярної машини  $\Phi_2 \approx 0 = \text{const}$ , бо у математиці "такого не буває".

#### META

Метою роботи  $\varepsilon$  розгляд на макрорівні відповідності математичних моделей закону електромагнітної

індукції Фарадея реальним пристроям і доведення того, що всі моделі <u>є тотожностями при урахуванні</u> <u>лінгвістичних обмежень Фарадея</u> (необхідність пересічення безперервних магнітних силових ліній провідниками контуру, обмеженість величини магнітного поля реальних пристроїв).

#### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Фарадей у 1831 р. сформулював закон електромагнітної індукції у вигляді твердження "Заряд  $\Delta q$ , який пройшов по замкненому колу, є пропорційним зміні магнітного поля  $\Delta \Phi$  і є зворотно пропорційним опору кола *R*", тобто

$$\Delta q = -\frac{\Delta \Phi}{R} \,. \tag{3}$$

Уніполярний генератор (рис. 1) був створений Фарадеєм у 1831 р. для демонстрації наведення ЕРС і складався з постійного магніту 1 та мідного диску 2, що обертався між полюсами N та S магніту 1 [15].



Рис. 1. Генератор Фарадея

ЕРС знімалась щітками і вимірювалась гальванометром G.

Фарадей ввів поняття магнітного поля  $\Phi$  та його зміни  $\Delta \Phi$ , створив "мову" магнітних силових ліній і прийшов до висновку, що <u>вирішальною умовою вини-</u> кнення індукційних струмів є пересічення **провідни**ком магнітних силових ліній.

З формули Фарадея (3) випливає закон Ома I = U/R, де I -струм; U -напруга, а також дві раніше найбільш розповсюджені у фаховій літературі 1950-1980 років формули для розрахунку ЕРС згідно закону електромагнітної індукції, яких ми далі будемо дотримуватись:

1. Закон у формулюванні Фарадея [2]

$$e_2 = BL_{\Pi}V, \qquad (4)$$

де  $e_2$  – ЕРС; B – модуль (абсолютна величина) магнітної індукції;  $L_{\Pi}$  – довжина провідника; V – модуль швидкості руху провідника у напрямку, перпендику-
лярному довжині  $L_{\Pi}$ , який ураховує перетинання провідником магнітних силових ліній.

2. Закон у формулюванні Максвелла [2, 14]

$$e_3 = -\frac{d\Phi_3}{dt}, \quad rotE_3 = -\frac{\partial B_3}{\partial t},$$
 (5)

де  $d\Phi_3$  – зміна магнітного потоку контуру, що викликана будь-якою причиною;  $E_3$  – напруженість електричного поля;  $B_3$  – магнітна індукція.

Тут формула (5) співпадає за змістом з формулою (1), але наведена окремо <u>із-за різниці у назві</u>. Це демонструє додатковий напрямок суперечностей у застосуванні закону електромагнітної індукції.

Аналітичну форму закону (4) можна перетворити на диференційну форму (5). Для цього добуток  $\Delta S = L_{\Pi}V$  в формулі (4) розглядають як деяку площу  $\Delta S$ , пройдену у магнітному полі провідником за одиницю часу, а величину  $e_2 = \Delta \Phi = B \Delta S$  розглядають як зміну кількості магнітних силових ліній магнітного поля контуру за одиницю часу.

В.Ф. Миткевич [12] розрізняв:

- закон Фарадея:

$$e_4 = -\frac{d\Phi_4}{dt},\tag{6}$$

де  $\Phi_4$  – кількість пересічених провідниками контуру магнітних силових ліній;

- і закон Максвелла (5). Він стверджував, що формула (6) ближче до суті фізичного процесу і є стабільно універсальною у порівнянні з формулюванням Максвелла (5).

В.Ф. Миткевич дав опис ряду експериментів для доведення, що, на противагу закону Максвелла (5), закон Фарадея (6) працює завжди. Один з цих прикладів необхідності перетинання магнітних силових ліній провідниками контуру для отримання ЕРС приведений на рис. 2 (експеримент виконаний В.Ф. Миткевичем у 1901 р. [12, с. 83]). По первинній обмотці трансформатора  $w_1$  протікає постійний струм і створює у магнітопроводі постійний магнітний потік  $\Phi_5$ . Один виток вторинної обмотки  $w_2 = 1$  з включеним у ньому гальванометром *G* при ковзанні по електропровідному "кільцю" "стрибком" змінює свій магнітний потік з нуля на  $\Phi_5$ . Але при цьому за законом Максвелла (5) ЕРС не створюється, і для витка  $w_2$  ми маємо співвідношення

$$e_5 = -\frac{d\Phi_5}{dt} = 0,\tag{7}$$

де  $\Phi_5$  – магнітний потік, отриманий контуром обмотки  $w_2 = 1$  рис. 2 <u>без пересічення провідником контуру магні-</u> <u>тних силових ліній</u> (в той же час контрольне увімкнення та вимкнення обмотки  $w_1$  наводить ЕРС в обмотці  $w_2$ ).



1 no. 2. *Hoesing D.* . . Mininkebin in (1901)

В.Ф. Миткевич також стверджував, що в уніполярних машинах ми зустрічаємось із <u>захованою ко-</u> <u>мутацією</u> (тобто вважав, що по провідниках приховано протікає <u>змінний струм</u>) [12]. Але проведений пізніше дослід уніполярного генератора з ізольованим провідником на роторі (рис. 3 [7]) довів, що "захованої комутації" не існує, а у замкненому контурі <u>можна нескінченно довго</u> наводити постійну ЕРС без зростання модуля магнітного потоку контуру до нескінченності.



Рис. 3. Уніполярний генератор

Для аналізу процесу створення ЕРС є зручними уніполярні генератори періодичних імпульсів, перші з яких були побудовані у 30-х роках [13].

Схема обмотки уніполярного генератора прямокутних імпульсів постійного струму наведена на рис. 4,а [8, 9].



Рис. 4. Схема обмотки генератора уніполярних імпульсів

Початки та кінці провідників 1 на циліндричному роторі уніполярного генератора барабанного типу увімкнені до своїх контактних кілець 2, а уніполярний полюс статору 3 є зубчастим і вміщує однакові однойменні полюси, які рівномірно розміщені по колу статора. Ці зубці-полюси статору виділені сірим фоном. Між циліндричним ротором та зубцями-полюсами статора передбачений мінімальний повітряний проміжок, який у ділянці між полюсами статора різко зростає. Провідники 1 циліндричного ротору з'єднані паралельно. За формулою (4) у кожному провіднику 1 генеруються однакові прямокутні імпульси ЕРС однакового напрямку, які спадають майже до нуля, коли провідники попадають у ділянку між полюсами (рис. 4,б).

Уніполярний генератор прямокутних імпульсів ЕРС змінних напрямків Менде Ф.Ф. наведений на рис. 5,а,б [11].



Рис. 5. Багатополюсний уніполярний генератор змінного струму Менде Ф.Ф.

Провідник 1 обертається на валу 2 у магнітному полі магнітів статора 3 і має ковзний контакт 4 з нерухомою електропровідною пластиною 5. У кожного сусіднього магніту спрямування магнітного поля є протилежним. Кількість магнітів дорівнює подвоєній кількості провідників. За формулою (4) генератор генерує у провіднику 1 прямокутні імпульси ЕРС, які спадають майже до нуля, коли провідник попадає у ділянку між полюсами. При обертанні провідника 1 змінна ЕРС у формі рис.5,в знімається з центру нерухомої електропровідної пластини 5 та з валу 2 провідника 1.

#### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Максвелл виклав ідеї Фарадея математично у 1860-х роках, скромно вказавши, що він всього лише ці ідеї "одягнув у вишукану математичну одежу". Тим самим всі лінгвістичні умові створення ЕРС Фарадея визнані Максвеллом базисом і основою створеної ним "математичної одежі" і повинні завжди ураховуватись при використанні моделей (5).

<u>1. Повторення дослідів Фарадея</u>. Автор повторив дослід Фарадея (рис. 1) з урахуванням схеми рис. 3 у дисковому варіанті (рис. 6).



Рис. 6. Принцип роботи уніполярного імпульсного генератора постійного струму: а – схема виконання досліду; б – форма отриманих осцилограм; в – змінена обмотка ротору

Експериментальний уніполярний генератор (рис. 6,а) складається з постійного магніту, між полюсами якого N та S обертається диск 1 з односторонньої друкованої плати з фольгованого склотекстоліту завтовшки 1,5 мм, на якій витравлені верхня доріжка для щітки 2, активний провідник 3 (у ньому наводиться ЕРС) та нижня доріжка для щітки 4. За допомогою щіток ЕРС активного провідника 3 вимірюється осцилографом 5. Магнітна система генератора виконана із залізної шини з перерізом  $30 \times 4$  мм, яка створює у робочому повітряному проміжку машини вузький магнітний полюс шириною 4 мм та довжиною 50 мм вздовж радіусу ротора. Двигун, який з незмінною швидкістю обертає диск 1, не показаний.

При обертанні диска 1 у провіднику 3 (рис. 6,а) наводиться позитивно спрямовані імпульси постійної ЕРС з амплітудою 0,074 В. Форма імпульсів ЕРС наведена на рис. 6,6.

Подальші досліди показали:

• якщо замінити диск 1 рис. 6,а на диск з не витравленим мідним покриттям (аналогічно генератору Фарадея, рис. 1), то створюється "режим короткого замикання" для генерованої ЕРС з протіканням змінних вихрових струмів по електропровідному мідному покриттю дискового ротору. В результаті отримуємо постійну (не імпульсну) напругу 0,016 В, яка є меншою в 4,6 рази порівняно з амплітудою ЕРС 0,074 В по схемі рис. 6,а, що взята за еталон. Якщо зміщувати щітки зпід полюсів магніту вздовж зовнішнього краю не витравленого електропровідного диску, то ця постійна напруга поступово зменшується практично до нуля; • якщо в машині рис. 6,а використати ротор з двома провідниками (рис. 6,в), то частота імпульсів збільшується вдвічі, а амплітуда напруги 0,05 В стає у 1,5 рази менше порівняно з амплітудою ЕРС 0,074 В по схемі рис. 6,а. Напруга зростає у порівнянні з невитравленим ротором із-за збільшення активного опору для вихрових струмів. При іспиті ротора рис. 6,в дві амплітуди напруги, які створювали два активних провідника, відрізнялись між собою на 15 % із-за різниці їх активних опорів;

• додання до схеми рис. 6,а нового магніту, зсунутого на деякий кут відносно першого магніту, з протилежним напрямком магнітної індукції, призводить до отримання на виході ЕРС зі змінними напрямками імпульсів.

З дослідних даних рис. 6 випливає:

1. Напрямок ЕРС залежить від напрямку магнітної індукції полюса.

2. Згідно формули (2) з рис. 6,6 випливає відомий "парадокс": магнітні силові лінії лише входять у робочий контур з навантаженням і поступово збільшують його магнітний потік до нескінченності.

3. Наведення ЕРС в контурі рис. 1 відбувається лише у вузькому "робочому провіднику-секторі" диску, коли він пересікає магнітне поле. В усіх провідниках-секторах, які розміщені зовні дії магнітного поля статору, ЕРС не наводиться, і вони є додатковим навантаженням активно-індуктивного характеру для "робочого сектору".

4. З рис. 6,а та рис. 1 випливає, що провідники контуру вимірювання ЕРС можна розмістити таким чином, щоб його магнітний потік  $\Phi \approx 0$ .

5. Не підтверджується висновок [12], що в уніполярній машині відбувається "захована комутація", бо не можна розглядати мідний диск як механічний перемикач з функціями випрямляча.

2. Можливі конструкції дискового уніполярного генератора. Можна розробити багатополюсні імпульсні уніполярні генератори з одним ізольованим активним провідником на роторі дискового (рис. 7) та барабанного (рис. 8) типів з довільним розміщенням полюсів N та S постійних магнітів, які за один період обернення ротору можуть створювати довільну послідовність імпульсів ЕРС заданої довільної форми та спрямування.



Рис. 7. Багатополюсний уніполярний генератор дискового типу



Рис. 8. Багатополюсний уніполярний генератор барабанного типу: а – поперечний переріз; б – вид збоку

На рис. 9, як приклад, показані можливі схеми багатополюсних уніполярних генераторів дискового типу та можливі вихідні імпульси ЕРС, рядом з якими наведені позначення відповідних полюсів.

Очевидно, що схеми рис. 9 можуть бути використані і в уніполярних генераторах барабанного типу.



Рис. 9. Можливі конструкції багатополюсного уніполярного генератора дискового типу

<u>3. Вірність відображення реального об'єкта</u> <u>математичними моделями закону Фарадея.</u> Всі без винятку відомі <u>математичні моделі</u> закону електромагнітної індукції Фарадея (1), (2), (5), (6) описують не реальний пристрій Фарадея у вигляді рис. 1, а деякий умовний реально не існуючий "фізичний об'єкт", який має у природі не існуючу властивість: індуктор статору, у магнітному полі якого рухається провідник, <u>може бути</u> нескінченно великим у просторі, і тому для уніполярних машин це означає нескінченно велике магнітне поле.

На основі формули "закону Фарадея" (1) цей умовний "фізичний об'єкт" для уніполярного генератора постійного струму та уніполярного синхронного генератора можна відобразити у вигляді рис. 10.



Рис. 10. "Фізичний об'єкт" згідно рівняння (1) для уніполярних генераторів: а – постійного струму; б – синхронного

Тут термін "уніполярний синхронний генератор" використовується умовно – для підкреслення уніполярного характеру наведення змінної синусоїдальної ЕРС і уникнення порівняння із звичайним синхронним генератором. Крім формули (1) ЕРС в обох генераторах рис. 10 можна розрахувати і згідно формули (4): провідники 1 довжиною  $L_{\Pi}$  електрично з'єднані з електропровідними шинами 2 (кільцями) і сумісно з ними рухаються зі швидкістю V у нерухомому магнітному полі індуктора 3 з полюсами N та S при величині магнітної індукції В. Нерухомі щітки ковзання 4 дозволяють передавати ЕРС на навантаження, яке не показане.

Взагалі всі без винятку відомі <u>математичні моделі</u> закону електромагнітної індукції Фарадея (1), (2), (5), (6) без сумніву мають всі ознаки скінченності величини магнітного поля: якщо скінчилось перетинання магнітних силових ліній провідником, то ЕРС не створюється. Очевидно, що і Максвелл підтримувався цих поглядів, бо він дав ідеям Фарадея "лише математичну одежу" – зовнішнє математичне оформлення, а ідеї (опис процесів) належать Фарадею.

У великого Фарадея немає жодних парадоксів в уніполярному генераторі рис. 1. Парадокс полягає у нашому невірному мисленні: чому при переході від алгебраїчної форми розрахунку ЕРС (4) до диференційної форми (5) ми вважаємо цілком природним інтегрувати отримане диференційне рівняння до нескінченності у часі і просторі, а не за Фарадеєм – до реального закінчення пересічення всіх магнітних силових ліній полюсу? Адже ця нескінченність у часі означає нескінченно великі розміри індукторів як уніполярних машин так і машин змінного струму. Чому ми надали магнітному полю уніполярного генератора у природі не існуючу необмежену величину, а потім, при нами ж введеному не обмеженому у часі інтегруванні у цьому магнітному полі, жахаємось, що магнітне поле виявляється нескінченно великим (і звемо це парадоксом)? І разом з тим чомусь ми не звемо парадоксом можливість нескінченного інтегрування у часі магнітного поля машини змінного струму лише тому, що величина магнітного потоку математичної моделі відображує реальність.

Безумовно, що подібна модель рис. 10 є фізично невірною. Вона може бути виправдана лише своєю зручністю: для машин постійного та змінного струмів отримуються адекватні вихідні результати у часі з теоретичною можливістю зміни у часі всіх складових математичної моделі при урахуванні взаємодії компонентів складної системи керування.

Ні Фарадей за формулою (4), ні Максвелл за формулою (5), ні сучасні автори [1, 3, 4, 5, 14, 16, 17] безумовно не розглядали процес зростання до нескінченності модуля магнітного поля в уніполярних машинах (хоча це й прямо випливає з використаних виразів). Хоча по суті всі вони при розгляді створення ЕРС мають на увазі <u>швидкість</u> зміни магнітного поля у часі з перетином магнітних силових ліній провідниками контуру за Фарадеєм при обмежених розмірах індуктора, але проблема існування парадоксу зростання до нескінченності магнітного поля уніполярного генератора [10] вимагає відповідного відображення математичних моделей.

Можна вважати, що всі без винятку відомі <u>ма-</u> <u>тематичні моделі</u> закону електромагнітної індукції Фарадея (1), (2), (5), (6) є тотожними і <u>"працюють"</u> <u>вірно завжди, коли ураховується лінгвістичне обме-</u> <u>ження – вимога Фарадея стосовно перетинання</u> <u>провідниками безперервних магнітних силових лі-</u> ній з урахуванням обмеженості величини магнітного потоку реальних пристроїв) і <u>"не працюють",</u> коли ця вимога не задовольняється.

Обов'язок перевірки власної математичної моделі стосовно дотримання умов Фарадея лежить на самому досліднику.

Треба визнати, що з початкового лінгвістичного формулювання Фарадея, якому відповідає формула (3), можна вивести формулу (1). Але формула (1). як частка "вишуканої математичної одежі теорії Фарадея" все ж була отримана саме Максвеллом і є складовою його системи рівнянь. Чомусь "закон Ома" не змінив своєї назви, хоча цей закон теж випливає з того ж лінгвістичного формулювання Фарадея. Тому, на наш погляд, два закони електромагнітної індукції у формулюванні Фарадея (4) та у формулюванні Максвелла (5) [2] (3 відповідними лінгвістичними обмеженнями Фарадея) все ж більш точно передають у історичному сенсі роботу, виконану двома геніями. Великий Фарадей, який за життя пізнав чимало образ людської гідності, назавжди залишиться у пам'яті людства як символ джерела для океану електричної енергії, у якому зараз ми "купаємось". І немає потреби для нашої зручності приписувати йому формулу (1), бо ия формула без відповідних обмежень Фарадея не є законом: вона не завжди підтверджується експериментами [12], а на додаток прямо суперечить досліду самого Фарадея, бо приводить до розглянутих нами парадоксів.

**4.** Коректність математичних перетворень. Ми звикли до того, що математика завжди вірно відображує фізичні явища. Тому корисно з цього боку розглянути деякі сторони математичного аналізу електромагнітних процесів.

4.1. Припустимо, що в схемі рис. 2 ми використали не один трансформатор, а їх велику кількість при можливості збільшувати чи зменшувати магнітний потік робочого контуру гальванометра G. Така фізична схема буде виконувати операцію математичного диференціювання та інтегрування магнітного потоку контуру гальванометра G, і її робота <u>стосовно зміни</u> <u>магнітного поля контуру</u> не відрізняється від результатів роботи схеми уніполярних генераторів рис. 10. Невідповідність полягає лише в тому, що уніполярні генератори рис. 10 генерують ЕРС, а схема рис. 2 – ні.

Цю невідповідність фізичним процесам для закону електромагнітної індукції Фарадея можна усунути, наприклад, використанням математичної моделі у вигляді

$$e_6 = -P \frac{d\Phi_6}{dt},\tag{8}$$

де *P* – перемикаюча функція, яка приймає значення 1 при виконанні умов Фарадея (пересічення провідником безперервних магнітних силових ліній і фізична обмеженість площі магнітного поля) та приймає значення 0 в іншому випадку.

Формула (8) є більш коректною і нагадує, що ми маємо справу з <u>математичними виразами з обме-</u> женнями.

Вона усуває всі розглянуті нами парадокси, змушує дослідника до перевірки всіх умов теорії Фарадея у досліді, дозволяє вірно визначити інтегральну величину магнітного поля.

4.2. Система рівнянь Максвелла теж повинна ураховувати обмеження Фарадея, наприклад, перемикаючою функцією *P*:

$$rotE = -P \frac{\partial B}{\partial t}; rotH = j + \frac{\partial D}{\partial t}; divD = \rho; divB = 0, (9)$$

де E – напруженість електричного поля; B – магнітна індукція; H – напруженість магнітного поля; j – щільність електричного струму, викликаного рухом зарядів; D – електрична індукція;  $\rho$  – щільність електричного заряду.

Перше рівняння є законом індукції Фарадея; друге рівняння відображує залежність вихрового магнітного поля від щільності електричного струму та зміни електричної індукції; третє рівняння є еквівалентом закону Кулона (електричний заряд є джерелом електричної індукції); четверте рівняння стверджує, що немає інших джерел магнітного поля, крім струмів (магнітних зарядів не існує) [14].

4.3. <u>Згідно математичних канонів диференційного</u> <u>та інтегрального числення</u> не може існувати будь-який реальний об'єкт, робота якого описується математичним рівнянням  $e_4 = -d\Phi_4/dt \neq 0$  і для якого dt > 0, а  $d\Phi_4 = 0$  та  $\Phi_4 = 0$ . Але уніполярний генератор саме цим вимогам і відповідає, бо магнітний потік уніполярного генератору є мінімальним і не змінюється. З математичної точки зору це пояснюється тим, що для робочого контуру ми розглядаємо диференційні рівняння з лінгвістичними умовами, які відрізняються від рівнянь без лінгвістичних обмежень.

Згідно з даними рис. 6,а при використанні диску з не витравленим мідним покриттям (аналогічно генератору Фарадея рис. 1) все мідне покриття ротору можна умовно розділити на окремі сектори. Робочий провідник ротору у вигляді такого сектору при переміщенні в магнітному полі індуктора створює ЕРС, *але водночас <u>при цьому ж переміщенні</u> він виходить з* цієї ділянки (тобто "розриває" контур, не є провідником даного конкретного контуру, в якому він заміщується іншим провідником) і перетворюється для нового робочого контуру на "навантаження" (яке може мати і власну ЕРС). В результаті ЕРС наводиться, хоча магнітний потік робочого контуру не змінюється. Ця фізична особливість по створенню ЕРС уніполярним генератором ураховується у вигляді умови, при дотриманні якої перемикаюча функція в рівняннях (8) та (9) дорівнює 1.

4.4. Результати роботи <u>фізичних об'єктів</u> (рис. 10 з одного боку та рис. 2 з іншого боку) підтверджують <u>вірність математичних вимог</u> щодо урахування <u>для</u> <u>однакових на вигляд формул методу (алгоритму,</u> <u>умов, шляху) їх отримання</u>, що в даному конкретному випадку не виконується у фахових виданнях.

#### ВИСНОВКИ

1. Математична модель закону електромагнітної індукції без лінгвістичних обмежень Фарадея <u>не є</u> <u>законом</u>, може дати невірний розв'язок і привести до фізичних та математичних парадоксів.

2. Всі математичні моделі закону електромагнітної індукції Фарадея, включаючи формулу Максвелла, є тотожностями і повинні або безпосередньо відображувати обмеження Фарадея стосовно умов існування явища електромагнітної індукції, або супроводжуватись лінгвістичними вимогами щодо їх дотримання.

3. Відомий "парадокс" у вигляді нескінченної величини робочого магнітного поля уніполярних машин розповсюджується на всі існуючі електричні машини постійного та змінного струмів і пояснюється тим, що математичні моделі закону Фарадея відображують зручну для аналізу, але не існуючу у дійсності для реальних машин можливість мати нескінченно великий індуктор.

4. Експериментально підтверджено, що в уніполярному генераторі створюється постійна ЕРС без захованої комутації.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики: Навчальний посібник: у 2 кн. Кн. 1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.: Либідь, 2001. – 448 с. 2. Вольдек А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.

3. Гончаренко С.У. Фізика: Довідкові матеріали для абітурієнтів. – К.: Либідь, 1996. – 208 с.

 Дмітрієва В.Ф. Фізика: Навч. посіб. – К.: Техніка, 2008. – 648 с.

5. Зачек І.Р., Кравчук І.М., Романішин Б.М. та ін. Курс фізики: Навчальний підручник. – Львів: Вид-во "Бескид Біт", 2002. – 376 с.

6. Крыжановский В.Г. Физика. Справочник школьника и студента. – Донецк: ООО ПКФ "БАО", 2008. – 464 с.

7. Кутковецький В.Я., Запорожец Ю.М. Взаимодействие проводника с магнитным полем // Электричество. – 1996. – №9. – С. 60-62.

Лившиц А.Л. Униполярный генератор постоянного тока.
 А.с. СССР №104347, класс 21 d, 6 49m от 28.11.1951 г. – 3 с.

9. Лившиц А.Л., Отто М.Ш. Импульсная электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 352 с.

10. Менде Ф.Ф. О физических основах униполярной индукции. Новый тип униполярного генератора // Инженерная физика. – 2013. – №6. – С. 7-13.

11. Менде Ф.Ф. Многополюсный униполярный генератор переменного тока. Електронний ресурс

fmnauka.narod.ru/ug.pdf (18.01.2014).

12. Миткевич В.Ф. Магнитный поток и его преобразования. – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1946. – 258 с.

13. Михайлов-Микулинский М.С. Электромагнитные генераторы периодических импульсов промышленных частот // Электричество. – 1951. – №11. – С. 12-14.

14. Парсел Э. Электричество и магнетизм. – М.: Наука, 1975. – 440 с.

15. Фарадей М. Избранные работы по электричеству. – М.-Л.: Гос. объед. научно-техн. изд-во, 1939. – 304 с.

16. Чолпан П.П. Фізика: Підручник. – Київ: Вища школа, 2004. – 567 с.

17. Энциклопедия для детей. Физика. – Т. 16. – Ч.2. Электричество и магнетизм. Термодинамика и квантовая механика. Физика ядра и элементарных частиц. – М.: Аванта, 2001. – 432 с.

REFERENCES: 1. Bushok G.F., Levandovskiy V.V., Piven G.F. Kurs fiziki: Navchalniy posibnik: u 2 kn. Kn. 1. Fizichni osnovi mechaniki. Electrica i magnetism. Kyiv, Libid Publ., 2001. 448 p. 2. Vol'dek A.I., Popov V.V. Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromehaniku. Mashiny postojannogo toka i transformatory. St.Petersburg, Piter Publ., 2008. 320 p. 3. Goncharenko S.U. Fizika: Dovidkovi materiali dlya abiturientiv. Kyiv, Libid Publ., 1996. 208 p. 4. Dmitrieva V.F. Fizika: Navch. posib. Kyiv, Tehnika Publ., 2008. 648 p. 5. Zachek I.P., Kravchuk I.M., Romanishin B.M. and others. Kurs fiziki: navchalniy pidruchnik. Lviv, Beskid Bit Publ., 2002. 376 p. 6. Krijanovskiy V.G. Fizika. Spravochnik shkolnika i studenta. Donetsk, PKF "BAO" Ltd., 2008. 464 p. 7. Kutkovetskyy V.J., Zaporozec Y.M. Vzaimodeystvie provodnika s magnitnim polem. *Elektrichestvo – Electricity*, 1996, no.9, pp. 60-62. 8. Livshiz A.L. Unipolarniy generator postoyannogo toka [Unipolar DC generator]. Patent USSR, no.104347, 1951, 3 p. 9. Livshiz A.L., Otto M.S. Impulsnaya electritehnika. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 352 p. 10. Mende F.F. O fizicheskih osnovah unipolyarnoi indukcii, Noviy tip unipolyarnogo generatora. Inzhenernaia fizika Engineering Physics, 2013, no.6, pp. 7-13. 11. Mende F.F. Mnogopolusniy unipolarniy generator peremennogo toka (Multipole unipolar AC generator) Available at: http://fmnauka.narod.ru/UG.pdf (accessed 18 January 2013). 12. Mitkevich V.F. Magnitniy potok i ego preobrazovaniya. Moscow-Leningrad, Acad. of Sci. USSR Publ., 1946. 258 p. 13. Mihaylov-Mikulinskiy M.S. Electromagninie generatori periodicheskih impulsov promislennih chastot. Elektrichestvo - Electricity, 1951, no.11, pp. 12-14. 14. Parcel E. Electrichestvo i magnetism. Moscow, Nauka Publ., 1975. 440 p. 15. Faraday M. Izbrannie roboti po electrichestvu. Moscow-Leningrad, Gosudarstvennoe ob'edinennoe nauchno-tehnicheskoe izdatelstvo, 1939. 304 p. 16. Cholpan P.P. Fizyka. Kyiv, Vyshcha shkola Publ., 2004. 567 p. 17. Enciklopedia dlya detey. Fizika. vol.16, part2, Electrichestvo i magnetism. Termodinamika i kvantovaya mechanika. Fizika yadra s elementarnyh chastic. Moscow, Avanta Publ., 2001. 432 p.

#### Надійшла 25.01.2014

Кутковецький Валентин Якович, д.т.н., проф., Чорноморський державний університет їм. Петра Могили, кафедра інформаційних технологій та програмних систем, 54003, Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10, тел/phone +38 0512 366578, e-mail: kb@kma.mk.ua

V.J. Kutkovetskyv

Petro Mohyla Black Sea State University

10, 68-Desantnykiv Street, Mykolaiv, 54003, Ukraine

The law of electromagnetic induction.

Mathematical models of the electromagnetic induction law which do not take into account Faraday's restrictions are not in full accordance with the physical phenomenon and so they are not laws. Their incomplete correspondence with real devices results in such "paradoxes" as unlimited magnetic field of unipolar generators, infinite sizes of inductors for DC and AC machines modeled, and so on.

*Key words* – the laws of electromagnetic induction, Faraday, Maxwell.

УДК 621.318

#### Е.И. Байда

# РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ТОНКУЮ ФЕРРОМАГНИТНУЮ ПЛАСТИНУ В ПРОЦЕССЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

У статі розглянуто розрахунок електромагнітних сил, діючих на тонку феромагнітну пластину у процесі магнітноімпульсної обробки. Наведені якісні та кількісні характеристики.

В статье рассмотрены силы, действующие на тонкую ферромагнитную пластину в процессе магнитно-импульсной обработки. Приведены качественные и количественные характеристики.

Как правило, процессы магнитно-импульсной обработки материала связывают с расчетом электромагнитных сил, действующих на проводящий неферромагнитный материал. Однако более интересным и сложным с научной точки зрения является расчет электромагнитных сил, действующих на проводящий ферромагнетик. Этот вопрос был частично рассмотрен в [3], где при расчетах принят ряд допущений:

• магнитная проницаемость постоянна;

• ток в индукторе синусоидален (частота процесса ω);

• значение тока индуктора задается, хотя эта величина сама является искомой;

• индуктор и заготовка расположены в воздухе и расчетная схема не допускает использование ферромагнитного магнитопровода.

Все вышеупомянутые допущения в совокупности со сложностью формул, полученных операторным методом, усложняют практическое использование полученных результатов.

Цель настоящей статьи – разработка и апробация математической модели расчета электромагнитных сил, действующих на тонкую ферромагнитную пластину на основании численного решения уравнений Максвелла.

Допущения, принимаемые в расчетах:

• рассматривается плоская задача (векторный магнитный потенциал направлен по оси *z*);

• движение ферромагнетика и деформации в данной задаче не рассматриваются.

Расчетные параметры:

• индуктор состоит из шихтованного магнитопровода с катушкой, намотанной медной лентой толщиной 0,1 мм;

• питание катушки происходит от накопительного электролитического конденсатора;

• разряд апериодический;

• магнитные свойства ферромагнетика заданы основной кривой намагничивания;

• катушка представляет собой сплошной "плохой" проводник с равномерно распределенной плотностью тока.

На рис. 1 показан общий вид расчетной системы. Математическая модель.

Математическая модель представляет собой систему уравнений электромагнитного поля, записанную относительно векторного магнитного потенциала и уравнения электрической цепи.





1. Магнитопровод:

$$\sigma_m \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times \left( \frac{1}{\mu_r} \cdot \nabla \times \vec{A} \right) = 0, \qquad (1)$$

где  $\sigma_m$  – эквивалентная проводимость шихтованного магнитопровода, определяемая по тепловым потерям;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $\mu_r = \mu_r(||B||)$  – относительная магнитная проницаемость;  $\vec{A}$  – векторный магнитный потенциал.

2. Окружающая среда:

$$\frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times \left( \nabla \times \vec{A} \right) = 0 , \qquad (2)$$

3. Катушка:

$$\sigma \cdot \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times \left( \nabla \times \vec{A} \right) = \frac{i \cdot w}{S} , \qquad (3)$$

где *i* – ток катушки; *S* – площадь сечения катушки; *w* – число витков.

4. Уравнение электрической цепи:

$$U + E = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt}, \qquad (4)$$

где U – напряжение, приложенное к катушке; E – противо-ЭДС катушки; R – активное сопротивление разрядной цепи; L – суммарная индуктивность внешней разрядной цепи.

Напряжение на конденсаторе определялось формулой:

$$U = \begin{cases} U_{c0} - \frac{1}{C} \cdot \int_{t}^{t} i \cdot dt, & U \ge 0\\ 0, & U < 0 \end{cases},$$
(5)

где U<sub>c0</sub> – начальное напряжение; С – емкость.

Противо-ЭДС определялась на основании [1]:

$$E = -\frac{w}{S} \iiint_{V} \frac{d(\vec{A})_{l}}{dt} \cdot dV , \qquad (6)$$

где  $(\vec{A})_{l}$  – проекция векторного потенциала на направление обхода контура.

Определения электромагнитных сил.

Известно [2], что сила, действующая на немагнитный проводящий материал, может быть определена по формуле:

$$\vec{Q} = \int_{V} (\vec{j} \times \vec{B}) \cdot dV , \qquad (7)$$

где Q – сила; j – плотность тока; B – магнитная индукция; V – объем.

В случае магнетика, выражение (7) должно быть дополнено [2]:

$$\vec{Q} = \iint_{V} \left( (\vec{j} \times \vec{B}) + \frac{\mu_{r} - 1}{2 \cdot \mu_{0} \cdot \mu_{r}} \cdot \nabla \cdot \left( B^{2} \right) \right) \cdot dV .$$
(8)

Интерес представляет каждое из слагаемых в (8), так как их действие противоположно. Однако вычисление второго слагаемого силы может вносить существенную погрешность в вычислительный процесс (особенно при значительном насыщении заготовки). Поэтому для вычисления этого слагаемого можно воспользоваться положением, что сила, определяемая при помощи тензора Максвелла, представляет собой суммарную силу [2].

Эта сила определяется:

$$\vec{Q} = \frac{1}{2} \cdot \int_{F} \left( \vec{H} \cdot (\vec{B} \cdot \vec{n}) + \vec{B} \cdot (\vec{H} \cdot \vec{n}) - (\vec{H} \cdot \vec{B}) \cdot \vec{n} \right) \cdot dF , \quad (9)$$

где  $\vec{H}$  – напряженность поля;  $\vec{n}$  – вектор внешней нормали; F – поверхность интегрирования.

В этом случае, сила притяжения заготовки к индуктору определится:

$$\vec{Q}_m = Q - Q_l \,, \tag{10}$$

где

$$\begin{split} \vec{Q}m &= \int_{V} \left( \frac{\mu_{r} - 1}{2 \cdot \mu_{0} \cdot \mu_{r}} \cdot \nabla \cdot \left( B^{2} \right) \right) \cdot dV ; \\ \vec{Q}_{l} &= \int_{V} \left( \left( \vec{j} \times \vec{B} \right) \right) \cdot dV ; \\ \vec{Q} &= \frac{1}{2} \cdot \int \left( \vec{H} \cdot \left( \vec{B} \cdot \vec{n} \right) + \vec{B} \cdot \left( \vec{H} \cdot \vec{n} \right) - \left( \vec{H} \cdot \vec{B} \right) \cdot \vec{n} \right) \cdot dA . \end{split}$$

#### Исходные параметры.

A

Для всех рассматриваемых вариантов были выбраны следующие данные:

- проводимость пластины 1,12·10<sup>7</sup> См/м;
- толщина пластины 1,5 мм;
- число витков катушки 46;
- начальное напряжение на конденсаторе 270 B;
- емкость 660 мкФ;
- сопротивление разрядной цепи 0,09 Ом;
- внешняя индуктивность рассеяния − 1·10<sup>-7</sup> Гн.

В случае расчета для ферромагнетика, материал для магнитопровода и пластины задавался основной кривой намагничивания (рис. 2) с интерполяционным продолжением при выходе индукции за границы табличных значений.



Рис. 2. Кривая намагничивания ферромагнетика

Эквивалентное сопротивление шихтованного магнитопровода определялось приближенно, исходя из удельных потерь на переменном токе.

Расчет проводился для трех вариантов:

1. Неферромагнитная пластина расположена над ферромагнитным магнитопроводом с катушкой.

2. Ферромагнитная пластина расположена над катушкой без ферромагнитного магнитопровода.

3. Ферромагнитная пластина расположена над ферромагнитным магнитопроводом с катушкой.

#### 1. Неферромагнитная пластина расположена над ферромагнитным магнитопроводом с катушкой.

Очевидно, что в этом случае силы, рассчитанные по тензору Максвелла и формуле Лоренца должны совпадать (сила магнитного притяжения равна нулю). Это и отражено на рис. 3.



Рис. 3. Значение сил, действующих на пластину

Как следует из рис. 3, по мере уменьшения скорости нарастания, а затем и спадания тока в катушке, значения которого показаны на рис. 4, сила уменьшается и меняет знак.



2. Ферромагнитная пластина расположена над

катушкой без ферромагнитного магнитопровода. В данном случае электромагнитная сила, действующая на пластину, определяется двумя составляющими (8). Значения сил показаны на рис. 5.



Рис. 5. Значения электромагнитных сил, действующих на ферромагнитную пластину (индуктор без ферромагнитного сердечника)

Из рис. 5 следует, что силы Лоренца и силы электромагнитного притяжения значительны, но при этом они частично компенсируют друг друга. При данных параметрах разрядного контура силы отталкивания являются преобладающими в начальные моменты времени. Причем, магнитная сила так же меняет знак, что можно объяснить изменением направления индуцированного тока и, следовательно, направлением индукции.

На рис. 6 показано значение тока катушки.

Большие амплитудные значения тока и большая скорость его нарастания определяется меньшим эквивалентным значением индуктивности разрядного контура по сравнению с предыдущим расчетом.



**3. Ферромагнитная пластина расположена над** ферромагнитным магнитопроводом с катушкой. Значения сил показаны на рис. 7.



Рис. 7. Значения электромагнитных сил, действующих на ферромагнитную пластину (индуктор с ферромагнитным сердечником)

Из рис. 7 следует, что сила и длительность ее воздействия на заготовку несколько больше, чем в предыдущем случае.

Ток катушки показан на рис. 8.



Так как последний случай представляет наибольший практический интерес, то рассмотрим его более подробно. На рис. 9 показаны распределения магнитной индукции в пластине в различные моменты времени.



Рис. 9. Распределение магнитной индукции по толщине пластины в различные моменты времени

Из рис. 9 следует, что значения индукции достигают значений индукции насыщения по краям пластины уже за время 0,1 мс (минимум индукции в центре пластины). Тем не менее, неравномерность индукции по толщине пластины в той или иной степени сохраняется. Для изменения направления суммарной силы необходимо уменьшить скорость нарастания тока в катушке увеличив (как пример) внешнюю индуктивность до значения  $5 \cdot 10^{-4}$  Гн. На рис. 10 показаны значения электромагнитных сил, на рис. 11 – значения тока.





Рис. 10. Направление электромагнитных сил

Рис. 11. Ток разрядного контура при увеличенной внешней индуктивности

#### Выводы.

Предложенная математическая модель может успешно применяться для расчета сил, действующих на ферромагнетик.

Значения и направления сил существенно зависят от параметров разрядного контура.

Ферромагнитный шихтованный магнитопровод увеличивает значения силы, действующей на заготовку, более чем на 30 % по сравнению с нешихтованным.

Соотношение сил отталкивания и притяжения существенно зависит от проводимости обрабатываемого материала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.

2. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М: Государственное издательство научно-технической литературы, 1954. – 620 с.

3. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Щиголева С.А. Направление сил, действующих на листовой ферромагнетик, в зависимости от временных характеристик при МИОМ // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №3. – С. 56-61.

**REFERENCES:** *1.* Klymenko B.V. *Forsirovannye elektromagnitnye sistemy* [Forced electromagnetic systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 160 p. *2.* Tamm I.E. *Osnovy teorii elektrichestva* [Fundamentals of electricity theory]. Moscow, State scientific-and-technical literature Publ., 1954. 620 p. *3.* Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Schigoleva S.A. Direction of force action on sheet ferromagnetic as function of time characteristics under electromagnetic forming. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2011, no.3, pp. 56-61.

#### Поступила (received) 10.04.2014

Байда Евгений Иванович, к.т.н., доц., Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел/phone +38 057 7076976, e-mail: baida\_kpi@i.ua

#### E.I. Baida

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Calculations of electromagnetic forces acting on a thin ferromagnetic plate during magnetic-pulse treatment.

The article describes forces acting on a thin ferromagnetic plate under magnetic-pulse treatment. Qualitative and quantitative characteristics are given.

*Key words* – ferromagnetic plate, Lorentz force, magnetic pulse treatment.

### УДК 621.3.002.5

Н.И. Бойко, Л.С. Евдошенко, В.М. Иванов, С.Ф. Коняга

# ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СИНТЕЗ-ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЪЁМНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ: КОРОННОГО И БАРЬЕРНОГО

В заводських умовах проведено апробацію створеного високовольтного комплексу (установки), який складається з двох генераторів імпульсів з частотою проходження імпульсів до 50000 імп/с і навантаження у вигляді реакторів з імпульсними розрядами – коронним і бар'єрним. У якості комутаторів енергії використано транзисторні (IGBT) ключі. Отримано раціональний режим конверсії (парового риформінгу) метану у складі коксового газу в синтез-газ за допомогою створеної установки. Для зменшення питомих енерговитрат на одержання синтез-газу при конверсії використано односпрямовану дію імпульсних розрядів, температури парогазової суміші і нікелевого каталізатора. Описано можливий механізм такої конверсії.

В заводских условиях проведена апробация созданного высоковольтного комплекса (установки), состоящего из двух генераторов импульсов с частотой следования до 50000 имп/с и нагрузки в виде реакторов с импульсными разрядами – коронным и барьерным. В качестве коммутаторов энергии использованы транзисторные (IGBT) ключи. Получен рациональный режим конверсии (парового риформинга) метана в составе коксового газа в синтез-газ при помощи созданной установки. Для уменьшения удельных энергозатрат на получение синтез-газа при конверсии использовано однонаправленное действие импульсных разрядов, температуры парогазовой смеси и никелевого катализатора. Описан возможный механизм такой конверсии.

#### введение

Электротехнологии перспективны для современной промышленности, энергетического комплекса, рационального получения экологически чистых источников энергии [1-3]. В [1] показана перспективность применения барьерного разряда при использовании никелевого катализатора в виде мелкого песка для получения ценного энергетического сырья - синтез-газа (H<sub>2</sub> + CO в различных процентных соотношениях) путем парового риформинга (паровой конверсии) метана в лабораторных условиях. Однако до сих пор исследования проводились в лабораторных условиях и при малых расходах исходного газа (производительностях) [1]. В этих исследованиях использовались высоковольтные источники переменного напряжения. Источники высоких импульсных напряжений (ИВИН) с частотами следования импульсов до 50000 имп./с, насколько авторам известно, не использовались. Но именно ИВИН позволяют получать наибольшие рабочие напряжения и напряженности в высоковольтных разрядах и, следовательно, существенно увеличить среднюю энергию электронов в разрядах до 7÷10 эВ, а, возможно, и более. Это открывает новые перспективы уменьшения удельных энергозатрат при получении синтез-газа на основе электроразрядных электрофизических технологий.

Цель работы – создание установки с генераторами объёмных высоковольтных импульсных разрядов (коронного и барьерного), обеспечивающих конверсию (риформинг) метана (в составе коксового газа) в синтез-газ в заводских условиях, и отработка рационального режима её работы.

### СХЕМА И ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ЧЕРТЫ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА УСТАНОВКИ

Пилотный вариант установки, названной высоковольтным комплексом, описан в [2]. Схема опытного образца установки для осуществления в заводских условиях электротехнологии получения синтез-газа с использованием коронного и барьерного разрядов приведена на рис. 1. Отличительной чертой установки является наличие двух синхронно работающих генераторов импульсов. Высоковольтные импульсы от генераторов имеют различную амплитуду, форму и частоту следования. Нагрузкой одного генератора является реактор с импульсным коронным разрядом в газовой смеси коксового газа с водяным паром, а нагрузкой второго – реактор с импульсным барьерным разрядом. Емкость С<sub>п</sub> между высоковольтными электродами реакторов  $C_{\pi} < 1$  пФ. Реактор с барьером заполнен промышленным никелевым катализатором. Такое построение установки (электротехнического комплекса) позволяет осуществить двухступенчатую обработку исходной газовой смеси. На рис. 1 индексы "б" и "к" означают, что величина относится к барьерному и коронному блоку установки соответственно; ИП – источник питания, СУ – система управления, VT - IGBT-ключ, ИТ - импульсный трансформатор, коэффициент трансформации к<sub>тк</sub>=130 в трансформаторе для реактора с коронным разрядом, ктб=50 в трансформаторе для реактора с барьером, Со – основная накопительная ёмкость в виде электролитических конденсаторов, C<sub>0</sub>=4×470 мкФ, C<sub>1</sub> – сильноточная ёмкость, C<sub>1</sub>=4 мкФ, L – развязывающая индуктивность, в ветвь которой включен предохранитель, на рис. 1 не показанный,  $L \approx 1$  мГн, VDS – обратный диод транзисторного IGBT-ключа, R<sub>3</sub> – защитное сопротивление, R<sub>3к</sub>=41 кОм, R<sub>36</sub>=1,7 кОм, Р – реактор, кат – катализатор в реакторе, содержащем диэлектрический барьер из кварцевого стекла, С<sub>п</sub> – паразитная ёмкость между высоковольтными вводами реакторов, *l* – длина закраины на цилиндре из кварцевого стекла, *l*=20 мм, стрелками показано направление движения парогазовой смеси.

В обоих генераторах транзисторные ключи работают в режиме размыкающих коммутаторов (см. рис. 1, 2). В этом режиме энергия, предварительно накопленная в конденсаторах низковольтной цепи каждого



из двух импульсных трансформаторов, передается в нагрузку – реактор с импульсным объёмным разрядом (коронным или барьерным) через промежуточный индуктивный накопитель, которым является индуктивность намагничивания каждого импульсного трансформатора. Такой способ передачи энергии в нагрузку позволяет избежать принципиальных ограничений по амплитуде импульсов напряжения на нагрузке, имеющих место, когда транзисторный ключ работает в режиме замыкающего коммутатора [4].

На рис. 2 приведена схема замещения генератора: VT – транзисторный IGBT коммутатор, VD – встроенные в транзисторы обратные диоды IGBTключа,  $C_{\rm H}$  – низковольтная исходно заряженная ёмкость;  $C'_{\rm p}, C_{\rm p}$  – приведенная и реальная ёмкость высоковольтного реактора соответственно,  $C'_{p} = \kappa^{2}_{T}C_{p}$ ;  $C_{3\kappa}$  – "эмиттер-коллектор" IGBT-ключа, ёмкость С<sub>эк</sub><<С'<sub>p</sub><<С<sub>н</sub>; L<sub>µ</sub> – индуктивность намагничивания ИТ;  $L_{\rm sh}$ ,  $L'_{\rm sb}$  – индуктивности рассеяния первичной и приведенная вторичной обмоток ИТ соответственно; С'1, С'2 – емкости высоковольтного и низковольтного плеч емкостного делителя напряжения ЕДН (в неприведенном к первичной обмотке ИТ виде, т.е. реальные ёмкости  $C_1 \approx 2,8$  пФ, а  $C_2 = 14,7$  нФ, коэффициент деления К<sub>д</sub>≈5250) с согласующим сопротивлением *R*<sub>c</sub>;  $R'_{\rm P}$  – приведенное активное сопротивление  $R_{\rm P}$  коронного разряда в реакторе,  $R'_{\rm P} = R_{\rm P} / \kappa_{\rm T}^{2}$ ;  $i_{\rm k}$ ,  $i'_{\rm p}$ ,  $i_{\mu}$  – коллекторный ток, приведенный ток через нагрузку-реактор, ток намагничивания соответственно (показаны стрелками); *V* – вольтметр.

Емкостный делитель, при помощи которого проводились измерения импульсных напряжений на реакторах, описан в [5]. Каждый из двух генераторов состоит из источника питания, низковольтного генератора стартовых импульсов с IGBT-ключом, импульсного повышающего трансформатора ИТ с нелинейной высоковольтной нагрузкой в виде реактора с коронным или барьерным разрядом и системы управления СУ.

Принципиально важным при работе генераторов с транзисторными ключами в качестве размыкающих коммутаторов является отсутствие тока в нагрузке реакторах (на рис. 2 приведенный к первичной обмотке трансформатора ток і'р в реакторе) в моменты размыкания ключей. Наличие такого тока приводит к появлению коротких, но больших по амплитуде перенапряжений на транзисторных ключах. Эти перенапряжения могут превысить допустимые напряжения между коллектором и эмиттером в транзисторах ключа и привести к выходу из строя транзистора в ключе. Режим работы каждого генератора, при котором в момент размыкания транзисторного ключа ток в реакторе отсутствует, обеспечивается соблюдением условий  $U_0 = U'_p$ ,  $U_{3\kappa} = 0$  в этот момент. При этом коллекторный ток *i*<sub>k</sub> и ток намагничивания *i*<sub>µ</sub> протекают и равны друг другу. В отсутствие приведенного тока через реактор коллекторный ток и ток намагничивания - это один и тот же ток. Отличительной чертой режима коммутации энергии в ёмкость реактора из индуктивности намагничивания путем размыкания транзисторного ключа является возможность её (энергии) полной передачи независимо от величин этих ёмкости и индуктивности.

$$L_{\mu} \times i_{\mu}^{2} = C_{p}^{'} \times U_{p}^{'2} = C_{p} \times U_{p}^{2}, \text{ откуда}$$

$$U_{p} = i_{\mu} \times (L_{\mu}/C_{p})^{1/2}.$$
(1)

Такая возможность отсутствует, когда транзисторный ключ работает в режиме замыкающего коммутатора, передающего энергию из основного низковольтного накопителя  $C_{\rm H}$  в ёмкость реактора  $C'_{\rm p}$ , минуя  $L_{\mu}$ . В последнем случае энергия будет полностью передана в реактор только при  $C'_{\rm p} = C_{\rm H}$ .





Из (1) следует, что напряжение на реакторе  $U_p$  пропорционально току намагничивания. Напряжение на реакторе ограничивается напряжением, которое может выдержать без выхода из строя транзисторный ключ при его размыкании.

Между исходным и результирующим составом смеси, в который входит синтез-газ, могут иметь место различные промежуточные вещества, возникающие в результате протекания процессов в плазме импульсных коронного и барьерного разрядов. Эти процессы протекают в присутствии катализатора при воздействии активных микрочастиц, в том числе электронов, сильных электрических и магнитных полей, высоких напряжений и сильных импульсных токов, широкополосного излучения.

Фото импульсного коронного разряда при отрицательной полярности коронирующего (высоковольтного) электрода приведено на рис. 3,а, а при положительной – на рис. 3,б.





#### РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ В ЗАВОДСКИХ УСЛОВИЯХ

На рис. 4 приведена блок-схема конверсии (парового риформинга) коксового газа (как прямого, так и обратного), по которой в заводских условиях осуществлена апробация созданной установки и предлагаемой технологии конверсии коксового газа с использованием импульсных разрядов: коронного и барьерного. Апроба-

К осциллографу

ция проведена на Ясиновском коксохимическом заводе (ЯКХЗ) (г. Макеевка, Украина). На рис. 4: 1 – вход коксового газа из стояка или подающего патрубка в установку для парового риформинга (конверсии), 2 - патрубок для отвода части коксового газа из стояка подающего патрубка в экспериментальную или установку для риформинга, 3 – задвижка, 4 – патрубок с отводом для ввода водяного пара, 5 - вход водяного пара в установку, 6 – инжектор парогазовой смеси, 7 – патрубок для нагрева парогазовой смеси, 8 – нагреватель парогазовой смеси, 9 - патрубок-отвод для отбора проб газа до реакторов, 10, 15 - высоковольтные изоляторы, 11 - реактор с коронным разрядом, 12, 13 - генераторы высоковольтных импульсов, 14 - барьерный реактор, заполненный катализатором, 16 - патрубок для отвода газа после реакторов, 17 – заслонка (шибер), 18 – выход газа после риформинга в реакторах (здесь производится отбор проб для определения компонентного состава газа после реакторов).

В реакторах происходит паровой риформинг по известной реакции [1]:  $CH_4 + H_2O + W_{\text{мол}} = CO + 3 \times H_2$ , где  $W_{\text{мол}}$  – вводимая удельная энергия, приходящаяся на одну молекулу. В парогазовой смеси для парового риформинга отношение количества водяного пара к количеству метана в составе коксового газа находилось в диапазоне  $2 < H_2O / CH_4 < 4$ .

Осциллограммы импульсов напряжения на реакторе с коронными разрядами (период повторения импульсов – примерно 400 мкс) и на реакторе с барьером (период повторения импульсов – примерно 60 мкс) представлены на рис. 5. На рис. 5,а указаны амплитудно-временные характеристики импульсов с емкостного делителя напряжения [4], подключенного к реактору с коронными разрядами, а на рис. 5,б – амплитудно-временные характеристики импульсов с подобного делителя напряжения, подключенного к реактору с барьером.



Регистрирующее устройство – двухканальный цифровой осциллограф RIGOL DS1102E с полосой пропускания 100 МГц.



Рис. 5

Основные действующие факторы при рациональном двухступенчатом паровом риформинге метана в синтез-газ с использованием импульсных коронного и барьерного разрядов в присутствии катализатора: температура 600-700 °С; факторы от объёмных разрядов (коронного и барьерного): микрочастицы, начиная с электронов, плазма, широкополосное излучение; катализатор, действие которого усилено импульсными токами и разрядами; плазмохимические реакции, интенсифицированные перечисленными выше факторами и наличием в рабочей зоне реакций водяных паров.

Установка работает следующим образом (см. рис. 4). Подлежащий конверсии коксовый газ 1 через патрубок 2 подается на вход установки. Проток коксового газа регулируется задвижкой 3. Регулируемый поток водяного пара 5 на вход установки подается через патрубок 4 с отводом. Перед инжектором 6 образуется парогазовая смесь из коксового газа и водяного пара, которая при помощи инжектора подается в патрубок 7, где при помощи внешнего нагревателя 8 нагревается до требуемой температуры. Перед входом нагретой парогазовой смеси в реактор 11 с коронным разрядом через патрубок 9 производится отбор пробы этой (исходной) смеси для определения её состава. Из патрубка 7 парогазовая смесь подаётся в реактор 11 с коронным разрядом, где осуществляется первая стадия конверсии парогазовой смеси. Импульсы высокого напряжения, обеспечивающие получение импульсного коронного разряда в реакторе 11, от генератора 12 по проводнику через изолятор 10 подаются в реактор 11. Низковольтный вывод генератора 12 накоротко соединен с внешней трубой – корпусом реактора 11. Из реактора 11 частично активированная и преобразованная парогазовая смесь подаётся в барьерный реактор 14 с промышленным катализатором "кат". Барьер из кварцевого стекла обеспечивает барьерный разряд в реакторе 14 и протекание сильного импульсного тока через катализатор. Импульсы высокого напряжения на реактор 14 подаются от генератора 13 по проводнику через изолятор 15. Низковольтный вывод генератора 13 накоротко соединен с внешней трубой - корпусом реактора 14. Корпуса реакторов 11 и 14 накоротко соединены между собой и заземлены. В реакторе 14 осуществляется вторая стадия конверсии и получение синтез-газа. Из реактора 14 результирующая газовая смесь поступает в патрубок 16, в котором расположена заслонка (шибер) 17 для регулировки потока газовой смеси. На выходе 18 из патрубка 16 производится отбор проб для определения компонентного состава газа после реакторов.

#### ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ КОНВЕРСИИ МЕТАНА В СИНТЕЗ-ГАЗ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТОЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ РАБОТЫ КАТАЛИЗАТОРА БЕЗ РАЗРЯДОВ

В реакторе с коронным разрядом, расположенном первым по ходу движения коксового газа, образуются электроны с энергией порядка 10 эВ и более, набранной в электрическом поле импульсного коронного разряда. Эти электроны приводят к возбуждению, частичной диссоциации и ионизации молекул метана в составе коксового газа и запускают различные плазмохимические реакции.

При увеличении температуры а, следовательно, и энергии тяжелых микрочастиц (молекул, атомов, ионов, радикалов) плазмохимические реакции будут протекать интенсивнее. В барьерном реакторе, заполненном промышленным никелевым катализатором, протекает импульсный ток, вызванный генератором высоковольтных импульсов. Этот ток в барьере (из кварцевого стекла) является током смещения, а в никелевой катализаторной засыпке – током проводимости. Ток в барьерном реакторе активирует никелевый катализатор даже при пониженных температурах. Это приводит к дальнейшему риформингу метана в синтез-газ. Однако, при пониженных температурах 100-300 °C влияния катализатора на процесс риформинга не достаточно. Кроме того, при температурах менее 550 °C из коксового газа (особенно прямого) на никелевом катализаторе выпадает осадок из смолистых веществ и засоряет катализатор, приводя к ухудшению результатов риформинга.

#### НЕОБХОДИМОЕ УСЛОВИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОВОГО РИФОРМИНГА МЕТАНА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

Для эффективного парового риформинга метана в присутствии высоковольтных разрядов удельная энергия  $W_{\text{мол.}}$ , вводимая в реакторы, должна быть не менее  $W_{\text{мол.}\min} \approx 1$  эВ/молекула [1]. Отсюда следует, что требуемая минимальная плотность энергии составляет

 $W_{\text{уд.min}} \approx W_{\text{мол.min}} \times N_{\text{A, M3}} = (1 \text{ эВ/молекула}) \times 2,687 \times 10^{25} \text{ мо$  $лекул/м}^3 = (1,6 \times 10^{-19} \text{Дж/молекула}) \times 2,687 \times 10^{25} \text{ моле$  $кул/м}^3 \approx 4,3 \times 10^6 \text{Дж/м}^3 \approx 1,2 \text{ кВт×ч/м}^3,$ 

где  $W_{\rm yg.\ min}$  – требуемая минимальная плотность энергии в реакторе,  $N_{\rm A,\ M3}$  – число Лошмидта, число молекул, находящихся в 1 м<sup>3</sup> идеального газа при нормальных условиях.

Компонентный состав отобранного газа до и после реакторов как результат экспериментов по использованию импульсных коронного и барьерного разрядов при паровом риформинге прямого коксового газа в синтез-газ в заводских условиях приведен в табл. 1.

						гаоли	ца і
Место отбора		Coci	гав газа	a, %	объем	иные	
Wieero oroopa	$\mathrm{CO}_2$	O <sub>2</sub>	$C_{m}H_{n} \\$	CO	$H_2$	$\mathrm{CH}_4$	$N_2$
До реакторов	1,0	0,7	2,3	6,3	60,4	26,0	3,3
После реакторов	4,5	0,6	0,0	2,6	83,3	7,8	1,2

Отбор газа производился при следующих условиях: сырье – прямой коксовый газ, давление пара перед инжектором – 0,35 атм, температура смеси после реакторов – 290 °C, расход парогазовой смеси – 1,35 нм<sup>3</sup>/час. Из табл. 1 следует, что при таких условиях  $\approx 67$  % метана в составе коксового газа преобразовано в синтез-газ (прежде всего – в водород), которого 85,9 % в смеси после реакторов.

Приведём оценочный расчет плотности энергии  $W_{ya}$  в реакторах в эксперименте, проведенном в заводских условиях. В реакторе с импульсным коронным разрядом

$$W_{\rm уд. кор} = (W_{3,\rm уд. кор} + W_{\rm T,\rm yd. \rm Kop}) = P_{3} \times t/V + W_{\rm T}) \approx \approx P_{3} \times t/V + (3/2) \times \kappa \times T \times N_{A,\rm M3} \approx \approx 250 \text{ BT} \times 1 \text{ u}/1,35 \text{ m}^{3}+1,5 \times 1,38 \times 10^{-23} \text{ (Дж/K)} \times (290+273) \text{ K} \times 2,687 \times 10^{25} \text{ молекул/м}^{3} \approx \approx 0.271 \text{ кBT} \times \text{ч/m}^{3}.$$

В реакторе с барьерным разрядом, если не учитывать потери энергии, к введенной в реакторе с коронным разрядом плотности энергии  $W_{yq,kop} \approx 0,271$ кВт×ч/м<sup>3</sup> добавляется плотность энергии  $W_{3,yd,6ap}$  от генератора импульсов, нагруженного барьерным реактором. В экспериментах имело место приблизительное равенство плотностей энергий от этих двух генераторов:  $W_{_{3,yd,6ap}} \approx W_{_{3,yd,кop}} = 0,185 \text{ кВт} \times \text{ч/m}^3$ . Поэтому суммарную плотность энергии, введенную в парогазовую смесь в реакторе с барьером разрядом (и импульсным током), если не учитывать энергетические потери, можно оценить, как  $W_{yd,6ap} = W_{yd,kop} + W_{3,yd,6ap} = 0,271 + 0,185 = 0,456 (кВт \times \text{ч/m}^3)$ . Эта плотность энергии существенно меньше требуемой по [1] минимальной плотности  $W_{yd, min} \approx 1,2 \text{ кВт} \times \text{ч/m}^3$ . Тем не менее получен явный эффект парового риформинга метана в составе коксового газа в эксперименте при расходе парогазовой смеси 1,35 м<sup>3</sup>/ч (см. табл. 1).

Создание технологии парового риформинга (прямого) сырого коксового газа в синтез-газ на основе высоковольтных объёмных разрядов и импульсных токов выглядит перспективным, если не допускать выпадения смолистых соединений из сырого коксового газа в реакторах. Для этого до подачи в реакторы установки сырого коксового газа с  $t \ge 600$  °C их следует прогреть до  $t \ge 500$  °C "чисто", т.е. без нежелательных веществ в носителе тепла в случае использования такого носителя.

#### выводы

1. Впервые создана и в заводских условиях успешно опробована установка для парового риформинга метана в составе коксового газа в синтез-газ при помощи высоковольтных импульсных объёмных разрядов: коронного и барьерного с засыпкой никелевым катализатором.

2. В рассмотренной установке впервые применена двухступенчатая обработка высоковольтными объёмными разрядами парогазовой смеси с целью энергоэкономичного парового риформинга метана в составе прямого (сырого) коксового газа в синтез-газ.

3. В полученном рациональном режиме парового риформинга 67 % метана в составе коксового газа преобразовано в синтез-газ, которого 85,9 % в газовой смеси после реакторов, при плотности энергии, введенной в реакторы, существенно меньшей 1кВт×ч/м<sup>3</sup>, и температуре смеси 290 °C.

4. Даны рекомендации по созданию новой промышленной электрофизической технологии парового риформинга метана в составе коксового газа.

Авторы выражают глубокую благодарность всем заводчанам, помогавшим и обеспечившим проведение работ. Особая благодарность Георгию Васильевичу Долгареву, без которого проведенные работы были бы невозможны.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nozaki T., Muto N., Kado S., Okazaki K. Dissociation of vibrationally excited methane on Ni catalyst. Part 1. Application to methane steam reforming. Catalysis Today, 2004, Vol.89, pp. 57-65.

2. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Зароченцев А.И., Иванов В.М., Коняга С.Ф. Высоковольтный комплекс с двумя высокочастотными генераторами импульсов, регулирующими режимы коронного и барьерного разрядов при обработке газообразных углеводородов // Технічна електродинаміка. – 2012. – №2. – С. 105-106.

3. Высоковольтные электротехнологии / Под ред. И.П. Верещагина. – М.: изд-во МЭИ, 2000. – 204 с.

4. Бойко Н.И., Борцов А.В., Евдошенко Л.С., Иванов В.М.

Генераторы высоковольтных импульсов с частотой следования до 50000 импульсов в секунду // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – №4. – С. 92-101.

5. Бойко Н.И., Евдошенко Л.С., Иванов В.М., Христенко О.А. Компактный ёмкостный делитель напряжения на 70 кВ с экранированным промежуточным электродом // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №6. – С. 41-46.

REFERENCES: 1. Nozaki T., Muto N., Kado S., Okazaki K. Dissociation of vibrationally excited methane on Ni catalyst. Part 1. Application to methane steam reforming. Catalysis Today, 2004, Vol.89, pp. 57-65. 2. Boyko M.I., Yevdoshenko L.S., Zarochentsev A.I., Ivanov V.M., Koniaga S.F. The high-voltage complex with two high-frequency pulse generators for regulating the modes of corona discharges and barrier ones during a treatment of gas hydrocarbons. Tekhnichna elektrodynamika - Technical electrodynamics, 2012, no.2, pp. 105-106. 3. Vysokovol'tnye elektrotekhnologii [High-voltage electro technologies]. Edited by I.P. Vereshchagin. Moscow, Publishing House of MEI, 2000. 204 p. 4. Boyko M.I., Bortsov A.V., Yevdoshenko L.S., Ivanov V.M. Generators of high-voltage pulses with a repetition rate of up to 50,000 pulses per second. Pribory i tekhnika eksperimenta - Instruments and experimental techniques, 2011, no.4, pp. 92-101. 5. Boyko M.I., Yevdoshenko L.S., Ivanov V.M., Khrystenko O.A. The compact capacitive divider of voltage up to 70 kV with shielded intermediate electrode. Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2012, no.6. pp. 41-46.

Поступила (received) 09.02.2014

Бойко Николай Иванович<sup>1</sup>, д.т.н., проф., Евдошенко Леонид Свиридович<sup>1</sup>, к.т.н., Иванов Владимир Михайлович<sup>2</sup>, Коняга Станислав Федорович<sup>1</sup>, <sup>1</sup> Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел/phone +38 057 7076245, тел/phone, факс/fax 7076183, е-mail: qnaboy@mail.ru <sup>2</sup> Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Молния", Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,

тел/phone, факс/fax +38 057 7076183,

e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

*M.I. Boyko*<sup>1</sup>, *L.S. Yevdoshenko*<sup>1</sup>, *V.M. Ivanov*<sup>2</sup>, *S.F. Koniaga*<sup>1</sup> National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

<sup>2</sup> Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute "Molniya" National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" 47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine

Synthesis gas regeneration electrotechnology using volume high-voltage pulsed discharges: corona and barrier ones.

Factory testing of a created high-voltage complex (plant) has been conducted. The complex consists of two pulse generators with the repetition rate of up to 50,000 pulses per second and load reactors with pulsed discharges – corona and barrier ones. Transistor (IGBT) keys are used as energy switches. The efficient mode of coke gas methane conversion (steam reforming) to syngas has been obtained with application of the complex created. A unidirectional action of the pulsed discharges, the gas mixture temperature, and a nickel catalyst has reduced the specific energy consumption for synthesis gas regeneration during the conversion. A feasible mechanism of this conversion is described.

*Key words* – high-voltage complex, pulse generator, corona discharge, barrier discharge, reactor, electrotechnology.

А.Ю. Бондаренко, В.Б. Финкельштейн, А.А. Степанов

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПРЯМЫМ ПРОПУСКАНИЕМ ТОКА ДЛЯ ВНЕШНЕЙ РИХТОВКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ КУЗОВОВ

У статті представлені результати експериментальних досліджень електродинамічної системи з прямим пропусканням струму для зовнішньої рихтування автомобільних кузовів. Показано можливість визначення напрямку підвищення дієвості сил, що розвиваються, магнітно-імпульсного притягання. Продемонстрована працездатність запропонованого інструменту зовнішньої магнітно-імпульсної рихтування.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований электродинамической системы с прямым пропусканием тока для внешней рихтовки автомобильных кузовов. Показана возможность определения направления повышения действенности развиваемых сил магнитно-импульсного притяжения. Продемонстрирована работоспособность предложенного инструмента внешней магнитно-импульсной рихтовки.

#### ВВЕДЕНИЕ

Как показала практика, традиционная рихтовка с внутренней стороны металлического покрытия автомобильных кузовов зачастую невозможна по целому ряду причин [1].

В ряде случаев, когда требование сохранения защитного покрытия не является определяющим и допускается контакт с объектом обработки, можно использовать инструменты внешней рихтовки, представляющие собой электродинамические системы с "прямым пропусканием тока" через металл устраняемой вмятины. Отдельные предложения такого рода были описаны в работах [2].

Целью настоящей работы является освещение экспериментальных исследований одного из вариантов конструктивного исполнения инструмента силового магнитно-импульсного воздействия (индукторной системы), предназначенного для устранения повреждений в элементах автомобильных кузовов, корпусах из листовых металлов и др.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Модельный вариант инструмента внешней рихтовки вмятин в автомобильных кузовах – электродинамической системы "с прямым пропусканием тока" был апробирован при подключении к источнику мощности – магнитно-импульсной установке МИУ-20 через импульсный трансформатор, обеспечивающий в максимуме коэффициент трансформации по току 1:8. Данный источник мощности работает в импульсном режиме. Форма токового импульса, стандартная для магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) [4], представляет собой экспоненциально затухающую синусоиду (рабочая частота ~5 кГц, снижение амплитуды до нуля, практически, за 1.5÷2 периода сигнала).

Схематическое изображение апробированной экспериментальной конструкции инструмента показано на рис. 1.

Токоподводы для подключения к магнитноимпульсной установке были изготовлены из медной шины толщиной – 3мм, основной токопровод – стальная пластина толщиной – 5 мм и шириной в рабочей зоне составляла – 50 мм. Электрический контакт между листовой заготовкой и основным токопроводом – индуктором в рабочей зоне осуществлялся с помощью фиксирующих болтов.



Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной электродинамической системы – инструмента внешней магнитно-импульсной рихтовки

#### ИЗМЕРЕНИЕ НЕОБХОДИМЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ УСИЛИЙ

Предварительные измерения сил давления, необходимых для деформирования образца металлической обшивки автомобильного кузова ("Renault", толщина ~0.8 мм) проводились по схеме, описанной авторами работы [5].

Измерения показали, что выдавливание вмятин с поперечным диаметром – 25 мм до глубины 1 мм, 2 мм и 3 мм происходит при амплитудах усилий 1000 H, 1700 H и 2700 H, соответственно.

Обобщение полученных данных показывает, что для успешного деформирования экспериментальных образцов металлического покрытия автомобильных кузовов в достаточно широком, но реальном, диапазоне результатов и амплитуд силового воздействия, предложенный инструмент должен развивать усилия порядка ~  $F \ge 3000$  H.

#### ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ Измерительный комплекс.

• Измерения проводились с помощью пояса Роговского, представляющего собой катушку индуктивности, охватывающую проводник с измеряемым током (листовая заготовка с вмятиной).

• Основная характеристика пояса – его, так называемая, постоянная (позволяет пересчитывать э.д.с., индуцируемую в витках пояса, в реальный ток, протекающий по проводнику) – G = 13 кA/B[4].

```
© А.Ю. Бондаренко, В.Б. Финкельштейн, А.А. Степанов
```

• Пояс Роговского через интегрирующую цепочку (интегратор) подключается к импульсному осцилло-графу. Схема измерения показана на рис. 2.

• По осциллограммам на экране осциллографа измерялась э.д.с. в цепи пояса, после чего с помощью постоянной – *G* определялся ток в металле листовой заготовки.



Рис. 2. Схема измерения

Результаты измерений, обсуждение, вывод.

• Измерения проводились в рабочем режиме магнитно-импульсной установки с минимальным рабочим напряжением на емкостном накопителе – U = 5.5 кВ.

• Типичная осциллограмма токового импульса в разряде приведена на рис. 3.



Рис. 3. Типичная осциллограмма импульса тока в проводящих элементах инструмента рихтовки

• Параметры токовых импульсов измерялись в элементах системы согласно рис. 1:  $I_g$  — суммарный ток в токоподводе к индукторной системе и  $I_m$  — ток в основном токопроводе.

• Распределение тока, протекающего в металле листового металла с вмятиной, определялось согласно рис. 4 по участкам: *I*<sub>1</sub>, *I*<sub>2</sub>, *I*<sub>3</sub> соответственно.

• Результаты измерений:  $I_g = 169$  кА;  $I_m = 133$  кА;  $I_1 = 32,5$  кА;  $I_2 = 14,3$  кА;  $I_3 = 7,8$  кА.

• Суммарный ток в токоподводе  $-I_g = I_m + I_1 = 165,5$  кА  $\approx 169$  кА (разница в значениях определяется погрешностью измерений).

• Суммарный ток в заготовке  $-I_1 = 2I_2 + I_3 = 29,9$  кА  $\approx 32,5$  кА (разница в значениях определяется погрешностью измерений).

• Предыдущие два пункта характеризуют уровень достоверности результатов измерений, то есть, относительную погрешность, которая, как показывают оценки, не превышала ~8%.

• Суммарный ток в заготовке по отношению к суммарному току в токоподводе будет равен:

$$I_1/I_g = 32,5/169 \approx 19,2 \%$$

• Отношение токов в заготовке и в основном токо-проводе составляет:

$$I_1/I_m = 32,5/133 \approx 24,4 \%$$
.



Рис. 4. Схема измерения токораспределения в листовом металле с вмятиной

Данный результат показывает, что эквивалентное сопротивление заготовки приблизительно в 4 раза больше сопротивления основного токопровода, следовательно, если для уравнивания токов в основном токопроводе и заготовке включить их последовательно, то суммарное сопротивление индукторной системы возрастёт минимум в 5 раз, что приведёт к уменьшению суммарного тока в токопроводе соответственно в 5 раз.

• Отношение токов во вмятине и в заготовке -

$$I_3/I_1 = 7,8/32,5 \approx 24\%$$
.

Этот результат показывает, что основная часть тока, протекающего в заготовке сосредоточена вне вмятины, что объясняется влиянием известного "эффекта близости", обусловленного достаточно большими поперечными размерами основного токопровода.

• Отношение токов во вмятине и основном токо-проводе равно:

$$I_3/I_m = 7,8/133 \approx 5,8\%$$

Этот показатель характеризует эффективность преобразования энергии в исследованной индукторной системе (его величина согласуется с аналогами для традиционной МИОМ!).

• Проведенные измерения проиллюстрировали электродинамические процессы. Полученные результаты освещают возможные направления по повышению эффективности магнитно-импульсного подхода к реализации заданной производственной операции. В частности, уменьшение ширины основного токопровода до размера, существенно меньшего внешнего диаметра вмятины.

#### СИЛОВАЯ АПРОБАЦИЯ ИНСТРУМЕНТА

Практической апробации подвергалась конструкция с основным токопроводом – плоским проводником, у которого ширина рабочей зоны (центральная часть), согласно выводам по результатам измерений электродинамических показателей, была уменьшена до ~5мм. Диапазон рабочих напряжений на емкостном накопителе составлял: ~5,5÷7,5кВ.

Силовому воздействию подвергалась вмятина с глубиной по центру ~3 мм и внешним диаметром 25 мм в стальном листе толщиной ~0,8 мм (образец металлического покрытия а/м "Renault").

Проведенные эксперименты показали принципиальную практическую действенность магнитноимпульсного притяжения. После 5-кратного повторения силового воздействия диаметр вмятины уменьшился до 18 мм, глубина по центру – до ~1.5÷2 мм.

Следует отметить, что в центральной части вмятины отмечен достаточно заметный нагрев по сравнению с периферийными областями. Распределение Ленц-Джоулевого тепловыделения свидетельствует о концентрации тока, именно, в зоне рихтованной вмятины.

#### выводы

1. Для внешней рихтовки вмятин в металлических покрытиях автомобильных кузовов в качестве инструмента предложена и экспериментально апробирована электродинамическая система, принцип действия которой основан на силовом взаимодействии однонаправленных больших токов.

2. Проведенные измерения электродинамических характеристик позволили указать направление повышения действенности развиваемых сил магнитноимпульсного притяжения.

3. Исследованная экспериментальная модель с прямым пропусканием тока, реально продемонстрировала принципиальную работоспособность предложенного инструмента внешней магнитно-импульсной рихтовки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бажинов А.В., Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А. Использование энергии импульсных магнитных полей в автомобильной промышленности // Сб. научных трудов Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – Харьков. – 2005. – №16. – С. 349-353.

2. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Физические основы возможных направлений развития магнитноимпульсной обработки тонкостенных металлов // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – №2. – С. 80-84.

3. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т.1. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Издание второе, перераб. и доп. Под общ. ред. д.т.н., проф. Батыгина Ю.В. – Харьков: изд-во МОСТ-Торнадо, 2003. – 284 с.

4. Хавин В.Л., Чаплыгин Е.А., Шиндерук С.А. Экспериментальное исследование механических процессов при образовании и удалении лунок в стальных пластинах, имитирующих кузовное покрытие автомобиля // Автомобиль и электроника. Современные технологии. – Харьков: ХНАДУ, 2013. – №4. – С. 129-134.

REFERENCES: 1. Bazhinov A.V., Batygin Yu.V., Chaplygin E.A. Ispol'zovanie energii impul'snykh magnitnykh polei v avtomobil'noi promyshlennosti [Using the energy of pulsed magnetic fields in the automotive industry]. Sbornik nauchnykh trudov Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta [Collection of scientific works of Kharkov National Automobile and Highway University], 2005, vol.16, pp .349-353. 2. Batygin Yu.V., Lavinsky V.I., Khimenko L.T. The physical bases of the magnetic fields energy technological applications for the thin-walled metal working. Elektrotekhnika i elektromekhanika - Electrical engineering & electromechanics, 2004, no.2, pp. 80-84. 3. Batygin Yu.V., Lavinsky V.I., Khimenko L.T. Impul'snye magnitnye polia dlia progressivnykh tekhnologii. Tom 1. Impul'snye magnitnye polia dlia progressivnykh tekhnologii [Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Vol.1. Pulsed magnetic fields for advanced technologies]. Kharkiv, MOST-Tornado Publ., 2003. 284 p. 4. Havin V.L., Chaplygin E.A., Shinderuk S.A. Eksperimental'noe issledovanie mekhanicheskikh protsessov pri obrazovanii i udalenii lunok v stal'nykh plastinakh, imitiruiushchikh kuzovnoe pokrytie avtomobilia [Experimental researches of mechanical processes formation and removal of hole in a steel sheet simulates the car body]. Avtomobil i elektronika. Sovremennye tehnologii. - Vehicle and Electronics. Innovative Technologies, 2013. no.4, pp. 129-134. Available at: http://www.khadi.kharkov.ua/index.php?id=2118 (Accessed 27 March 2014).

#### Поступила (received) 27.03.2014

Бондаренко Александр Юрьевич<sup>1</sup>, к.т.н., доц., Финкельштейн Владимир Борисович<sup>2</sup>, д.т.н., проф., Степанов Александр Александрович<sup>3</sup>, к.ф-м.н., доц., <sup>1</sup> Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел/phone +38 057 7076052, е-mail: kafedraIEF@gmail.com, <sup>2</sup> Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, 61002, Харьков, ул. Маршала Бажанова, 17, тел/phone +38 057 7073316, e-mail: barbashova1987@gmail.com,

<sup>3</sup> Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,

61002, Харьков, ул. Петровского, 25,

тел/phone +38 057 7073727, e-mail: aas 1945@mail.ru

A.Yu. Bondarenko<sup>1</sup>, V.B. Finkelshtein<sup>2</sup>, A.A. Stepanov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

<sup>2</sup>O.M. Beketov Kharkiv National University of Municipal Economy

17, Marshala Bazhanova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

<sup>3</sup> Kharkiv National Automobile and Highway University

25, Petrovskogo Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Experimental approbation of an electrodynamic direct electric system for external automobile body repair.

The article presents results of experimental research on an electrodynamic system with direct current flow for external automobile body repair. A possibility of specifying the direction of increasing magnetic pulse attraction force action efficiency is shown. Operability of the external magnetic pulse flattening tool introduced is shown.

*Key words* – external automobile body repair straightening, direct current flow, magnetic pulse attraction.

В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, Л.И. Онищенко, И.А. Перекупка, С.О. Топоров

# СОЗДАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОГО ПЛЕНОЧНОГО ДИЭЛЕКТРИКА

Розглядаються результати досліджень зі створення високовольтних імпульсних конденсаторів на основі комбінованих плівкових діелектричних систем.

Рассматриваются результаты исследований по созданию высоковольтных импульсных конденсаторов на основе комбинированных пленочных диэлектрических систем.

#### ВВЕДЕНИЕ

Анализ научно-технической литературы показывает, что в настоящее время ведущие производители силовых конденсаторов с целью повышения удельных энергетических характеристик применяют в качестве рабочего диэлектрика секций конденсаторов только полимерные пленки, пропитанные маловязкими жидкостями [1-3].

В Институте импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины проводятся работы по исследованию электрофизических характеристик различных структур пленочных диэлектрических систем и их компонентов в условиях воздействия сильных электрических полей. В результате проведенных исследований было установлено, что наиболее перспективной для применения в качестве рабочего диэлектрика секции высоковольтного импульсного конденсатора является трехслойная пленочная диэлектрическая система [4, 5].

Целью данной работы является создание высоковольтных импульсных конденсаторов, в которых в качестве рабочего диэлектрика секции применены трехслойные пленочные диэлектрические системы.

#### ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛЕНОЧНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

На основании проведенных ранее исследований [4, 5] для создания конденсаторов выбрано два

варианта комбинированного полипропиленовополиэтилентерефталатного диэлектрика, пропитанного трансформаторным маслом T-1500:

• трехслойный диэлектрик толщиной 39 мкм, состоящий из двух слоев полипропиленовой пленки толщиной 12 мкм, разделенных одним слоем полиэтилентерефталатной пленки ПЭТ-КЭ толщиной 15 мкм;

• трехслойный диэлектрик толщиной 34 мкм, состоящий из двух слоев полипропиленовой пленки толщиной 12 мкм, разделенных одним слоем полиэтилентерефталатной пленки ПЭТ-КЭ толщиной 10 мкм.

В процессе исследований определялись следующие электрофизические характеристики указанных вариантов диэлектрических систем: эквивалентная относительная диэлектрическая проницаемость, эквивалентный тангенс угла потерь и кратковременная электрическая прочность.

Определение кратковременной электрической прочности пленочных диэлектрических систем и их компонентов (полипропиленовой и полиэтилентерефталатной пленок, трансформаторного масла Т-1500) проводились доведением их до электрического пробоя.

Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1 Результаты исследований электрических характеристик пленочных диэлектрических систем и их компонентов

Наименование диэлектрика	Толщина диэлектрика,	3	tgδ	U <sub>пр1</sub> , кВ	U <sub>пр2</sub> , кВ	U <sub>пр3</sub> , кВ	U <sub>пр4</sub> , кВ	U <sub>пр5</sub> , кВ	<i>U<sub>пр.ср.</sub></i> , кВ	<i>Е<sub>пр.ср.</sub>,</i> кВ/мм
Комбинированный полипропиленово- полиэтилентерефталатный, пропитанный трансформаторным маслом T-1500	34	2,382 (ε <sub>экв</sub> )	4,38·10 <sup>-4</sup> (tgδ <sub>экв</sub> )	18,0	20,5	19,5	16,0	20,0	18,8	553
	39	2,444 (ε <sub>экв</sub> )	4,95·10 <sup>-4</sup> (tgδ <sub>экв</sub> )	20,5	22,0	18,0	19,5	17,0	19,4	497
Полипропиленовая пленка Tervakoski Film марки RER	12	2,2	$2 \cdot 10^{-4}$	8,0	7,5	8,5	7,5	8,0	7,9	658
Полиэтилентерефталатная пленка	10	3,2	5.10-3	6,5	6,0	6,5	6,3	6,5	6,36	636
ПЭТ-КЭ	15	3,2	5·10 <sup>-3</sup>	9,5	9,8	9,0	9,5	9,6	9,48	632
Трансформаторное масло Т-1500	2,5 мм	2,2	3.10-4	44,0	48,0	46,0	42,0	38,0	43,6	17,4

Примечание. є – относительная диэлектрическая проницаемость материала; tg $\delta$  – тангенс угла потерь материала;  $U_{np1} - U_{np5}$  – величина пробивного напряжения, кВ;  $U_{cp.np}$  – среднее пробивное напряжение, кВ;  $E_{np.cp.}$  – средняя пробивная напряженность, кВ/мм.

© В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, Л.И. Онищенко, И.А. Перекупка, С.О. Топоров

Анализ данных по кратковременной электрической прочности диэлектрических систем и их компонентов, приведенных в табл. 1, показывает, что выбранные полимерные пленки и сформированные на их основе диэлектрические системы обладают высокой электрической прочностью – от 497 до 553 кВ/мм.

Кроме того, диэлектрические системы на основе комбинации полипропиленовой и полиэтилентерефталатной пленок, пропитанных трансформаторным маслом, имеют низкий эквивалентный тангенс угла потерь – не более 5.10<sup>-4</sup>.

#### СОЗДАНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

На основании результатов проведенных исследований были выполнены конструкторские и технологические проработки различных типономиналов высоковольтных импульсных конденсаторов с рабочим диэлектриком на основе указанных выше двух диэлектрических систем применительно к размерам одного изоляционного корпуса. Изоляционный корпус позволяет отказаться от необходимости применения изоляции выемной части конденсатора от корпуса, что приводит к более рациональному использованию внутреннего объема корпуса.

Как показали результаты проведенных работ и предложенные технические решения, направленные на унификацию основных конструктивных элементов конденсаторов, при создании серии высоковольтных импульсных конденсаторов на базе одного изоляционного корпуса могут быть применены почти все унифицированные конструктивные элементы конденсаторов: секция, вставной вывод, стяжные щеки и хомуты, выводы конденсатора, токоведущие шины, изоляционные прокладки. Это приводит к единообразию способов изготовления конденсаторов, использованию одной и той же технологической оснастки, сокращению времени на проектирование и изготовление. Секции имеют одно и то же конструктивное исполнение - плоскопрессованные со скрытыми обкладками и с двумя токовыводами с одной торцевой стороны.

Параметры и характеристики созданных высоковольтных импульсных конденсаторов 11 типономиналов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Тип	Номи-	Номи-	Индуктив-		Режи			
конденсатора	нальное напря- жение, кВ	нальная емкость, мкФ	ность, нГн	характер	Частота следования зарядов- разрядов, Гц	Максимальная амплитуда тока, кА	Декремент колебаний напряжения	Средний ресурс, зарядов-разрядов
ИМП-10-25	10	25	250	К	2	10	10	$7.10^{6}$
ИМП-10-30	10	30	250	К	1	10	10	$2 \cdot 10^{6}$
ИМП-20-6,3	20	6,3	300	К	2	10	10	$7.10^{6}$
ИМП-20-8	20	8	300	К	1	20	10	10 <sup>6</sup>
ИМП-25-4	25	4	300	К	2	10	10	$7.10^{6}$
ИМП-25-5	25	5	300	К	1	20	10	10 <sup>6</sup>
ИМП-50-0,5	50	0,5	500	К	6	5	10	$4 \cdot 10^{7}$
ИМП-50-1	50	1	400	К	2	10	10	$7.10^{6}$
ИМП-50-1,5	50	1,5	400	К	1	20	10	1,5·10 <sup>6</sup>
ИМП-70-0,71	70	0,71	500	К	1	20	10	10 <sup>6</sup>
ИМП-100-0,25	100	0,25	550	К	0,1	50	1,5	5·10 <sup>5</sup>

Параметры и характеристики серии высоковольтных импульсных конденсаторов

Примечание. К – колебательный режим разряда.

При создании указанных конденсаторов неизменной величиной для всех 11 типономиналов являлись внутренние размеры корпуса конденсатора. Обеспечение этого размера потребовало подборки толщины секций и выбора электрического соединения секций для каждого из 11 типономиналов конденсаторов. Это привело к изменению первоначальной расчетной величины емкости секций конденсатора и, соответственно, к изменению емкости самого конденсатора. Необходимо отметить, что при этом изменение емкости конденсаторов происходит в положительную сторону в пределах 10 %. В результате реализации выбранного технического решения - подборки толщины секций – было установлено, что для разных типономиналов конденсаторов, например, для ИМП-10-30, ИМП-20-8, ИМП-25-5; для ИМП-10-25,

ИМП-20-6,3, ИМП-25-4; для ИМП-50-1, ИМП-70-0,71 применяются идентичные секции для каждой из этих трех групп конденсаторов.

Для проверки принятых технических решений были изготовлены и испытаны высоковольтные импульсные конденсаторы ИМП-50-0,5 и ИМП-50-1.

#### выводы

В результате проведенных работ была создана серия высоковольтных импульсных конденсаторов из 11 типономиналов на номинальное напряжение от 10 до 100 кВ и номинальной емкостью от 0,25 до 30 мкФ. Испытания конденсаторов ИМП-50-0,5 и ИМП-50-1 показали правильность выбранных технических решений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудаков В.В. Стан та тенденції розвитку високовольтних імпульсних конденсаторів // Вісник НТУ "ХПІ". – 2009. – №39. – С. 146-154.

2. Ермилов И.В. Современные импульсные высоковольтные конденсаторы с пленочным диэлектриком // Электронные компоненты. – 2005. – №4. – С. 47-55.

3. Ратахин Н.А., Жарова Н.В., Лавринович И.В. Разработка сильноточных импульсных конденсаторов на 100 кВ // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы XIV междунар. науч. конф. – Николаев. – 2009. – С. 140-142.

4. Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Онищенко Л.И., Швец И.С. О повышении удельных энергетических характеристик и ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов // Электротехника. – 2005. – №12. – С. 47-51.

5. Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Михайлов И.Г., Онищенко Л.И., Фещук Т.А. Исследование зависимости ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с плёночным диэлектриком от режимов эксплуатации // Электротехника. – 2006. – №6. – С. 36-41.

**REFERENCES:** *I.* Rudakov V.V. Condition and development tendencies of high-voltage pulse capacitors. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2009, no.39, pp. 146-154. **2.** Ermilov E.V. Modern pulsed high-voltage capacitors with dielectric film. *Elektronnye komponenty – Electronic Components*, 2005, no.4, pp. 47-55. **3.** Ratakhin N.A., Zharova N.V., Lavrinovich N.V. Development of 100 kV high-current pulse capacitors. *Fizika impulsnykh razryadov v kondensirovanykh sredakh: Materialy XIV mezhdunarodnoj nauchnoj konferentsii.* [Physics of pulsed discharges in condensed matter: Proceedings of XIV Int.

Sci. Conf.]. Nikolaev, 2009, pp. 140-142. 4. Grebennikov I.Yu., Gun'ko V.I., Dmitrishin A.Ya., Onishchenko L.I., Shvets I.S. About increase of the specific power characteristics and resource of high- voltage pulse condensers. *Elektrotekhnika – Electrical Engineering*, 2005, no.12, pp. 47-51. 5. Grebennikov I.Yu., Gun'ko V.I., Dmitrishin A.Ya., Mikhajlov I.G., Onishchenko L.I., Feshchuk T.A. Research resource dependencies high-voltage pulse capacitors with film dielectric modes of operation. *Elektrotekhnika – Electrical Engineering*, 2006, no.6, pp. 36-41.

Поступила (received) 12.12.2013

Гунько Виктор Иванович<sup>1</sup>, зав. сектором, Дмитришин Алексей Ярославович<sup>1</sup>, м.н.с., Онищенко Лидия Ивановна<sup>1</sup>, зав. сектором, Перекупка Инна Андреевна<sup>1</sup>, инж.-констр. I кат., Топоров Сергей Олегович<sup>1</sup>, вед. инженер, <sup>1</sup> Институт импульсных процессов и технологий

ИНСТИТУТ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ И ТЕХНОЛОГИИ НАН Украины,

54018, Николаев, пр. Октябрьский, 43-А,

тел/phone +38 0512 587136, e-mail: dphc@iipt.com.ua

*V.I. Gun'ko<sup>1</sup>, A.Ya. Dmitrishin<sup>1</sup>, L.I. Onishchenko<sup>1</sup>, I.A. Perekupka<sup>1</sup>, S.O. Toporov<sup>1</sup>* 

<sup>1</sup> Institute of pulse processes and technologies of NAS of Ukraine 43-A, Zhovtnevy Avenue, Mykolayiv, 54018, Ukraine

# Creation of high-voltage pulse capacitors on the basis of a composite film dielectric.

Research into feasibility of designing high-voltage pulse capacitors based on composite film dielectric systems is presented. *Key words* – high-voltage pulse capacitor, film dielectric system, design elements. Е.А. Чаплыгин, М.В. Барбашова, О.С. Сабокарь

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ СИСТЕМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ ЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ

У статті представлені результати практичної апробації методики вимірювань і визначення характеристик тонкостінних листових ферромагнетиків при реальному магнітно-імпульсному тяжінні їх ділянок, заданих умовами виробничої операції. Показано, що величина відносної магнітної проникності оброблюваних металів відмінна від одиниці, що відповідає повному насиченню.

В статье представлены результаты практической апробации методики измерений и определение характеристик тонкостенных листовых ферромагнетиков при реальном магнитно-импульсном притяжении их участков, заданных условиями производственной операции. Показано, что величина относительной магнитной проницаемости обрабатываемых металлов отлична от единицы, что соответствует полному насыщению.

#### ВВЕДЕНИЕ

В технологиях традиционной магнитноимпульсной обработки разного рода стальных заготовок (например, плоская штамповка, обжим и раздача полых труб, холодная сварка и др.), магнитные свойства образцов никак не влияли на успешность выполняемой производственной операции [1]. Действительно, при реальном силовом давлении на массивные объекты амплитуды напряжённости составляли ~107 А/м и выше. В этом диапазоне действующих полей относительная магнитная проницаемость обрабатываемых металлов далека от своего максимума и стремится к единице [2]. Отличие её величины от предельного значения не оказывало влияния на эффективность обработки. Соответственно, вопрос об определении магнитных характеристик обрабатываемых металлов не представлял никакого практического интереса. Но с появлением разработок производственных операций, основанных на магнитно-импульсном притяжении ферромагнетиков, идентификация магнитной проницаемости объектов обработки при реальном силовом воздействии становится весьма актуальной. Результаты проведенных исследований дали основание полагать, что её величина, даже незначительно больше единицы, определяет амплитуды возбуждаемых сил магнитного притяжения заготовки к источнику поля – индуктору [3].

Цель работы – практическая апробация методики измерений и определение характеристик тонкостенных листовых ферромагнетиков при реальном магнитно-импульсном притяжении их участков, заданных условиями производственной операции.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объект исследований – заготовка из тонкостенной листовой стали автомобиля "Citroën" толщиной ~0.001 м (здесь следует перечислить все заготовки из различных сталей, но, как объект экспериментальной отработки предложенного метода, указать один из них) с вырезами, позволяющими размещение катушек индукционных датчиков. В одном из вырезов сохраняется металлический выступ (рис. 1,а, справа), во втором – крепится диэлектрическая вставка (рис. 1,а, слева).

Индукционный датчик через интегратор (рис. 1,б) подключается к осциллографу.

Оборудование – магнитно-импульсная установка МИУС-2, созданная в лаборатории электромагнитных технологий Харьковского национального автомо-

бильно-дорожного университета, согласующее устройство и одновитковая индукторная система с внутренним отверстием конической формы [4]. Полость отверстия – рабочая зона инструмента.



Рис. 1. Эксперимент по измерению магнитных характеристик в МИОМ: а – эскиз листовой заготовки, б – схема подключения индукционного измерителя (через интегратор)

#### Методика эксперимента:

1) на выступах (рис. 1, диэлектрическая вставка – слева, металл заготовки – справа) в пределах рабочей зоны индукторной системы были отмечены 5 точек для размещения обмотки индукционного датчика;

2) сигнал непосредственно с обмотки индукционного датчика подавался на вход осциллографа;

3) выход обмотки индукционного датчика через интегратор (рис. 1,б) подключался к осциллографу;

4) осциллографируемые сигналы измерялись;

5) производилась численная обработка результатов измерений.



Рис. 2. Экспериментальное оборудование: а – магнитно-импульсная установка МИУС-2 (сверху – выносной инструмент в защитном корпусе с кабельным подсоединением), б – массивный одновитковый индуктор с внутренним отверстием конической формы

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Первые эксперименты проводились для двух значений напряжения на емкостном накопителе: U = 900 В и U = 1800 В. Выбранный диапазон энергий должен проиллюстрировать дифференциацию магнитных свойств исследуемого образца в режимах, когда при многократном повторении силовых воздействий в зависимости от их количества имело место образование вмятин разной глубины [5].

Численные оценки характеристик импульсных сигналов в настоящих экспериментах (типичные представления на рис. 3, 4), проведенные соответственно методикам монографии [6], показали, что отличия отношений их средних значений от отношений их максимумов не превышают 10-12%.



Рис. 3. Осциллограммы сигналов с обмоток индукционных датчиков для определения динамической проницаемости (в точке  $r/R \approx 0.2$ ):

а – во внутренней полости катушки – диэлектрик;
 б – во внутренней полости катушки – ферромагнетик

Это позволяет приближённые оценки усреднённых характеристик ферромагнитных заготовок в каждой точке расположения обмотки измерителя находить как отношение временных максимумов числителя и знаменателя.



Рис. 4. Типичные осциллограммы проинтегрированных сигналов с обмоток индукционных датчиков при определении относительной магнитной проницаемости (в точке *r*/*R* ≈ 0.2):

а – во внутренней полости катушки – диэлектрик;
 б – во внутренней полости катушки – ферромагнетик

Конечные результаты определения магнитных характеристик исследуемого образца при магнитноимпульсном воздействии сведены в табл. 1.

				Гаолица Г
	Отн. магн.	Динам. магн.	Отн. магн.	Дин. магн.
	проницае-	проницае-	проницае-	проницае-
r	мость,	мость,	мость,	мость,
R	$\overline{\mu}_r(\zeta_k)$ ,	$\overline{\mu}_H(\zeta_k)$ ,	$\overline{\mu}_r(\zeta_k)$ ,	$\overline{\mu}_H(\zeta_k)$ ,
	U = 900  B	U = 900  B	U = 1800  B	U = 1800  B
0.2	2.40	2.50	1.26	1.55
0.4	2.17	2.34	1.33	1.85
0.6	1.88	2.54	1.30	1.49
0.8	1.81	2.40	1.27	1.52
1.0	1.87	2.47	1.37	1.60
Ср. вел	$\overline{\mu}_r \approx 2.026$	$\bar{\mu}_H \approx 2.45$	$\overline{\mu}_r \approx 1.306$	$\overline{\mu}_H \approx 1.602$

Визуально, радиальные распределения магнитных проницаемостей иллюстрируют графические зависимости на рис. 5.

Как следует из проведенных измерений, средние значения динамической и относительной магнитной проницаемости в диапазоне напряжений емкостного накопителя  $U \in [900 \text{ B}, 1800 \text{ B}]$ , соответственно, будут равны:  $\mu_H \approx 2.025$  и  $\mu_r \approx 1.67$ .

Результаты измерений относительной магнитной проницаемости согласуются с теорией, а также значениями µ<sub>r</sub>, принятыми авторами теоретического обоснования экспериментально обнаруженного эффекта притяжения листового ферромагнетика при низких частотах [7].

Таблина 1



Рис. 5. Радиальные распределения магнитных проницаемостей в листовых ферромагнетиках при МИОМ: а – динамическая магнитная проницаемость, б – относительная магнитная проницаемость

В экспериментальном образце на рис. 1 отсутствует металл в центральной части, соответствующей рабочей зоне индукторной системы. Очевидно, что данная геометрия практически полностью исключает влияние индуцированных токов на результаты измерений. Тем не менее, это влияние требует количественного определения.

В этой связи были проведены аналогичные измерения для "контрольного" листового образца с частичным сохранением металла в центральной части, представленного на рис. 6, что в отличие от геометрии на рис. 1,а, позволяет указать замкнутые контуры для протекания индуцированных токов.



Рис. 6. Эскиз "контрольной" листовой заготовки с сохранением металла в рабочей зоне индукторной системы

Типичные осциллограммы проинтегрированных сигналов представлены на рис. 7.

Вычисления, проведенные по результатам измерений, показали, что средняя величина относительной магнитной проницаемости металла листового образца на рис. 6 (рис. 8,б) в рабочей зоне индукторной системы составляет: при напряжении  $U = 900 \text{ B} - \mu_r \approx 2.0$ , а при напряжении  $U = 1800 \text{ B} - \mu_r \approx 1.36$ .



Рис. 7. Осциллограммы проинтегрированных сигналов с обмоток индукционных датчиков для определения относительной магнитной проницаемости (в точке *r*/*R*≈0.5): а – во внутренней полости катушки – диэлектрик; б – во внутренней полости катушки – ферромагнетик





Сравнение данных, полученных для листовых заготовок с различной геометрией вырезов для размещения индукционных датчиков, показали, что временная форма сигналов в измерителях остаётся неизменной, а расхождения в определении относительной магнитной проницаемости не превышают 4 %. Таким образом, геометрия образца для определения магнитных характеристик листовых ферромагнетиков при МИОМ, практически, не влияет на результаты измерений.

Теперь о пространственном распределении напряжённости магнитного поля.

Параметры интегратора:  $R = 8.2 \cdot 10^3$  Ом,  $C = 0.1 \cdot 10^{-6}$  Ф. Параметры датчика: число витков – w = 100, площадь поперечного сечения –  $S = 10^{-5}$  м<sup>2</sup>.



Рис. 9. Радиальное распределение напряжённости возбуждаемого магнитного поля в рабочей зоне индукторной системы при различных значениях напряжения на емкостном накопителе

По измеренным максимумам напряжения на выходе интегратора в фиксированных точках рабочей зоны были определены амплитудные значения напряжённости магнитного поля. Результаты представлены на рис. 9.

Как следует из рис. 9, максимальная напряжённость магнитного поля (тангенциальная составляющая) составляет ~ $1.25 \cdot 10^6$  А/м, а усреднённая по радиусу ~ $1.05 \cdot 10^6$  А/м. Вероятно, что данные величины могут служить ориентиром для оценки амплитуды возбуждаемого поля, достаточной для преодоления предела пластичности металла обрабатываемого листового ферромагнетика и его деформирования притяжением к индуктору.

Вторая группа экспериментов, проведенных для напряжений U = 450 В и U = 1350 В, была направлена на обобщение полученных результатов. Она дополняет физическую картину зависимости магнитных характеристик металлов от величин напряжённости действующего поля в реальных процессах МИОМ.

Аналогично предыдущему для выделенных напряжений емкостного накопителя были проведены измерения проинтегрированных сигналов. С учётом ранее полученных результатов была получена зависимость относительной магнитной проницаемости металла от напряжённости магнитного поля, усреднённых по величинам в различным точках рабочей зоны индукторной системы (см. рис. 10).



Характер и поведение кривой  $\mu_r(H)$  на рис. 10 физически полностью согласуется с зависимостью, представленной в фундаментальных работах по исследованиям ферромагнетиков (например, в монографии Я. Туровского [2]).

Прогнозирование "скорости" изменения магнитных свойств обрабатываемого металла в диапазоне реальной для МИОМ напряжённости действующего поля представляет практический интерес и может быть проведено с помощью первой производной относительной магнитной проницаемости.

Как следует из формулы для усреднённой динамической проницаемости

$$\frac{\overline{d\mu_r(H)}}{\overline{dH}} = \frac{1}{\overline{H}} \cdot \left[\overline{\mu_H(H)} + \overline{\mu_r(H)}\right]$$

Данное выражение, записанное в терминах усреднённых величин, определяет первую динамическую характеристику поведения магнитных свойств, а именно, "скорости" изменения проницаемости при вариации напряжённости поля в индукторной системе.



Рис. 11. Первая динамическая характеристика магнитных свойств металла обрабатываемого объекта в диапазоне реальных напряжённостей полей при МИОМ

Как видно из графической зависимости на рис. 11, абсолютная величина скорости изменения магнитной проницаемости достаточно мала. Тем не менее, следует отметить резкое изменение производной при низких значениях напряжённости (почти на порядок для ( $0.2\div0.4$ )· $10^6$  A/м!). Но при приближении к амплитуде поля, когда имеет место деформирование,  $d\overline{\mu}_r(\overline{H})/d\overline{H}$  изменяется весьма слабо, что означает сохранение значения относительной магнитной проницаемости, близкого к единице, но отличного от неё. Данное утверждение согласуется с простыми физическими соображениями. Очевидно, что  $\mu = 1$  при  $H \rightarrow \infty$ .

В заключение приведём результаты измерений в табл. 2 для сталей обшивок автомобилей американского концерна "Ford Motor Company". В сравнении с аналогами для европейской фирмы "Citroën" эти данные дают некоторое обобщающее представление о магнитных характеристиках сталей, применяемых в мировом автомобилестроении.

Tag	
гаолина	1
1 400111144	_

Марка стали	Усреднённая относительная магнитная проницаемость в рабочей зоне инструмента					
-	$\left\frac{1}{\mu_r} \right _{U=900B}$	$\left. \overline{\mu}_r \right _{U=1800B}$				
IF	2.25	1.36				
BH 210	2.188	1.41				
BH 240	2.334	1.44				
Усреднение по маркам сталей	$\overline{\mu}_r \approx 2.26$	$\overline{\mu}_r \approx 1.4$				

Для стали автомобильной обшивки фирмы "Citroën" из табл. 1. можно выписать соответствующие аналоги:  $\bar{\mu}_r \Big|_{U=900B} = 2.026$  и  $\bar{\mu}_r \Big|_{U=1800B} = 1.306$ .

Сравнение этих данных с величинами из табл. 2 показывает, что относительная магнитная проницаемость стальных обшивок современных автомобилей, выпускаемых как американскими, так и европейскими производителями, в режиме магнитно-импульсного притяжения приблизительно одинакова и принимает значения в интервалах:  $\bar{\mu}_r \Big|_{U=900B} \in [2.026, 2.26]$ 

и  $\bar{\mu}_r \Big|_{U=1800B} \in [1.306, 1.4].$ 

#### выводы

1. Реализована успешная экспериментальная апробация методики измерения магнитных характеристик ферромагнитных листовых заготовок в реальных режимах магнитно-импульсной обработки металлов.

2. Показано, что при магнитно-импульсном притяжении тонкостенных листовых ферромагнетиков величина относительной магнитной проницаемости обрабатываемых металлов отлична от единицы, что соответствует полному насыщению, и принимает значения в диапазоне  $\mu_r \ge 1.3$ .

3. Успешно апробирована методика измерения напряжённости магнитного поля в рабочей зоне индукторной системы в реальном режиме силового воздействия при МИОМ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В., Сериков Г.С., Чаплыгин Е.А. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 4: Магнитно-импульсные технологии для формовки кузовных элементов автомобиля. Учебное пособие. – Харьков: ХНАДУ, 2010. – 182 с.

2. Туровский Я. Техническая электродинамика. – М.: "Энергия", 1974. – 488 с.

3. Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Особенности возбуждения электромагнитных сил при магнитно-импульсной обработке листовых ферромагнетиков // Технічна електродинаміка. – 2012. – №1.– С. 71-77.

4. Щиголева С.А., Барбашова М.В. Анализ теоретических и экспериментальных результатов исследований электродинамических характеристик поля в индукторной системе с коническим отверстием // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – 2012. – Вип. 134. – С. 212-216.

5. Батыгин Ю.В., Воробьев В.В., Гнатов А.В., Гнатова Щ.В., Сериков Г.С., Чаплыгин Е.А. Расчётные характеристики магнитно-импульсной установки для обработки металлов серией импульсов // Вісник НТУ "ХПІ". – 2011. – №12. – С. 86-95.

6. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Том 3. Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями: монография. – Х.: ХНАДУ, 2009. – 240 с.

7. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Изменение направления силового воздействия на проводник при вариации частоты действующего магнитного поля // Вестник науки и техники. – Харьков, 2004. – № 2, 3 (17, 18). – С. 18-22.

REFERENCES: 1. Batygin Yu.V., Gnatov A.V., Serikov G.S., Chaplygin E.A. Impulsnye magnitnye polja dlja progressivnyh tehnologij. Tom 4: Magnitno-impulsnye tehnologii dlija formofki kuzovnyh elementov avtomobilja. Uchebnoe posobie [Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Vol. 4: Magnetic pulse technology for forming body elements of the car. Textbook]. Kharkov, Kharkov National Automobile and Highway University Publ., 2010. 182 p. 2. Turovskij Ya. Tehnicheskaja elektrodinamika [Technical electrodynamics]. Moscow, Energija Publ., 1974. 488 p. 3. Batygin Yu.V., Gnatov A.V. The features of the electrical magnetic forces excitation in the magnetic pulse sheet ferromagnetic metal working. Tekhnichna elektrodynamika -Technical electrodynamics, 2012, no.1, pp. 71-77. 4. Schigoleva S.A., Barbashova M.V. Analysis of theoretical and experimental results for electrodynamic field characteristics research in the inductive system with a conical bore. Visnyk SevNTU: zb. nauk. pr. Serija: Mashynopryladobuduvannja ta transport - Bulletin of Sevastopol National Technical University: The collection of scientific works. Series: Machineinstrument-building and transport, 2012, no.134, pp. 212-216. 5. Batygin Yu.V., Vorobjev V.V., Gnatov A.V., Gnatova Sch.V., Serikov G.S., Chaplygin E.A. Calculated characteristics of magnetic pulse systems for metal processing by series of pulses. Visnyk NTU "KhPI" - Bulletin of NTU "KhPI", 2011, no.12, pp. 86-95. 6. Turenko A.N., Batygin Yu.V., Gnatov A.V. Impulsnye magnitnye polja dlja progressivnyh tehnologij. Tom 3. Teorija i eksperiment pritjazhenija tonkostennyh metallov impulsnymi magnitnymi poljami: monografija [Pulsed magnetic fields for advanced technologies. Vol. 3: Theory and experiment attraction thin metal pulsed magnetic fields: Monograph]. Kharkov, Kharkov National Automobile and Highway University Publ., 2009. 240 p. 7. Batygin Yu.V., Lavinsky V.I., Khimenko L.T. Changing the direction of force action on the conductor at the variation of acting magnetic field frequency. Vestnik nauki i techniki - Bulletin of Science and Technology, 2004, no.2,3 (17,18), pp. 18-22.

#### Поступила (received) 16.04.2014

Чаплыгин Евгений Александрович<sup>1</sup>, к.т.н., доц., Барбашова Марина Викторовна<sup>1</sup>, аспирант, Сабокарь Олег Сергеевич<sup>1</sup>, студент, <sup>1</sup> Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Харьков, ул. Петровского, 25,

тел/phone +38 057 7073727, e-mail: barbashova1987@gmail.ru

E.A. Chaplygin<sup>1</sup>, M.V. Barbashova<sup>1</sup>, O.S. Sabokar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kharkov National Automobile and Highway University

25, Petrovskogo Str., Kharkov, 61002, Ukraine

# Experimental approbation of sheet metal magnetic permeability measurement systems.

The article presents results of practical testing of measurement techniques and characterization of thin sheet metallic ferromagnets under real pulsed magnetic attraction of their sections specified by manufacturing operation conditions. It is shown that the relative magnetic permeability of the processed metals is different from one, which corresponds to full saturation.

*Key words* – thin sheet metal ferromagnets, magnetic permeability.

УДК 517.4:519.652

Я.С. Бедерак

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО СГЛАЖИВАНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ УТЕРЯННЫХ ДАННЫХ ТЕХНИЧЕСКОГО УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

У статті детально досліджена проблема відновлення одиночних даних технічного обліку електроенергії методом експоненційного згладжування. Перевірена гіпотеза про ефективність знаходження оптимального значення постійної згладжування α в діапазоні 0 < α < 2. Встановлено діапазони зміни значень середньої абсолютної відсоткової помилки прогнозу залежно від значень коефіцієнта варіації часового ряду для конкретних процесів електроспоживання з різним розкидом даних.

В статье детально исследована проблема восстановления одиночных данных технического учета электроэнергии методом экспоненциального сглаживания. Проверена гипотеза об эффективности находить оптимальное значение постоянной сглаживания α в диапазоне 0 < α < 2. Установлены диапазоны изменения значений средней абсолютной процентной ошибки прогноза в зависимости от значений коэффициента вариации временного ряда для конкретных процессов электропотребления с различным разбросом данных.

#### Постановка проблемы

Отсутствие учетных данных энергопотребления на промышленных предприятиях приводит к недоучету энергоресурсов, отсутствию возможности контроля энергоэффективности производственных объектов, невозможности решить разноплановые задачи, стоящие перед электрослужбой промышленных предприятий. Для решения данных задач принято использовать процедуру восстановления данных.

#### Анализ последних исследований и публикаций

Метод экспоненциального сглаживания описан в работах Дж. Бокса [1], Г. Дженкинса [1], Лукашина Ю.Г. [2], Светунькова С.Г. [3], Четыркина Е.М. [4]. Применение этого метода в электроэнергетике рассматривалось в работах Фармера Е.Д. [5], Бэнн Д.В. [5], Праховника А.В. [6], Гордеева В.И. [7], Розена В.П. [6], Гурского С.К. [8]. В работах [1-5] отмечено, что метод экспоненциального сглаживания может быть использован для краткосрочных прогнозов будущей тенденции на один период вперед. Этот метод автоматически корректирует любой прогноз в свете различий между фактическим и спрогнозированным результатом. Поэтому возможно использовать метод экспоненциального сглаживания для восстановления одиночных пропущенных данных электропотребления. Ведь восстановление данных - это процедура, аналогичная прогнозированию, только не на будущий интервал времени, а на уже прошедший период времени.

В работе д.т.н. Светунькова С.Г. (г. Санкт-Петербург) [9] было предложено расширить границы постоянной сглаживания  $\alpha$  при прогнозировании экономических процессов не в пределах  $0 < \alpha < 1$ , а в пределах  $0 < \alpha < 2$ .

Цель статьи – проверить целесообразность расширения границ изменения постоянной сглаживания при проведении восстановления пропущенных одиночных данных временного ряда среднечасовых значений электропотребления в цехе аммиака и исследовать, от каких причин зависит точность метода экспоненциального сглаживания.

#### Основной материал исследований

В ситуации, когда наблюдаются одиночные пропуски данных, целесообразно использовать такие методы, как методы сплайн-интерполяции и экспоненциального сглаживания.

Рабочая формула одного из экстраполяционных методов – метода экспоненциального сглаживания:

#### $U_{t+1} = \alpha \cdot y_t + (1-\alpha) \cdot U_t,$

где t – период, предшествующий прогнозному; t+1 – прогнозный период;  $U_{t+1}$  – прогнозируемый показатель;  $\alpha$  – постоянная сглаживания;  $y_t$  – фактическое значение исследуемого показателя за период, предшествующий прогнозному;  $U_t$  – экспоненциально взвешенная средняя для периода, предшествующего прогнозному.

При прогнозировании данным методом возникает две проблемы:

- выбор значения постоянной сглаживания α;
- определение начального значения U<sub>t</sub>.

От величины  $\alpha$  зависит, как быстро снижается вес влияния предшествующих наблюдений. Чем больше  $\alpha$ , тем меньше сказывается влияние предшествующих значений временного ряда. Если значение  $\alpha$  близко к единице, то это приводит к учету при прогнозе в основном влияния лишь последних наблюдений. Если значение  $\alpha$  близко к нулю, то веса, по которым взвешиваются уровни временного ряда, убывают медленно, т.е. при прогнозе учитываются все (или почти все) прошлые наблюдения.

На практике постоянная сглаживания определяется путем поиска на сетке. Возможные значения параметра разбиваются сеткой с определенным шагом. Например, рассматривается сетка значений от  $\alpha = 0,1$ до  $\alpha = 1,9$  с шагом 0,1.

Постоянная сглаживания должна изменяться в пределах [9]:

 $0 < \alpha < 2$ .

Модель Брауна имеет право на существование как при нахождении постоянной сглаживания в пределах:

$$0 < \alpha < 1$$
,

которые называются "классическими", так и в пределах [9]:

 $1 \le \alpha < 2$ ,

которые называются "запредельным множеством".

Оптимальное значение постоянной сглаживания определяется, используя критерий минимума дисперсии ошибки аппроксимации:

$$\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} (\mathbf{Y}_t - \mathbf{Y}_t)^2 \to \min_{t=1}^{T} \mathbf{Y}_t$$

Когда оптимальное значение постоянной сглаживания находится в классических пределах, модель адаптивна, а в том случае, когда оно находится в запредельном множестве, модель не только адаптивна, но и самообучаема [9]. Это говорит о том, что оптимальное значение постоянной сглаживания определяется свойствами исходного ряда.

Если в процессе оптимизации постоянная сглаживания лежит в пределах – от нуля до единицы, то модель Брауна может использоваться для прогнозирования достаточно эффективно. Если же оптимальное значение постоянной сглаживания оказалось находящимся в запредельном множестве, то это диагностирует ситуацию, когда средняя взвешенная в принципе не может использоваться в качестве хорошей оценки прогнозного значения моделируемого процесса. В этом случае возможно два варианта действий [8].

Первый. Процесс вышел за рамки простой динамики. У него появилась некоторая тенденция в развитии.

Второй. Процесс находится на грани между эволюционной и хаотической динамикой, и его математическое описание невозможно с помощью какойлибо модели. Поэтому такой процесс лучше всего прогнозировать с помощью модели Брауна, работающей в запредельном множестве.

Задача выбора U<sub>t</sub> (экспоненциально взвешенного среднего начального) решается следующими способами:

• если есть данные о развитии явления в прошлом, то можно воспользоваться средней арифметической и приравнять к ней U<sub>t</sub>;

• если таких сведений нет, то в качестве  $U_t$  используют исходное первое значение базы прогноза  $U_1$ .

Для исследований были взяты временные ряды среднечасовых значений электропотребления крупнотоннажного цеха аммиака за 7 подряд идущих суток (табл. 1). Для постоянной сглаживания, принимающей значения от 0,1 до 1,9 с шагом 0,1, рассчитывалось оптимальное значение постоянной сглаживания, используя в расчетах как первое значение базы прогноза, так и среднее почасовое значение электропотребления за предыдущие сутки. Результаты вычислений приведены на рис. 1, 2.

Таблица 1

Значения почасового электропотребления крупнотоннажного цеха аммиака за сутки, МВт и коэффициента вариации, %

Номер		Номер суток					
часа	1	2	3	4	5	6	7
1	31,930	36,609	36,570	37,107	37,146	37,264	37,118
2	31,875	36,641	36,585	37,054	37,091	37,275	37,088
21	36,634	36,563	36,965	37,072	37,147	37,472	37,314
22	36,647	36,603	37,031	37,137	37,148	37,267	37,327
23	36,594	36,594	37,035	37,159	37,138	37,074	37,387
24	36,578	36,535	37,050	37,146	37,188	37,133	37,420
Значение коэффи- циента вариации за сутки, %	6,90	0,24	0,49	0,81	0,23	0,39	0,30



Рис. 1. Зависимость величины дисперсии ошибки аппроксимации от постоянной сглаживания при использовании в качестве экспоненциально взвешенного среднего начального первого значения базы прогноза



Рис. 2. Зависимость величины дисперсии ошибки аппроксимации от постоянной сглаживания при использовании в качестве экспоненциально взвешенного среднего начального среднего арифметического значения за предыдущие сутки

Оптимальная величина постоянной сглаживания  $\alpha$  из 7 суток 6 раз равнялась 0,1, а 1 раз – 0,9.

Для каждого значения постоянной сглаживания определялась средняя абсолютная процентная ошибка *МАРЕ* при обоих способах выбора экспоненциально взвешенного среднего начального значения.

Средняя абсолютная процентная ошибка (МАРЕ) [10]:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{1}^{n} \frac{|y_m(i) - y_p(i)|}{y_m(i)}$$

где  $y_m(i)$  – измеренное значение энергопотребления,  $y_p(i)$  – прогнозное значение, n – горизонт прогнозирования (количество временных интервалов в выборке).

Результаты вычислений приведены на рис. 3, 4.



ISSN 2074-272X. Електротехніка і Електромеханіка. 2014. №4



Рис. 4. Зависимость величины средней абсолютной процентной ошибки от постоянной сглаживания при использовании в качестве экспоненциально взвешенного среднего начального среднего арифметического значения за предыдущие сутки

Величина средней абсолютной процентной ошибки для обоих случаев определения экспоненциально взвешенного среднего начального значения не превышает 2%, а в среднем равна 0,5 %, что свидетельствует о высокой точности восстановления одиночных пропущенных данных методом экспоненциального сглаживания. Исследования показали, что величина средней абсолютной процентной ошибки *MAPE* зависит от значения коэффициента вариации (*KB*) 24 значений временного ряда почасовых значений электропотребления цеха аммиака (табл. 2).

Таблица 2

Значения средней абсолютной процентной ошибки *MAPE* за сутки, полученные при использовании в качестве экспоненциально взвешенного среднего начального среднего

арифметического значения за предыдущие сутки и первого значения базы прогноза, в цехе аммиака

Номер суток	1	2	3	4	5	6	7
Значение <i>МАРЕ</i> при ис- пользовании первого зна- чения базы прогноза, %	0,92	0,12	0,15	0,44	0,10	0,19	0,08
Значение <i>МАРЕ</i> при ис- пользовании среднего арифметического значе- ния за предыдущие сутки, %	1,41	0,65	0,17	0,55	0,10	0,18	0,08
Значение коэффициента вариации <i>КВ</i> , %	6,90	0,24	0,49	0,81	0,23	0,39	0,30

Значениям KB, выраженным в процентах, от 0 до 0,5 %, соответствует величина средней абсолютной процентной ошибки MAPE около 0,2 %. Значениям KB, выраженным в процентах, от 0,5 до 1 % соответствует величина средней абсолютной процентной ошибки MAPE около 0,5 %. Значениям KB, выраженным в процентах, от 1 до 7 %, соответствует величина средней абсолютной процентной ошибки MAPE около 1 %. Но эти зависимости верны только для конкретного процесса электропотребления.

Зависимость средней абсолютной процентной ошибки *МАРЕ* от *КВ* проверена также на временном ряду (почасовых значениях электропотребления за 7 суток) на насосной станции, обеспечивающей водой химические производства. В программе Microsoft Excel

создан шаблон, который может рассчитывать и оптимальное значение постоянной сглаживания, и величину *MAPE* по почасовым значениям электропотребления.

Получены следующие значения *МАРЕ* при определенных значениях *КВ* (табл. 3).

Таблица 3

Значения средней абсолютной процентной ошибки *MAPE* и коэффициента вариации *KB* за сутки, полученные при использовании в качестве экспоненциально взвешенного среднего начального среднего арифметического значения за предыдущие сутки, на насосной станции

Номер суток	1	2	3	4	5	6	7
Значение МАРЕ при							
использовании сред- него арифметического значения за предыду- щие сутки, %	0,22	0,18	0,36	0,86	0,33	0,29	0,2
Значение коэффици- ента вариации <i>КВ</i> , %	0,29	0,37	0,76	1,59	0,8	0,56	0,4

С табл. 2 и 3 следует, что при коэффициенте вариации меньше 1 % величина *МАРЕ* в среднем в два раза меньше величины *КВ*.

Зависимость средней абсолютной процентной ошибки MAPE от KB проверена также на временном ряду (почасовых значениях электропотребления за 7 суток) в цехе слабоазотной кислоты, где наблюдается более высокий разброс данных временного ряда. Получены следующие значения MAPE при определенных значениях KB (табл. 4).

Таблица 4

Значения средней абсолютной процентной ошибки *MAPE* и коэффициента вариации *KB* за сутки, полученные при использовании в качестве экспоненциально взвешенного среднего начального среднего арифметического значения за предыдущие сутки, в цехе слабоазотной кислоты

Номер суток	1	2	3	4	5	6	7
Значение <i>МАРЕ</i> при использовании среднего арифметического зна- чения за предыдущие сутки, %	4,06	3,58	2,50	1,66	2,11	0,98	1,13
Значение коэффициента вариации <i>КВ</i> , %	16,62	11,73	6,73	3,24	3,53	2,99	2,34

Доверительные границы для прогностической оценки равны [4]:

$$y_{i+L} = \overline{y} \pm t_{\alpha} s \sqrt{\frac{2}{2-\alpha}},$$

где  $y_{i+L}$  – экстраполируемое значение уровня, L – период упреждения (L = 1),  $t_{\alpha}$  – табличное значение t – статистики Стьюдента с n-1 степенями свободы и уровнем вероятности p, s – среднее квадратическое отклонение (СКО),  $\overline{y}$  – среднее значение временного ряда.

Для 24 значений временного ряда значений электропотребления за первые сутки в цехе аммиака с средним значением 37, 048 МВт и СКО, равным 0,087 МВт, значением  $t_{\alpha} = 2,07$  (для 23 степеней свободы и уровня доверительной вероятности 95 %), постоянной сглаживания  $\alpha = 0,1$  доверительный интервал для цеха аммиака равны 37,048 ± 0, 184 МВт.

Согласно [4] минимальное число наблюдений для линейного, параболического и кубического

трендов при периоде упреждения L = 16, 13, 23 соответственно. Поэтому оправдано использование для экстраполяции временного ряда 24 значений суточного электропотребления.

#### выводы

1. Если начальные условия, на основании которых разрабатывается прогноз, верны, то возможно использовать в качестве начального значения первое значение базы прогноза. Если уверенности в начальных данных нет, то лучше использовать в качестве начального значения среднее арифметическое значения предыдущей базы прогноза.

2. Проверена гипотеза целесообразности использования в качестве постоянной сглаживания чисел в интервале 0 < α < 2. Результаты вычислений свидетельствуют о том, что оптимальное значение α для временных рядов электропотребления химических цехов и других объектов химического предприятия находится в интервале 0,1 < α < 0,2. Хотя проверка всех значений постоянной сглаживания на интервале  $0 < \alpha < 2$  гарантирует правильность определения постоянной сглаживания.

3. Показано практически и доказано теоретически, что средняя абсолютная процентная ошибка прямо пропорционально зависит от коэффициента вариации значений временного ряда электропотребления. Указаны диапазоны изменения значений средней абсолютной процентной ошибки МАРЕ в зависимости от значений коэффициента вариации для конкретных процессов электропотребления с различным разбросом данных.

4. Установлено, что метод экспоненциального сглаживания обеспечивает высокую точность восстановления пропущенных одиночных данных электропотребления на химических производствах.

5. Оправдано использование для экстраполяции временного ряда почасового электропотребления 24 почасовых значений электропотребления (24 значения в сутки).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Про-

гноз и управление. – М.: Мир, 1974. – 520 с. 2. Лукашин Ю.Г. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования. – М.: Экономика, 1989. – 214 с.

3. Светуньков С.Г., Светуньков И.С. Методы социальноэкономического прогнозирования: учебник для вузов. Том II. – СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2010. – 103 с.

4. Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. – М.: Финансы и статистика, 1979. – 199 с.

5. Бэнн Д.В., Фармер Е.Д. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 c.

6. Праховник А.В., Розен В.П., Дегтярев В.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий. – М.: Недра, 1985. – 232 с.

7. Гордеев В.И., Васильев И.Е., Шуцкий В.И. Управление электропотреблением и его прогнозирование. - Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1991. – 104 с.

8. Гурский С.К. Адаптивное прогнозирование временных рядов в электроэнергетике. - Мн.: Наука и техника, 1983. – 271 c.

9. Светуньков С.Г. Запредельные случаи метода Брауна // Экономические науки: Ученые записки УлГУ. – Ульяновск: Изд-во СВНЦ, 1997. – Вып. 2. – Часть 1.

10. Лук'яненко І.Г., Краснікова Л.І. Економетрика: Підручник. - К.: Товариство "Знання", КОО, 1998. - 494 с.

REFERENCES: 1. Boks Dzh., Dzhenkins G. Analiz vremennykh riadov. Prognoz i upravlenie [Time series analysis. Forecast and Control]. Moscow, Mir Publ., 1974. 520 p. 2. Lukashin Yu.G. Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognozirovaniia [Adaptive methods of shortterm forecasting]. Moscow., Ekonomika Publ., 1989. 214 p. 3. Svetun'kov S.G., Svetun'kov I.S. Metody sotsial'no-ekonomicheskogo prognozirovaniia: uchebnik dlia vuzov. Tom II [Methods of social and economic forecasting: a textbook for high schools. Vol. II]. St. Petersburg, St. Petersburg State University of Economics and Finance Publ., 2010. 103 p. 4. Chetyrkin E.M. Statisticheskie metody prognozirovaniia [Statistical methods for forecasting]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1979. 199 p. 5. Benn D.V., Farmer E.D. Sravnitel'nye modeli prognozirovaniia elektricheskoi nagruzki [Comparative models of electric load forecasting]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 200 p. 6. Prakhovnik A.V., Rozen V.P., Degtiarev V.V. Energosberegaiushchie rezhimy elektrosnabzheniia gornodobyvaiushchikh predpriiatii [Power-saving modes of electricity for mining companies]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 232 p. 7. Gordeev V.I., Vasil'ev I.E., Shutskii V.I. Upravlenie elektropotrebleniem i ego prognozirovanie [Energy management and forecasting]. Rostov-on-Don, Rostov State University Publ., 1991. 104 p. 8. Gurskii S.K. Adaptivnoe prognozirovanie vremennykh riadov v elektroenergetike [Adaptive prediction of time series in electric power industry]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1983. 271 p. 9. Svetun'kov S.G. Zapredel'nye sluchai metoda Brauna [Outrageous cases the method of Brown]. Ekonomicheskie nauki: Uchenye zapiski UlGU - Economic sciences: Scientific notes of Ulyanovsk State University, 1997, no.2, part 1. 10. Luk'ianenko I.G., Krasnikova L.I. Ekonometrika: Pidruchnik [Econometrics: Textbook]. Kyiv, Tovaristvo "Znannia", KOO Publ., 1998. 494 p.

#### Поступила (received) 11.04.2014

Бедерак Ярослав Семенович, инженер, Публичное акционерное общество "АЗОТ", 18014, Черкассы, ул. Первомайская, 72, тел/phone +38 047 2392979, e-mail: ei@uch.net

Ya.S. Bederak

PJSC "AZOT"

72, Pervomayskaya Str., Cherkassy, 18014, Ukraine

#### An exponential smoothing method application to restoring lost data on electric power technical record-keeping in industrial enterprises.

The paper studies in detail a problem of restoring single data of electric power technical record-keeping systems by means of exponential smoothing. A hypothesis of efficient finding the optimal value of smoothing constant  $\alpha$  in the range of  $0 < \alpha < 2$  is tested. Variation ranges for the mean absolute percentage error of the forecast are specified versus values of the time series variation coefficient for specific electricity consumption processes with different data spread.

Key words - exponential smoothing, lost data restore, mean absolute percentage error, variation.

Г.М. Колиушко, Д.Г. Колиушко, С.С. Руденко

# К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА НОРМИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

В роботі проаналізовано фактори, які впливають на точність розрахунку нормованих параметрів заземлювальних пристроїв діючих електроустановок. Були розроблені та запропоновані напрями для підвищення точності розрахунку нормованих параметрів заземлювальних пристроїв, які полягають у вдосконаленні як експериментального, так і розрахункового етапів електромагнітної діагностики стану систем заземлення.

В работе проанализированы факторы, влияющие на точность расчета нормируемых параметров заземляющих устройств. Были выработаны направления и предложены способы для повышения точности расчетов нормированных параметров заземляющих устройств, заключающиеся в усовершенствовании как экспериментального, так и расчетного этапов электромагнитной диагностики состояния системы заземления.

#### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одним из важнейших элементов электроустановки является заземляющее устройство (ЗУ), предназначенное для обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала и нормального функционирования оборудования. По своему конструктивному исполнению наиболее сложными являются ЗУ открытые распределительные устройства. В процессе эксплуатации как ЗУ, так и сама электроустановка претерпевают изменения, которые могут привести к тому, что параметры ЗУ не будут удовлетворять нормативным величинам по следующим причинам:

• воздействия коррозии на элементы ЗУ (нарушения целостности сетки ЗУ и повреждения заземляющих спусков на границе земля-воздух);

• некорректного восстановления заземления старых и подсоединения новых единиц оборудования к существующему ЗУ (последовательного соединения оборудования, присоединения к металлическим частям, не имеющим гальванической связи с ЗУ);

• повреждения ЗУ в результате замены или ремонта оборудования (обрывов горизонтальных заземлителей при земляных работах);

• увеличения мощности электроустановки с ростом значений токов короткого замыкания (КЗ) (возможного превышение допустимых значений напряжения прикосновения и потенциала на ЗУ).

Для оценки работоспособности ЗУ используются нормируемые параметры [1], которые периодически контролируются в течение всего срока эксплуатации [2]. К ним относят: сопротивление ЗУ, напряжение на ЗУ и напряжение прикосновения. На эти величины оказывают влияние следующие факторы: конструктивное исполнение ЗУ, электрофизические параметры грунта (удельное сопротивление и мощность слоев) и характеристики объекта (значение тока КЗ, время срабатывания защиты, класс напряжения и т.д.).

Определение сопротивления ЗУ в процессе эксплуатации можно производить как экспериментально, так и расчетным путем, однако, напряжение прикосновения при реальном токе замыкания на землю и потенциал на ЗУ можно найти только путем выполнения соответствующих вычислений, как правило, с помощью специальных компьютерных программ. На основании результатов расчета вырабатываются рекомендации по реконструкции ЗУ, а также проверяется их эффективность.

Целью работы является анализ факторов, влияющих на точность расчета нормируемых параметров ЗУ, а также определение направлений для ее повышения.

#### 1. ОБЩИЙ АНАЛИЗ

Методика электромагнитной диагностики (ЭМД) состояния ЗУ энергообъектов, которая получила распространение в Украине, предполагает выполнение трех этапов [3].

Основной целью ЭМД является разработка рекомендаций по реконструкции ЗУ для приведения его в соответствие с требованиями нормативных документов. Это является сложной технической задачей, поскольку при ее решении необходимо определить оптимальные места прокладки заземлителей для экономии трудовых и материальных затрат и реализовать наиболее полное использование существующего ЗУ.

В упрощенном виде процесс решения задачи можно представить в виде блок-схемы (см. рис. 1). Из рис. 1 видно, что первый этап ЭМД включает в себя такие экспериментальные исследования, как:

• определение конструктивного исполнения ЗУ, необходимого для построения математической модели ЗУ, находящегося в двухслойном грунте;

• определение электрофизических параметров грунта методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ);

• измерение электрических параметров ЗУ, необходимых для оценки адекватности математической модели реальному ЗУ.

В последний пункт входят измерения сопротивления растеканию токов КЗ с ЗУ, а также напряжения прикосновения и напряжения на ЗУ относительно одной из единиц оборудования при имитации КЗ.

Результаты этих экспериментальных исследований совместно с характеристиками энергообъекта (его типом, классом напряжения, величиной токов КЗ, временем срабатывания защиты, режимом работы нейтрали трансформаторов), являются исходными данными для проведения расчетов на втором этапе. При проведении расчетов математическая модель ЗУ вместе со средствами интерпретации кривых ВЭЗ и эквивалентирования грунта образуют программно-аппаратный комплекс, позволяющий рассчитать нормируемые параметры ЗУ.

На третьем этапе производится разработка необходимых рекомендаций, а также на основании сравнения расчетных ( $\Pi_{pac}$ ) и допустимых ( $\Pi_{доп}$ ) оценивается целесообразность введения дополнительных рекомендаций для проведения реконструкции ЗУ.



Рис. 1

Погрешность определения нормируемых параметров ЗУ вносится при выполнении первого и второго этапа ЭМД. Поэтому факторы, которые могут влиять на точность расчета, следует выделять на основании анализа указанных этапов.

#### 2. АНАЛИЗ ПЕРВОГО ЭТАПА

#### 1) определение конструктивного исполнения ЗУ

Под процедурой определения конструктивного исполнения ЗУ подразумевается нахождение расположения и глубины залегания заземлителей, а также путей растекания тока с оборудования.

Контроль конструктивного исполнения ЗУ осуществляется визуальным или индукционным методами. Визуальная проверка проводится после монтажа перед присоединением естественных заземлителей и заземляющих элементов до засыпки грунта [2]. Применение этого метода в действующих электроустановках является трудоемким и материально затратным из-за необходимости откапывания элементов ЗУ. Поэтому наибольшее распространение получил индукционный метод [2, 3], позволяющий определить конструктивное исполнение ЗУ без вскрытия грунта и отключения оборудования.

Для обнаружения горизонтальных заземлителей (ГЗ) применяются различные приборы и комплексы [4] (например: трассоискатель ТМ-5 с генератором ТГ-12 или КДЗ-1У), а также технические средства [5, 6], позволяющие определить наличие вертикальных заземлителей (ВЗ).

В целом методика определения конструктивного исполнения ЗУ характеризуется значительной проработкой и практической реализацией, а к актуальным проблемам, возникающим на данном этапе, относят:

• отсутствие возможности определения длины ВЗ и их отыскания в местах пересечения ГЗ, а также

• отсутствие различий в идентификации ГЗ и трассы кабеля, по оплетке которого протекает инжектируемый ток.

Перечисленные факторы влияют на точность соответствия расчетной схемы в части конструктивного исполнения, что повышает погрешность расчета и может привести либо к неоправданному росту материальных затрат при реконструкции ЗУ, либо к превышению допустимых значений нормируемых параметров.

#### 2) проведение ВЭЗ

Целью проведения ВЭЗ является определение параметров геоэлектрической структуры [7-14] путем инжектирования генератором испытательного тока и измерения падения напряжения на определенном участке поверхности грунта. При этом величина разноса токовых и потенциальных электродов обуславливается типом установки и глубиной зондирования. Электрофизические характеристики грунта (количество слоев, их удельное сопротивление и мощность) определяют с использованием различных средств интерпретации (палеток или специальных расчетных программ) [7-10].

Аппаратура, методика проведения ВЭЗ и средства интерпретации являются хорошо развитыми как теоретически, так и практически в рамках проведения геологических изысканий [9].

В настоящее время известен ряд специализированных компьютерных программ для 1-D, 2-D и 3-D интерпретации ВЭЗ, а также множество установок для проведения ВЭЗ, позволяющих решать узконаправленные геологические задачи [8, 9, 11, 12]. Однако, при проектировании и диагностике ЗУ для проведения ВЭЗ обычно используют четырехэлектродные симметричные установки Веннера и Шлюберже, или несимметричные Бургсдорфа [7, 10, 13], что связанно с особенностями представления грунта в математических моделях для расчета нормируемых параметров ЗУ (т.е. в виде слоистого проводящего полупространства с плоскопараллельными границами раздела).

Полученные при интерпретации данных ВЭЗ результаты (соотношение удельных сопротивлений слоев, их мощность и число) фактически определяют величину нормируемых параметров при расчете конкретной конфигурации ЗУ. Но при этом в известных публикациях вопросам проведения ВЭЗ, применяемым приборам и средствам интерпретации кривых ВЭЗ при контроле состояния ЗУ на действующих электроустановках уделяется недостаточно внимания:

• не сформулированы критерии выбора установки в зависимости от особенностей объекта;

 отсутствуют четкие требования к используемым приборам при проведении ВЭЗ, в зависимости от величины удельного сопротивления грунта и глубины зондирования;

 однозначная зависимость между размерами ЗУ и величиной разноса токовых электродов, фактически определяющих глубину зондирования, в работе [7] приведена только для несимметричной установки Бургсдорфа без теоретического обоснования или экспериментального подтверждения.

Кроме этого, математический аппарат и специальные программы, определяющие структуру многослойного грунта на основании данных ВЭЗ, предназначены для решения узконаправленных геологических задач и не адаптированы к применению при ЭМД ЗУ, а применение существующих универсальных палеток является трудоемким и неоднозначным.

В НИПКИ "Молния" при проведении диагностики ЗУ используется установка Веннера, которая характеризуется рядом таких преимуществ, как:

• высокий уровень сигнала;

• хорошая чувствительность к горизонтальным границам раздела слоев;

• слабая чувствительность к вертикальным границам, которая ослабляет влияние нетипичных включений, имеющих локальный характер и не оказывающих значительного влияния на растекание токов с ЗУ.

Существенным недостатком установки Веннера можно считать малую глубину зондирования, которая ориентировочно равна 1/3 от величины разноса токовых электродов [12]. При этом отметим, что в настоящее время не существует единого мнения в части глубинности установок ВЭЗ (в том числе и установки Веннера), поэтому для её оценки могут быть использованы различные способы [14].

Согласно результатам, приведенным в работе [7], наибольшая диагональ ЗУ D фактически определяет требуемую глубину зондирования. Учитывая, что место для проведения ВЭЗ ограниченно несколькими десятками метров (поскольку ЗУ исследуемых объектов зачастую окружены промышленными и жилыми сооружения, коммуникациями и т.п.), то актуальной является оценка требуемой глубины зондирования.

На рис. 2 приведена гистограмма плотности вероятности наибольшей диагонали для 466 ЗУ электрических подстанций, диагностика которых была проведена в период с 2007 по 2012 гг.

Из анализа рис. 2 следует, что для 65 % ЗУ наибольшая диагональ лежит в пределах 20-100 м, т.е. величина разноса токовых электродов при применении установки Веннера, согласно работе [7], составляет 60-300 м соответственно, что может быть реализуемым на практике. С учетом того, что оставшиеся 35 % ЗУ являются частью стратегически важных объектов (т.е. относятся к ОРУ магистральных подстанций классом напряжения от 220 кВ до 750 кВ, а также АЭС, ТЭС и ГЭС), а разнос электродов на 360-3000 м практически невозможен из-за отсутствия свободной территории вблизи большинства таких объектов, то необходимо решить следующие задачи:

 провести анализ существующих методик проведения ВЭЗ и разработать рекомендации по их применимости для конкретных объектов;

2) исследовать эффективную глубину растекания тока КЗ с ЗУ в случае многослойных грунтов для определения величины разноса электродов установок ВЭЗ при диагностике ЗУ действующих энергообъектов;

3) разработать новую методику проведения ВЭЗ вблизи ОРУ при диагностике ЗУ с D>360 м, а также средства интерпретации его результатов;

4) разработать методики проведения ВЭЗ на территории ОРУ, учитывающей влияние ЗУ.



Отметим, что основой методики проведения ВЭЗ вблизи ОРУ при диагностике ЗУ с D > 360 м может быть комбинированный способ проведения ВЭЗ с помощью установок Веннера (для верхних слоев) и Шлюмберже (для нижних слоев), в которой глубина зондирования (согласно работе [12]) на 10-30 % больше. Это позволяет оптимально использовать достоинства существующих установок ВЭЗ применительно к диагностике ЗУ действующих электроустановок.

#### 3. АНАЛИЗ ВТОРОГО ЭТАПА 1) интерпретация результатов ВЭЗ В изоточно в рази в ШИЦКИ "Моличи

В настоящее время в НИПКИ "Молния" разработаны и используются компьютерные программы "ВЭЗ-3" [15] и "ВЭЗ-2-Авто" [16], позволяющие интерпретировать результаты ВЭЗ в трехслойную и двухслойную геоэлектрическую структуру грунта соответственно. Однако получаемые при проведении ЭМД ЗУ кривые ВЭЗ чаще всего соответствуют геоэлектрической структуре с числом слоев три и более.

В частности, на ряде электрических подстанций классом напряжения 35 кВ, расположенных на севере Украины, в результате проведения ВЭЗ были получены кривые характерные для четырехслойной структуры грунта, одна из которых приведена на рис. 3.

Как следует из рис. 3, ни трехслойная модель, ни тем более двухслойная не позволяют с достаточной точностью описать полученные экспериментальные точки кривой ВЭЗ. Поэтому разработка средств и методов интерпретации результатов ВЭЗ, полученных с помощью установки Веннера, для грунтов с количеством слоев более трех также является актуальной задачей для повышения точности расчета ЗУ.



 экспериментальные значения; 2 – кривая интерпретации двухслойной моделью грунта; 3 – кривая интерпретации трехслойной моделью грунта Рис. 3

#### 2) математическое моделирование процессов КЗ на ЗУ

Как показывает практика, используемая в настоящее время для расчета нормируемых параметров при КЗ математическая модель неэквипотенциального ЗУ, размещенного в двухслойном грунте [17], может давать существенную погрешность. В значительной степени это связано с методической погрешностью: например, исследуемое ЗУ находится в трехслойном грунте, а приведение его к эквивалентному двухслойному значительно искажает картину распределения электрического поля.

В результате проведения ЭМД ЗУ одной из подстанций классом напряжения 35 кВ, расположенной на севере Украины, была зафиксирована значительная погрешность при расчете его сопротивления. Учитывая, что вблизи подстанции нет коммуникаций, и с нее не осуществляется вынос потенциала, наиболее вероятной причиной погрешности расчета являлось приведение ярко выраженной трехслойной структуры грунта (которую отражает кривая 3 на рис. 4) к эквивалентной двухслойной структуре (которую отражает кривая 2 на рис. 4). При этом глубина эквивалентирования согласно рекомендациям работы [7] равнялась максимальной глубине залегания  $\Gamma 3 - 0,4$  м.

На рис. 5 приведен план данной подстанции с ЗУ, определенным индукционным методом. Для оценки методической погрешности, вызванной представлением трехслойного грунта в виде эквивалентного двухслойного, был произведен расчет потенциала для сетки ЗУ подстанции (см. рис. 6), образованного бесконечно тонкими электродами, начало и конец которых представлены номерами узлов 1-23. При проведении расчета заземляющие спуски не учитывались, так как их вклад в распределение потенциала незначителен.

Для моделирования ЗУ использовалась тестовая программа, основанная на модели поля точечного источника тока [18], расположенного в трехслойном проводящем полупространстве, которая позволяет рассчитать распределение потенциалов поля при заданной плотности тока.



экспериментальные значения; 2 – кривая интерпретации двухслойной моделью грунта; 3 – кривая интерпретации трехслойной моделью грунта



— – ГЗ; ● – заземляющий спуск; Рис. 5



На первом этапе оценивалась эквивалентность результатов расчета, полученных с использованием разработанной модели и модели [17]. Средняя погрешность найденных потенциалов в узлах сетки 1-23 составила менее 0,15 % при использовании в обоих случаях эквивалентной двухслойной геоэлектрической структуры (представленной кривой 2 на рис. 4). Таким образом, результаты, полученные с помощью тестовой модели, являются достоверными.

На втором этапе рассчитывалось распределение потенциалов в узлах ЗУ (см. рис. 6) для двух типов грунта: исходного трехслойного (представленного кривой 3 на рис. 4) и эквивалентного ему двухслойного (представленного кривой 2 на рис. 4).

В табл. 1 показаны погрешности расчета потенциала для различных глубин: на поверхности грунта (z = 0 м), на глубине залегания ЗУ (z = 0,42 м) и на глубине равной наибольшей диагонали ЗУ (z = 35 м).

Номер узда	Погрешность расчета потенциала б, %						
помер узла	z = 0  M	<i>z</i> = 0,42 м	<i>z</i> = 35 м				
1	24	34	-8,2				
2	24,3	34,1	-8,2				
3	24,5	33,6	-8				
4	28,7	38,4	-7,8				
5	30,9	37,2	-7,7				
6	29,7	36	-7,6				
7	28,5	35	-7,6				
8	27,7	35	-7,8				
9	23,4	32,6	-7,9				
10	32,7	40,9	-7,8				
11	32,2	38,1	-7,8				
12	29,3	36,4	-7,9				
13	25,6	34,4	-8,1				
14	25,2	33,4	-7,8				
15	34	41,2	-7,6				
16	33,8	41,1	-7,6				
17	28,9	35,4	-7,6				
18	30,6	38,4	-7,5				
19	31,9	39,7	-7,6				
20	24,5	33,5	-8				
21	33	38,9	-7,8				
22	32,6	38,5	-7,7				
23	34,2	39,3	-7,7				

Таблица 1

При анализе результатов, приведенных в табл. 1, видно, что погрешность расчета потенциалов на поверхности земли (используемых при определении напряжения прикосновения) находится в пределах 32,6 % – 41,2 %, а на глубине залегания ЗУ (используемых для определения сопротивления и потенциала ЗУ) – от 23,4% до 34,2%.

Таким образом, методическая погрешность, вносимая приведением трехслойной геоэлектрической структуры к эквивалентной двухслойной, может оказывать существенное влияние на результаты моделирования процессов КЗ на ЗУ. Для ее устранения необходимо разработать математическую модель неэквипотенциального ЗУ произвольной конфигурации, размещенного в трехслойном грунте.

#### выводы

Проведенный в работе анализ показал, что на точность расчета нормируемых параметров ЗУ влияют следующие факторы:

• ошибка при определении конструктивного выполнения ЗУ (неучет ВЗ, недостаточно точное определение глубины залегания ЗУ, идентификация ГЗ); • погрешность, при проведении ВЭЗ и интерпретации его результатов (недостаточная глубина зондирования, отсутствие средств интерпретации многослойных структур);

• методическая погрешность математической модели из-за приведения многослойной геоэлектрической структуры к эквивалентной двухслойной.

Для повышения точности расчёта необходимо:

1. Разработать методику определения длины вертикальных заземлителей и их наличия в местах пересечения горизонтальных шин, а также определения отличий между заземлителем и кабелем, по оплетке которого протекает инжектируемый ток.

2. Разработать математический аппарат для интерпретации результатов ВЭЗ, полученных установкой Веннера, для геоэлектрических структур с числом слоев более трех применительно к ЭМД ЗУ.

3. Определить глубину зондирования, достаточную для проведения расчетов в зависимости от площади или наибольшей диагонали ЗУ.

4. Сформулировать критерии для выбора типа установки ВЭЗ и используемых приборов при проведении ЭМД состояния ЗУ в зависимости от характеристик энергообъекта и параметров грунта.

5. Разработать комбинированную методику ВЭЗ, позволяющую проводить зондирование грунта на достаточную глубину в условиях плотной застройки территории энергообъекта и вблизи него, а также математический аппарат и программные средства для интерпретации полученных данных.

6. Разработать математическую модель неэквипотенциального ЗУ произвольной конфигурации, размещенного в трехслойном грунте.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила улаштування електроустановок. Розділ 1. Загальні правила. Глава 1.7. Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом [Чинний від 29.06.2011]. – К.: Міненерговугілля України, 2011. – 72 с. – (Національний стандарт України).

2. Випробування та контроль пристроїв заземлення електроустановок. Типова інструкція. СОУ 31.2-21677681-19:2009 [Чинний від 29.03.2010]. – К.: Мінпаливенерго України, 2010. – 54 с. – (Національний стандарт України).

3. Борисов Р.К., Колиушко Г.М., Гримуд Г.И. Методика исследования заземляющих устройств объектов электроэнергетики // Энергетика и электрификация. – 2000. – №4. – С. 29-32.

4. Колиушко Г.М., Доценко В.И., Колиушко Д.Г., Недзельский О.С. Измерительный комплекс для проведения диагностики состояния заземляющих устройств электроэнергообъектов // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Електроенергетика і перетворююча техніка. – 2002. – №7. – С. 157-166.

5. Резинкин О.Л., Колиушко Д.Г. Индукционный датчик для диагностики контуров заземления высоковольтных подстанций // Энергетика и электрификация. – 1999. – №8. – С. 36-39.

6. Кандаев В.А., Свешников Н.Ю. Метод определения контакта между вертикальным элементом и сеткой контура заземления // Первая Российская конференция по заземляющим устройствам: сборник докл. – Новосибирск, 2002. – С. 149-155.

7. Коструба С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.

8. Заборовский А.И. Электроразведка. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 424 с.

9. Акуленко С.А., Березина С.А., Бобачев А.А. Электроразведка методом сопротивлений. Под ред. В.К. Хмелевского и В.А. Шевнина. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 160 с.

10. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.

11. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований. – М.: Научный мир, 2007. – 248 с.

12. Балков Е.В., Панин Г.Л., Манштейн Ю.А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения [Электронный ресурс]. – Новосибирск: инс-т нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 2010. – 21 с. – Режим доступа: http://www.nemfis.ru/etom.pdf.

13. Hördt. A. Praktikumsunterlagen Angewandte Geophysik und Geoelektrik. – Technische Universität Braunschweig Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik. – 2006. – 11 s.

14. Шевнин В.А., Колесников В.П. Оценка глубинности ВЭЗ для однородной и слоистой среды [Электронный ресурс] // Электронный журнал ГЕОразрез. – 2011. – №1(8). – С. 1-9. – Режим доступа: http://www.georazrez.ru/ download/2011/08/Shevnin-Otcenka glubinnosti VEZ.pdf.

15. Руденко С.С., Коліушко Д.Г. Авторське свідоцтво України № 47198 від 14.01.2013. Компьютерная программа интерпретации результатов вертикального электрического зондирования "ВЭЗ-3".

16. Руденко С.С., Коліушко Д.Г. Авторське свідоцтво України № 47469 від 28.01.2013. Компьютерная программа автоматической интерпретации результатов вертикального электрического зондирования "ВЭЗ-2-Авто".

17. Линк И.Ю., Колиушко Д.Г., Колиушко Г.М. Математическая модель неэквипотенциального заземляющего устройства подстанции, размещенного в двухслойном грунте // Электронное моделирование. – 2003. – Т.25. – №2. – С. 99-111.

18. Колиушко Д.Г., Руденко С.С. Электрическое поле точечного источника тока в земле с трехслойной структурой // Электронное моделирование. – 2011. – Т.33. – №6. – С. 101-111.

REFERENCES: 1. Pravila ulashtuvannya elektroustanovok. Rozdil 1. Zagal'ni pravila. Glava 1.7 Zazemlennya i zakhisni zakhodi vid urazhennya elektrichnim strumom [Rules of the device electroinstallations. Chapter 1. General rules. Grounding and protective measures against electric shock]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2011. 72 p. 2. Viprobuvannya ta kontrol' pristroyiv zazemlennya elektroustanovok. Tipova instruktsiya. SOU 31.2-21677681-19:2009 [Test and control devices, electrical grounding. Standard instruction. SOU 31.2-21677681-19:2009]. Kyiv, Minenergovugillya Ukrayiny Publ., 2010. 54 p. 3. Borisov R.K., Koliushko G.M., Grimud G.I. Technique to study the ground grids of electric power facilities. Energetika i elektrifikatsiya -Energy and Electrification, 2000, no.4, pp. 29-32. 4. Koliushko G.M., Dotsenko V.I., Koliushko D.G., Nedzel'skii O.S. Measuring system for diagnosis of the state of ground grids of electric facilities. Visnyk NTU "KhPI" - Bulletin of NTU "KhPI", 2002, no.7, pp. 157-166. 5. Rezinkin O.L., Koliushko D.G. Inductive sensor for the diagnosis of high-voltage substation grounding. Energetika i elektrifikatsiya - Energy and Electrification, 1999, no.8, pp. 36-39. 6. Kandaev V.A., Sveshnikov N.Yu. Method for determination of contact between the vertical element and the grid circuit grounding Pervaya Rossiiskaya konferentsiya po zazemlyayushchim ustroistvam: sbornik dokl [First Russian Conference on ground grids: collection of reports]. Novosibirsk, 2002, pp. 149-155. 7. Kostruba S.I. Izmerenie elektricheskikh parametrov zemli i zazemlyayushchikh ustroistv [Measurement of electrical parameters of earth and ground grids]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 168 p. 8. Zaborovskii A.I. Elektrorazvedka [Electroinvestigation]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1963. 424 p. 9. Khmelevskoy V.K., Shevnin V.A. Elektrorazvedka metodom soprotivlenii [Geoelectrical resistivity], Moscow, MGU Publ., 1994. 160 p. 10. Burgsdorf V.V., Yakobs A.I. Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p. 11. Kolesnikov W.P. Osnovy interpretatsii elektricheskikh zondirovanii [Fundamentals of electrical sounding interpretation]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2007. 248 p. 12. Balkov E.W., Panin G.L., Manshtein Yu.A. Elektrotomografiya: apparatura, metodika i opyt primeneniya (Elektrotomografiya: equipment, technique and experience using) Available at: http://www.nemfis.ru/etom.pdf (accessed 5 November 2013). 13. Hördt A. Praktikumsunterlagen Angewandte Geophysik und Geoelektrik. Technische Universität Braunschweig Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik, 2006. 11 p. 14. Shevnin V.A., Kolesnikov W.P. Otsenka glubinnosti VEZ dlya odnorodnoi i sloistoi sredy [Rating depth VES for the uniform and layered medium]. Elektronnyi zhurnal "GEOrazrez" - Electronic Journal "GEORazrez"., 2011, no.1(8), pp. 1-9. http://www.georazrez.ru/download/2011/08/Shevnin-Available at: Otcenka glubinnosti VEZ.pdf (accessed 10 November 2013). 15. Rudenko S.S., Koliushko D.G. Komp'vuternava programma avtomaticheskoi interpretatsii rezul'tatov vertikal'nogo elektricheskogo zondirovaniya "VEZ-3" [Computer software for the interpretation of vertical electrical sounding "VEZ-3"] Certificate of Authorship, UA, no.47198, 2013 16. Rudenko S.S., Koliushko D.G. Komp'yuternaya programma avtomaticheskoi interpretatsii rezul'tatov vertikal'nogo elektricheskogo zondirovaniya "VEZ-2-Avto" [Computer software for the interpretation of vertical electrical sounding "VEZ-2-Auto"] Certificate of Authorship, UA, no.47469, 2013. 17. Link I.Yu., Koliushko D.G., Koliushko G.M. A mathematical model is not an equipotential ground grids substation placed in a double layer Electronnoe modelirovanie - Electronic modeling, 2003, vol.25, no.2, pp. 99-111. 18. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Electric field of a point source of current in the ground with a three-layer structure *Electronnoe modelirovanie* Electronic modeling, 2011, vol.33, no.6, pp. 101-111.

Поступила (received) 02.06.2014

Колиушко Георгий Михайлович<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., Колиушко Денис Георгиевич<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., Руденко Сергей Сергеевич<sup>1</sup>, аспирант, м.н.с., <sup>1</sup> Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, е-mail: nio5\_molniya@ukr.net

*G.M. Koliushko<sup>1</sup>*, *D.G. Koliushko<sup>1</sup>*, *S.S. Rudenko<sup>1</sup>* <sup>1</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine On the problem of increasing computation accuracy for

rated parameters of active electrical installation ground grids.

In the paper, factors having effect on computation accuracy of ground grid rated parameters are analyzed. Directions and techniques for increasing the rated parameter computation accuracy are suggested. The techniques consist in improvement of both experimental and computational stages of electromagnetic diagnostics of the ground system condition.

*Key words* – ground grid, mathematical model, three-layer geoelectric structure.
И.В. Нижевский, В.И. Нижевский, С.Л. Шишигин

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫРАВНИВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ ПО ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ НА ЗАНЯТОЙ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕМ ТЕРРИТОРИИ

Наведено аналіз результатів дослідження розподілу електричних потенціалів по поверхні землі на зайнятій заземлювачем території. Показано, що потенціал над центром квадратного заземлювача може бути вище, ніж над електродом. Запропоновано оцінювати граничний розмір комірки складного сіткового заземлювача в залежності від глибини його укладання. Встановлено, що дворівнева конструкція заземлювача зменшує напругу дотику. Новизна результатів полягає в тому, що з використанням математичної моделі досліджені електричні характеристики заземлювача у вигляді дворівневої конструкції.

Приведен анализ результатов исследования распределения электрических потенциалов по поверхности земли на занятой заземлителем территории. Показано, что потенциал над центром квадратного заземлителя может быть выше, чем над электродом. Предложено оценивать предельный размер ячейки сложного сеточного заземлителя в зависимости от глубины его укладки. Установлено, что двухуровневая конструкция заземлителя уменьшает напряжение прикосновения. Новизна результатов состоит в том, что с использованием математической модели исследованы электрические характеристики заземлителя в виде двухуровневой конструкции.

Подавляющее большинство электрических станций, крупных подстанций (ПС) и открытых распределительных устройств, которые являются электроустановками с напряжением выше 1 кВ, работают в сетях с эффективно заземленной нейтралью. Согласно требованиям ПУЭ [1], любая электроустановка в обязательном порядке должна иметь заземляющее устройство (ЗУ). Проектирование заземляющих устройств электрических подстанций проводится по критериям электробезопасности и электромагнитной совместимости (ЭМС) [2]. Электробезопасность обеспечивается нормированием величины напряжения прикосновения (вторая норма ПУЭ), которое не должно превышать нормируемого значения по [1] и достигается выбором размеров ячеек заземляющей сетки. Альтернативным критерием является нормирование сопротивления ЗУ, которое не должно быть выше 0,5 Ом (первая норма ПУЭ), но ее применение не обеспечивает электробезопасность на ПС с большими токами короткого замыкания (КЗ) и ведет к избыточной металлоемкости ЗУ ПС с малыми токами [3].

К требованиям ЭМС относится ограничение величины напряжения на ЗУ при КЗ до значения 5 кВ [2], что при заданном токе эквивалентно ограничению сопротивления ЗУ, но в отличие от первой нормы ПУЭ его значение индивидуально для каждой ПС. Проектные решения по снижению сопротивления ЗУ целесообразны для любого объекта, но для ПС с большими токами и/или в грунте с низкой проводимостью они неизбежны. Рекомендуемые способы [2-4], связанные с использованием глубинных и выносных заземлителей, не всегда реализуемы, поэтому перед проектировщиком встает задача исключения выноса высокого потенциала и защиты от перенапряжений отходящих кабельных линий.

Возникающие при проектировании ЗУ электроустановок задачи зачастую требуют для их решения достаточно сложных компьютерных программ, которые позволяют быстро найти необходимое оптимальное решение, например, программы СТОК, ЗУМ, ORU M и другие. В работе [5] была опубликована идея выравнивания электрических потенциалов в зоне заземления электроустановки путем заложения заземлителя на глубину, близкую к критической. Позже, в работе [6] было отмечено, что многие специалисты продолжают считать до сих пор, что идеально выровненное распределение электрических потенциалов может иметь место только и только в том гипотетическом случае, когда заземлитель выполнен из металлического листа размером, равным территории электроустановки. Выполнение такого заземлителя связано с огромными затратами и на практике, естественно, никогда не осуществляется.

Исследования распределения электрических потенциалов по поверхности земли над заземлителем в виде кольца в зависимости от глубины его заложения представлены в работе [6]. При этом показано, что на поверхности земли над центром кольца электрический потенциал может быть больше, чем над электродом. Аналогичный результат наглядно проиллюстрирован и в работе [7].

Цель статьи. На основании исследований показать, что такое распределение для кольцевого заземлителя подобным образом проявляется и для квадратного заземлителя, а также заземлителя в виде уложенной в грунте сетки с квадратными и прямоугольными ячейками, или ячейками других форм.

В статье на конкретных заземлителях исследуется вопрос оптимального выравнивания электрических потенциалов по поверхности земли на занимаемой заземлителем площади.

Исследования выполнены с помощью разработанной авторами программы расчета сложных заземлителей (см. приложение) на основе метода наведенного потенциала.

В связи с тем, что ЗУ подстанций выполняются в виде сетки с продольными и поперечными электродами и уложенным по её периметру контуром из горизонтальных электродов, в работе вначале выполнено исследование заземлителя в виде квадрата (одна уединенная ячейка сетки) со стороной *а* различных размеров: 10 м; 5 м, 2,5 м, 1 м. Диаметр электродов принят равным d=18 мм как в случае одной сетки, так и в случае двухуровневой сетки.

Исследования выполнены для наиболее распространенных типов грунтов: влажных глинистых, сухих песчаных и влажных черноземных с глубиной залегания зоны грунтовых вод на расстоянии h=5 м от поверхности земли, т.е. мощность верхнего слоя во всех случаях, кроме оговоренных отдельно, принята одинаковой.

Таким образом, в исследованиях принята двухслойная модель грунта с толщиной нижнего слоя грунта, равной бесконечности. Удельное электрическое сопротивление верхнего слоя грунта принималось равным 20 Ом·м, 100 Ом·м, 500 Ом·м и 1000 Ом·м в то время, как удельное электрическое сопротивление нижнего слоя грунта во всех случаях принималось равным 100 Ом·м. При этом, удельное электрическое сопротивление грунта в каждом слое по его глубине принималось однородным. В действительности, грунт может иметь существенную неоднородность по проводимости, что должно учитываться при проектировании ЗУ. Неоднородность зачастую обусловлена просыханием грунта летом, промерзанием зимой, а также уровнем залегания зоны грунтовых вод.

Рассмотрим результаты исследования распределения электрического потенциала по поверхности земли для квадратного заземлителя, заложенного в двухслойном грунте с толщиной верхнего слоя h=1 м. Диаметр электрода заземлителя d=18 мм. Глубина t заложения заземлителя варьировалась в пределах от 0,1 м до 1,5 м. Удельное электрическое сопротивление верхнего слоя грунта р<sub>1</sub> принималось равным 20 Ом·м, 100 Ом·м и 500 Ом·м, а нижнего  $\rho_2 - 100$  Ом·м. Оценка распределения электрического потенциала по поверхности земли осуществлялась в направлении х перпендикулярном к стороне квадрата и проходящем через его центр за пределы противоположной стороны квадрата. Результаты исследования при глубине заложения заземлителя t=0,7 м в качестве примера представлены на рис. 1-3 в виде зависимостей  $\phi/\phi_3 = f(x)$ . Проанализируем рис. 1, на котором представлены кривые зависимости относительного электрического потенциала на поверхности земли в направлении x, т.е.  $\phi/\phi_3 = f(x)$ .

Характерной особенностью является то, что кривые зависимости смещаются в сторону меньших значений относительного электрического потенциала при увеличении отношения  $\rho_1/\rho_2 = (0,2; 1; 5)$ . Анализ результатов показывает, что по поверхности земли над квадратным заземлителем и за его пределами величина относительного потенциала снижается с ростом отношения  $\rho_1/\rho_2$  тем больше, чем больше это отношение при любом размере квадратного заземлителя.

Кроме того, величина относительного потенциала над центром квадратного заземлителя оказывается выше, чем над электродом при значениях отношения  $\rho_1/\rho_2 \le 1$ , а при возрастании значения отношения  $\rho_1/\rho_2 > 1$  величина относительного электрического потенциала становится ниже и уменьшается с ростом  $\rho_1/\rho_2$ .



Рис. 1. График зависимости относительного потенциала от расстояния *x* для квадратного заземлителя со стороной *a*=2,5 м: квадратный заземлитель на нижнем уровне (пунктирная линия); квадратный заземлитель двухуровневый (сплошная линия)

Вместе с тем, уменьшение отношения  $\rho_1/\rho_2$  приводит к более быстрому увеличению относительного потенциала в центре квадратного заземлителя, чем над электродом. При этом величина относительного потенциала над центром квадратного заземлителя не только становится равной величине относительного потенциала над электродом, но и становится больше. Увеличение размера *а* стороны квадрата, как показано на рис. 2 и рис. 3, приводит к аналогичным результатам, за исключением того, что величина относительного электрического потенциала на поверхности земли в точке над центром квадратного заземлителя при всех значениях отношения  $\rho_1/\rho_2$  меньше, чем над электродом.



Рис. 2. График зависимости относительного потенциала от расстояния *x* для квадратного заземлителя со стороной *a*=5м: квадратный заземлитель на нижнем уровне (пунктирная линия); квадратный заземлитель двухуровневый (сплошная линия)

Кроме того, исследовано влияние глубины t заложения заземлителя в виде квадрата на распределение электрических потенциалов по поверхности земли. При этом глубина t заложения заземлителя варьировалась в пределах от 0,1 м до 4 м.



Рис. 3. График зависимости относительного потенциала от расстояния *x* для квадратного заземлителя со стороной *a*=10 м: квадратный заземлитель на нижнем уровне (пунктирная линия); квадратный заземлитель двухуровневый (сплошная линия)

Результаты исследования распределения электрических потенциалов по поверхности земли в зависимости от глубины заложения заземлителя с помощью его математической модели наиболее наглядно представлены на рис. 4 для заземлителя размером 5×5 м, на рис. 5 для заземлителя размером 2,5×2,5 м, на рис. 6 для заземлителя размером 1×1 м.

Так, например, на рис. 4 представлены зависимости относительного потенциала  $\phi/\phi_3$  на поверхности земли над центром квадрата от относительной глубины t/a заложения заземлителя в грунтах с различным удельным электрическим сопротивлением верхнего слоя земли. Здесь же приведены зависимости относительного потенциала  $\phi/\phi_3 = f(x)$  на поверхности земли над электродом в точке, расположенной посередине стороны квадрата, от относительной глубины заложения t/a заземлителя.



Рис. 4. График зависимости относительного потенциала от относительной глубины заложения квадратного заземлителя со стороной *a*=5 м: над электродом (пунктирная линия); над центром квадрата (сплошная линия)

Анализ приведенных зависимостей свидетельствует о том, что увеличение относительной глубины заложения квадратного заземлителя приводит к нелинейному снижению относительного потенциала  $\phi/\phi_3$  на поверхности земли над электродом при любом

значении удельного электрического сопротивления грунта  $\rho_1$  в исследованном диапазоне от 20 Ом·м до 1000 Ом·м. Кроме того, скорость снижения относительного потенциала  $\phi/\phi_3$  с ростом удельного электрического сопротивления грунта  $\rho_1$  возрастает. Вместе с тем, величина относительного потенциала  $\phi/\phi_3$ на поверхности земли в точке над центром квадратного заземлителя при увеличении относительной глубины заложения t/a от 0,1 до 0,3 возрастает до некоторого максимального значения, а затем, при дальнейшем увеличении t/a, снижается. Чем выше удельное электрическое сопротивление грунта  $\rho_1$ , тем ниже смещается кривая зависимости  $\phi/\phi_3 = f(t/a)$ . При этом, скорость снижения  $\phi/\phi_3$  возрастает с ростом удельного электрического сопротивления грунта  $\rho_1$ .



Рис. 5. График зависимости относительного потенциала от относительной глубины заложения квадратного заземлителя со стороной *a*=2,5 м: над электродом (пунктирная линия); над центром квадрата (сплошная линия)



Рис. 6. График зависимости относительного потенциала от относительной глубины заложения квадратного заземлителя со стороной *a*=1 м: над электродом (пунктирная линия); над центром квадрата (сплошная линия)

Из графика также видно, что кривая зависимости  $\phi/\phi_3 = f(t/a)$ , полученная для точки на поверхности земли над электродом квадратного заземлителя, пересекается с кривой зависимости  $\phi/\phi_3 = f(t/a)$  для точки на поверхности земли над центром квадратного заземлителя при значении t/a=0,3. Это наблюдается при

любом значении удельного электрического сопротивления грунта  $\rho_1$  в рассматриваемом диапазоне.

Таким образом, близкое к равномерному распределение электрических потенциалов по поверхности земли наблюдается при некоторой глубине заложения квадратного заземлителя, определяемой по выражению t=0,3a.

Аналогичные по характеру зависимости получены также и при разных размерах a стороны квадрата. Во всех случаях глубина заложения квадратного заземлителя принята равной t=0,5 м.

Результаты, полученные для других размеров *а* квадратных заземлителей, показаны на рис. 5, 6.

Результаты исследования, приведенные на рис. 7, представляют собой зависимость относительного потенциала  $\phi/\phi_3$  на поверхности земли от размера *a* стороны квадратного заземлителя, то есть  $\phi/\phi_3 = f(a)$ . В данном случае относительный потенциал  $\phi/\phi_3$  также определяется на поверхности земли, как в точке над электродом квадратного заземлителя, так и в точке над его центром. При этом глубина *t* заложения квадратного заземлителя составляет *t*=0,5 м.



Рис. 7. График зависимости относительного потенциала от размера стороны квадрата *a*=5 м: 1 – (ρ<sub>1</sub>/ρ<sub>2</sub>)=0,2; 2 – (ρ<sub>1</sub>/ρ<sub>2</sub>)=1; 3 – (ρ<sub>1</sub>/ρ<sub>2</sub>)=10; над электродом (пунктирная линия); над центром квадрата (сплошная линия)

Исследования выполнены для того же диапазона изменений удельного электрического сопротивления грунта первого слоя  $\rho_1 = 20...1000$  Ом·м и второго ρ₂=100 Ом⋅м. Из рис. 7 также следует, что кривая зависимости  $\phi/\phi_3 = f(a)$  для точки на поверхности земли над центром квадратного заземлителя с ростом а вначале возрастает до некоторого максимального значения относительного потенциала ф/ф<sub>3</sub>, а затем начинает спадать, причем скорость спада возрастает с ростом отношения р<sub>1</sub>/р<sub>2</sub>. Аналогичная кривая зависимости  $\phi/\phi_3 = f(a)$  для точки на поверхности земли над электродом с увеличением размера стороны а вначале возрастает быстрее, а затем этот рост замедляется. Характерным является то, что кривые зависимости  $\phi/\phi_3 = f(a)$  для точки над электродом в начальной части кривой, т.е. при малых а, расположены ниже, чем для точки над центром квадратного заземлителя, а при

значениях *а*>2 м эти кривые располагаются выше. В связи с этим, кривые зависимости  $\phi/\phi_3 = f(a)$  пересекаются в точке, которая определяет допустимый максимальный размер а стороны квадратного заземлителя, расположенного на рассматриваемой глубине t=0,5 м. При этом, величина относительного потенциала  $\phi/\phi_3$  над электродом и над центром квадратного заземлителя равны, т.е. на поверхности земли над заземлителем в пределах его границ оказывается практически полное выравнивание относительного потенциала. Результаты исследования показывают, что неравномерность в распределении электрических потенциалов по поверхности земли для квадратного заземлителя со стороной а=5 м не превышает 30-35 % при удельном электрическом сопротивлении грунта ρ<sub>1</sub>=1000 Ом⋅м и снижается с его уменьшением. В то же время, при максимальном допустимом размере (а=2 м) стороны квадратного заземлителя эта неравномерность на порядок ниже и не превышает 2-3 %, являясь наименьшей.

Установлено также, что неоднородность грунта не влияет на соотношение между максимально допустимым размером стороны квадратного заземлителя *а* и глубиной его заложения *t*.

Кроме того, был исследован квадратный заземлитель в виде двухуровневой конструкции, т.е. на нижнем уровне (глубина заложения t=0,7м) расположен квадратный заземлитель аналогичный приведенному выше, а на верхнем уровне (глубина заложения t=0,35 м) соосно располагался квадратный заземлитель таких же геометрических размеров. Параметры грунта и условия эксперимента аналогичны рассмотренным выше. Результаты исследования в виде графиков зависимости  $\phi/\phi_3 = f(x)$  показаны на рис. 1-3. Отличие полученных результатов состоит в том, что кривые зависимости  $\phi/\phi_3 = f(x)$  располагаются во всех случаях выше, чем в случае одноуровневого квадратного заземлителя. Следовательно, в этом случае напряжение прикосновения будет меньше, т.е. характеристики электробезопасности заземлителя улучшаются.

Теперь рассмотрим сложный заземлитель в виде сетки, состоящей из нескольких одинаковых ячеек, например, 4-х ячеек размером  $5 \times 5$ м. Для угловой ячейки такого заземлителя на рис. 8 показано изменение относительного потенциала  $\phi/\phi_3$  в зависимости от относительной глубины t/a заложения сетки.

Аналогичные зависимости приведены на рис. 9 для сетки с ячейками  $2,5\times2,5$  м, а на рис. 10 для сетки с ячейками  $1\times1$  м, при этом площадь, занимаемая заземляющей сеткой, во всех случаях одинаковая.

Кроме того, полученные зависимости  $\phi/\phi_3 = f(t/a)$  качественно аналогичны приведенным выше для квадратного заземлителя. Зависимость  $\phi/\phi_3 = f(t/a)$  для точки на поверхности земли над электродом угловой ячейки заземлителя располагается выше, чем над центром угловой ячейки. При больших значениях t/a эти зависимости практически совпадают, а при уменьшении они медленно расходятся вплоть до значения t/a=0,2, после чего расхождение существенно возрастает и тем больше, чем больше размер ячейки.



Рис. 8. График зависимости относительного потенциала от относительной глубины заложения заземлителя в виде сетки с размером стороны ячеек *a*=5 м: над внутренним электродом угловой ячейки (пунктирная линия); над центром угловой ячейки (сплошная линия)



Рис. 9. График зависимости относительного потенциала от относительной глубины заложения заземляющей сетки с размером стороны ячеек *a*=2,5 м: над внутренним электродом угловой ячейки (пунктирная линия); над центром угловой ячейки (сплошная линия)



Рис. 10. График зависимости относительного потенциала от относительной глубины заложения заземляющей сетки с размером стороны ячеек *a*=1 м: над внутренним электродом угловой ячейки (пунктирная линия); над центром угловой ячейки (сплошная линия)

Однако, при уменьшении отношения t/a до значения примерно равного 0,2, расхождение в относительных потенциалах во всех случаях не превышает 2-10 %, при этом больший процент относится к большим размерам ячейки и большим значениям удельного электрического сопротивления верхнего слоя грунта. В связи с этим максимально допустимый размер ячейки сетки можно определять по соотношению a=t/0,2. Результаты исследования позволили установить, что максимальный размер а ячейки сетки больше, чем для рассмотренного квадратного заземлителя при одинаковом выравнивании электрических потенциалов по поверхности земли, и может определяться как a=t/0,2. Таким образом, максимально допустимый размер ячейки сложного заземлителя зависит как от глубины заложения заземлителя, так и от числа ячеек при неизменной занимаемой им площади.

Представляет особый интерес исследование сложного двухуровневого заземлителя. На нижнем уровне, на глубине t=0,7 м, заложена сетка с такими же размерами и количеством ячеек, как и ранее рассмотренная. Аналогичная сетка заложена на верхнем уровне, на глубине t=0,35 м, при этом обе сетки электрически связаны между собой. Выполненные исследования распределения электрических потенциалов по поверхности земли для угловой ячейки позволяют отметить следующее.

На рис. 11 представлены зависимости относительного потенциала  $\phi/\phi_3$  от размера *а* стороны ячейки сетки.



Рис. 11. График зависимости относительного потенциала от размера стороны ячейки для двухуровневой заземляющей сетки: 1 − (ρ<sub>1</sub>/ρ<sub>2</sub>)=0,2; 2 − (ρ<sub>1</sub>/ρ<sub>2</sub>)=1; 3 − (ρ<sub>1</sub>/ρ<sub>2</sub>)=10; над внутренним электродом угловой ячейки (пунктирная линия); над центром угловой ячейки (сплошная линия)

Приведенные зависимости показывают, что с уменьшением размера *а* ячейки относительный потенциал на поверхности земли возрастает как над электродом, так и в центре угловой ячейки. Кроме того, кривые зависимости сближаются, т.е. улучшается выравнивание электрических потенциалов на поверхности земли и улучшаются условия электробезопасности – уменьшается напряжение прикосновения.

Зависимости  $\phi/\phi_3 = f(a)$  для двухуровневого заземлителя (см. рис. 11) расположены выше, чем аналогичные зависимости для заземлителя только нижнего уровня. Теперь допустим, что на заданной площади нам необходимо выполнить заземлитель с заданными линейными размерами на заданной глубине *t* и обеспечивающим заданную электробезопасность. В этом случае можно, используя полученные результаты, определить максимально допустимый размер ячейки заземляющей сетки, при котором неравномерность в распределении электрических потенциалов по поверхности земли будет наименьшей (или заданной) для данного типа заземлителя.

Таким образом, полученные результаты позволяют существенно оптимизировать расход металла и объем земляных работ при сооружении заземлителя, а также существенно повысить надежность выполнения требований электробезопасности.

## выводы

При малых глубинах заложения квадратного заземлителя распределение электрических потенциалов на поверхности земли над электродом заземлителя будет выше, чем над центром квадрата, а при больших глубинах наоборот.

При заданной глубине заложения квадратного заземлителя существует такой максимальный его размер, при котором распределение электрических потенциалов по поверхности земли над его центром, над электродом заземлителя и по всей поверхности в пределах квадрата будет близко к равномерному (расхождение менее 2-3 %).

Близкое к равномерному распределение электрических потенциалов по поверхности земли на территории сложного заземлителя можно достичь при большем максимальном размере его ячеек, чем для квадратного заземлителя в виде одной ячейки при одних и тех же условиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок / Мин-во топлива и энергетики РФ – 6-е изд., с изм. и доп. – М.: Главгосэнергонадзор, 1999. – 608 с.

2. СТО 56947007-29.240.044-2010. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства. – М.: ОАО "ФСК ЕЭС", 2010. – 147 с.

3. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.

4. Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств электрических станций и подстанций напряжением 3-750 кВ переменного тока. – М.: Энергосетьпроект. №12740 тм. – т1. 1987.

5. Коструба С.И. Новый способ выравнивания электрических потенциалов в зоне заземления электроустановки // Электричество. – 1970. – №12. – С. 77-80.

6. Коструба С.И. К расчету заземлителей электроустановок с эффективно-заземленной нейтралью // Электрические станции. – 2004. – №6. – С. 55-60.

7. Нижевский В.И., Нижевский И.В. Исследование электрического поля в грунте в окрестностях кольцевого заземлителя // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – №3/4(33). – С. 54-57.

REFERENCES: 1. Pravila ustrojstva elektroustanovok [Rules of the device electroinstallations]. Moscow, Glavgosenergonadzor Publ., 1999. 608 p. 2. STO 56947007-29.240.044-2010. Metodicheskie ukazanija po obespecheniju elektromagnitnoj sovmestimosti na ob'ektah elektrosetevogo hozjajstva [Methodical instructions on ensuring electromagnetic compatibility on objects of electronetwork economy]. Moscow, JSC FGC UES Publ., 2010. 147 p. 3. Burgsdorf V.V., Yakobs A.I. Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p. 4. Rukovodjashhie ukazanija po proektirovaniju zazemljajushhih ustrojstv elektricheskih stancij i podstancij naprjazheniem 3-750 kV peremennogo toka [Guidelines on design of grounding devices of power plants and substations of 3-750 kV of alternating current]. Moscow, Energosetproyekt Publ., 1987, no.12740tm, vol.1. 5. Kostruba S.I. Novyj sposob vyravnivanija elektricheskih potencialov v zone zazemlenija elektroustanovki [A new way of alignment of electric potentials in a zone of grounding of electroinstallation]. *Elektrichestvo – Electricity*, 1970, no.1, pp. 77-80. **6**. Kostruba S.I. K raschetu zazemlitelej elektroustanovok s effektivno-zazemlennoj nejtral'ju [To calculation of grounding conductors of electroinstallations with effective the grounded neutral]. Elektricheskie stantsii - Power Plants, 2004, no.6, pp. 55-60. 7. Nizhevskyi V.I., Nizhevskyi I.V. Issledovanie jelektricheskogo polja v grunte v okrestnostjah kol'cevogo zazemlitelja [Research of electric field in soil in vicinities of a ring grounding conductor]. Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij - East European Journal of Enterprise Technologies, 2008, no.3/4 (33), pp. 54-57.

## Поступила (received) 12.04.2014

Нижевский Илья Викторович<sup>1</sup>, инженер, Нижевский Виктор Ильич<sup>1</sup>, доц., к.т.н., Шишигин Сергей Леонидович<sup>2</sup>, проф., д.т.н., <sup>1</sup> Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел/phone +38 057 7076977, e-mail: nivich1@mail.ru, <sup>2</sup> Вологодский государственный университет, 160000, Россия, Вологда, ул. Галкинская, 3,

тел/phone +7 8172 725093

I.V. Nizhevskyi<sup>1</sup>, V.I. Nizhevskyi<sup>1</sup>, S.L. Shishigin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

<sup>2</sup> Vologda State University

3, Galkinskaya Str., Vologda, 160000, Russia

Research on electric potentials alignment on the ground surface within the grounding conductor territory.

Results of research on distribution of electric potentials on the earth surface in the territory with a grounding conductor are analyzed. It is shown that potential over the center of a square grounding conductor can be higher than that over the electrode. It is suggested to estimate the limit size of the cell of a complex net grounding conductor depending on the depth of its laying. It is found that a two-level design of the grounding conductor reduces touch voltage. Novelty of the results consists in application of a mathematical model to investigating electric characteristics of a two-level grounding conductor versus its laying depth. *Key words* – research, grounding conductor, touch voltage, potential.



 $\left| \begin{array}{l} S_{i,2} \leftarrow A + \frac{h - A_3}{B_3 - A_3} \cdot (B - A) \\ S \leftarrow stack \begin{bmatrix} S, \begin{pmatrix} S_{i,2} & B & R \end{bmatrix} \end{bmatrix} \end{array} \right|$ ORIGIN := 1  $\alpha p(p,q,dl) := |r1 \leftarrow q - p$  $r2 \leftarrow r1 + dl$  $Disc(S,L1) := k \leftarrow 1$  $\begin{array}{l} R1 \leftarrow |r1| \\ R2 \leftarrow |r2| \end{array}$  $for \quad i \in 1 \, . \, rows \, (\, S \,)$  $\left( \left( \begin{array}{ccc} A & L & R \end{array} \right) \leftarrow \left( \begin{array}{ccc} S_{i,1} & S_{i,2} - S_{i,1} & S_{i,3} \end{array} \right) \\$ continue if |L| = 0 $DL \leftarrow |dl|$  $m \leftarrow ceil(|L| \div L1)$  $\frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot if\left(R2 > R1, ln\left(\frac{R2 \cdot DL + r2 \cdot dl}{R1 \cdot DL + r1 \cdot dl}\right), ln\left(\frac{R1 \cdot DL - r1 \cdot dl}{R2 \cdot DL - r2 \cdot dl}\right)\right)$ for  $j \in 1...m$  $\left(a_k dl_k r_k k\right) \leftarrow \left[\left(A + L \cdot \frac{j-1}{m}\right) \left(\frac{L}{m}\right) R (k+1)\right]$  $\alpha\left(Q,L,q,dl\right) := \ \left| \ \alpha p\left(Q+0.5\cdot L,q,dl\right) \quad \mathrm{if} \ \left|Q+0.5\cdot L-\left(q+0.5\cdot dl\right)\right| > 2\cdot \left|L\right|$ (a dl r)  $\left| \begin{array}{l} 1.02 \cdot \int_{0.01}^{0.99} \alpha p\left(Q + x \cdot L, q, dl\right) \, dx \quad \text{otherwise} \\ \alpha 0\left(Q, L, R, q, dl\right) := \\ \left| \begin{array}{l} \frac{\ln(\left|L\right| + R) - 0.307}{2 \cdot \pi} \quad \text{if} \ R > 0 \end{array} \right| \right.$  $Grid(t, R, Lx, nx, Ly, ny) := S \leftarrow (0 \ 0 \ 0)$ for  $i \in 0... nx$ for  $j \in 0 ... ny - 1$  $+ stack \left[ S, \left[ \begin{matrix} i\cdot(Lx \div nx) \\ j\cdot(Ly \div ny) \\ t \end{matrix} \right] \left[ \begin{matrix} i\cdot(Lx + nx) \\ (j+1)\cdot(Ly \div ny) \\ t \end{matrix} \right] R \right]$  $\alpha(Q, L, q, dl)$  otherwise  $\alpha'(Q, L, q, dl) := \alpha(Q, L, q, dl) + \alpha \left[Q, L, \begin{pmatrix}q_1\\q_2\\-q_3\end{pmatrix}, \begin{pmatrix}dl_1\\dl_2\\-dl_3\end{pmatrix}\right]$  $\quad \text{for} \quad j \in 0 \, . \, \, ny$ for  $i \in 0$ ... nx 
$$\begin{split} S \leftarrow stack \begin{bmatrix} s, \left[ \begin{matrix} i\cdot(Lx+nx) \\ j\cdot(Ly+ny) \\ t \end{matrix} \right] \begin{bmatrix} (i+1)\cdot(Lx+nx) \\ j\cdot(Ly+ny) \\ t \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ \end{bmatrix} \end{split}$$
 $\text{Limit}(\lambda, \delta) := | \text{return } 0 \text{ if } \lambda = 0$ submatrix(S, 2, rows(S), 1, cols(S)) dim  $\leftarrow 25$  $Vert(t, R, Lx, nx, Ly, ny, Lz) := S \leftarrow (0 \ 0 \ 0)$ for  $j \in 0...1$ for  $n \in 1$ ...dim for  $i \in 0$ ... nx  $1 + \frac{\left(\sum_{k=1}^{n} \frac{\lambda^{k}}{k}\right) + if\left[\lambda < 0, \frac{\lambda^{n+1}}{2 \cdot (n+1)}, 0\right]}{1 - \left(1 - \lambda\right)} < \delta$  $\left[\left[i \cdot (Lx \div nx)\right]\right]$  $\left[i \cdot (Lx \div nx)\right]$  $S \leftarrow stack | S$ , j∙Ly j·Ly t + Lz R return n if for  $i \in 0 ... 1$ dim for  $j \in 1..$  ny i·Lx 
$$\begin{split} & \text{$\varphi$ground $(x, y, q, dl, \rho 1, \rho 2, h, n, \tau)$} := \left| \begin{array}{cc} p \leftarrow (x \quad y \quad 0)^T \\ & \underset{i \ = \ 1}{\text{last}(q)} \\ & \sum_{i \ = \ 1}^{i \ (\alpha ij \left(p, 0, 0, q_j, dl_j, \rho 1, \rho 2, h, n\right) \cdot \tau_j \right)} \end{split} \right. \end{split}$$
 $j \cdot (Ly \div ny)$  $S \leftarrow \text{stack} | S, | j \cdot (Ly \div ny) |$ R t + Lz submatrix(S, 2, rows(S), 1, cols(S))  $Graph2d(Q,L) := \left( xv_1 \ yv_1 \ m \right) \leftarrow (j \ j \ 1)$  $TauFi(Q, L, R, I, \rho 1, \rho 2, h, n) := t0 \leftarrow time(0)$ for  $i \in 1$ .. last(Q)  $\begin{vmatrix} x_{1,i} & y_{1,i} \\ x_{2,i} & y_{2,i} \\ x_{2,i} & y_{2,i} \end{vmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} (Q_i)_1 & (Q_i)_2 \\ (Q_i + L_i)_1 & (Q_i + L_i)_2 \end{bmatrix} \\ (xv_m & yv_m & m) \leftarrow \begin{bmatrix} (Q_i)_1 & (Q_i)_2 & m+1 \end{bmatrix} \text{ if } |(L_i)_3| \neq 0 \end{cases}$ for  $i \in 1$ .. last(Q) for  $j \in 1$ .. last(Q)  $\begin{aligned} \alpha_{i,j} \leftarrow \alpha_{ij} \begin{bmatrix} Q_i, L_i, R_i \cdot (i = j), Q_j, L_j, \rho_1, \rho_2, h, n \end{bmatrix} \\ \tau \leftarrow \text{lsolve} \left( \alpha, \alpha^{\langle 1 \rangle} \cdot 0 + 1 \right) \\ \varphi \leftarrow \frac{I}{\tau \cdot |L|} \end{aligned}$  $x y xv yv \min(\text{Re}(x)) - 1 \min(\text{Re}(y)) - 1 \max(\text{Re}(x)) + 1 \max(\text{Re}(y)) + 1)$  $Graph2d(A, L) := B \leftarrow A + L$  $x_1 \leftarrow (A_1)_1$  $y_1 \leftarrow (A_1)_2$  $(\tau \cdot \sigma \quad \sigma \quad time(1) - t0)$ m ← 1 for  $i \in 1$ .. last(A)  $\alpha l1(\mathbf{Q},\mathbf{L},\mathbf{R},\mathbf{q},d\mathbf{l},\mathbf{q}',d\mathbf{l}',h2,\lambda,n):=\alpha 0(\mathbf{Q},\mathbf{L},\mathbf{R},\mathbf{q},d\mathbf{l})+\alpha(\mathbf{Q},\mathbf{L},\mathbf{q}',d\mathbf{l}')\ ...$  $| \text{if } (A_i)_1 \neq x_m \land (A_i)_2 \neq y_m$  $+\sum_{l=1}^{n} \left[\lambda^{k} \cdot (\alpha'(Q,L,q+k\cdot h2,dl) + \alpha'(Q,L,q'+k\cdot h2,dl))\right]$  $x_{m+1} \leftarrow j$  $m \leftarrow m + 1$  $x_{m+1} \leftarrow (A_i)$ Уточнение при λ < 0  $y_{m+1} \leftarrow (A_i)$  $\Delta \alpha 11 \ (\mathrm{Q},\mathrm{L},\mathrm{q},\mathrm{dl},\mathrm{q}',\mathrm{dl}',\mathrm{h}^2,\lambda,\mathrm{n}1) \coloneqq 0.5\cdot\lambda^{\mathrm{nl}}\cdot(\alpha'(\mathrm{Q},\mathrm{L},\mathrm{q}+\mathrm{n}1\cdot\mathrm{h}^2,\mathrm{dl}) + \alpha'(\mathrm{Q},\mathrm{L},\mathrm{q}'+\mathrm{n}1\cdot\mathrm{h}^2,\mathrm{dl}'))$  $m \leftarrow m + 1$  $\alpha 22\,(\mathrm{Q},\mathrm{L},\mathrm{R},\mathrm{q},\mathrm{dl},\mathrm{q'},\mathrm{dl'},\mathrm{h2},\lambda,\mathrm{n}):=\alpha 0\,(\mathrm{Q},\mathrm{L},\mathrm{R},\mathrm{q},\mathrm{dl})-\lambda\cdot\alpha\,(\mathrm{Q},\mathrm{L},\mathrm{q'}+\mathrm{h2},\mathrm{dl'})\ ...$  $x_{m+1} \leftarrow (B_i)_1$  $y_{m+1} \leftarrow (B_i)_{2}$  $m \leftarrow m + 1$  $m \leftarrow 0$ xv ← j  $\alpha 21\left(Q,L,q,dl,q^{\prime},dl^{\prime},h2,\lambda,n\right) \coloneqq (1-\lambda)\cdot\sum_{k=0}^{n} \left[\lambda^{k}\cdot\begin{pmatrix}\alpha\left(Q,L,q-k\cdot h2,dl\right)\ldots\\+\alpha\left(Q,L,q^{\prime}-k\cdot h2,dl^{\prime}\right)\ldots\end{pmatrix}\right]$ for  $i \in 1$ .. last(A) if  $|(A_i)_3 - (B_i)_3| \neq 0$  $m \leftarrow m + 1$  $xv_m \! \leftarrow \! \left( A_i \right)$  $yv_m \leftarrow (A_i)_{\gamma}$ xy yy min(Re(x)) - 1 min(Re(y)) - 1 max(Re(x)) + 1 max(Re(y)) + 1)

 $UpDown(S,h) := \int for i \in 1.. rows(S)$ 

 $\left| \left( \begin{array}{ccc} A & B & R \end{array} \right) \leftarrow \left( \begin{array}{ccc} S_{i,1} & S_{i,2} & S_{i,3} \end{array} \right) \right.$ 

 $if \ ny > 1 \\$